

INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW
Zakład Diagnostyki Nawierzchni

SPRAWOZDANIE
z realizacji pracy TD-69 pt.:
**„Weryfikacja zasad oceny stopnia współpracy
w pęknięciu odbitym w nawierzchni półsztywnej”**

Zleceniodawca: GDDKiA, umowa nr 683/2004

Opracował:

mgr inż. Tomasz MECHOWSKI

Kierownik Zakładu
Diagnostyki Nawierzchni

mgr inż. Tomasz MECHOWSKI

Warszawa, październik 2005

SPIS TREŚCI

1. Podstawa i zakres pracy	3
2. Wprowadzenie	3
3. Wytypowanie odcinków badawczych	7
4. Wykonanie badań ugięciomierzem FWD w obrębie spękań i pomiędzy nimi, badania wytrzymałości na ściskanie podbudowy związanej cementem	8
5. Wnioski z przeprowadzonych badań	50
Bibliografia	52
Załącznik: Wyniki pomiarów ugięciomierzem FWD – seria wiosenna	

1. Podstawa i zakres pracy

Praca wykonana została na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w ramach umowy nr 683/2004 z dnia 7.04.2004 roku. Celem niniejszej pracy jest weryfikacja dotychczas stosowanej procedury oceny stopnia współpracy nawierzchni w obrębie pęknięcia odbitego, opisanej w Katalogu Wzmocnień i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych.

2. Wprowadzenie

Spękania nawierzchni asfaltowych są jednymi z najczęściej występujących rodzajów zniszczeń nawierzchni drogowych oraz stanowią poważny problem w ich utrzymaniu. Zarówno rodzaj spękań jak i przyczyny ich powstawania są bardzo zróżnicowane. Podstawowymi czynnikami mającymi związek z powstawaniem spękań są: obciążenie ruchem, warunki klimatyczne i właściwości materiałów konstrukcyjnych. Spękania należy traktować jako poważne uszkodzenia, które mogą doprowadzić do redukcji nośności nawierzchni poprzez umożliwienie wnikania wody i środków odladzających do niżej położonych warstw konstrukcji.

Sposób naprawy spękanej nawierzchni zależy od stwierdzonych przyczyn powstawania pęknięć, głębokości uszkodzeń, dostępnych technologii napraw oraz także od dostępnego budżetu. Wśród spotykanych technologii napraw można znaleźć sposoby:

- doraźne - tymczasowo powstrzymujące lub spowalniające proces zniszczenia,
- częściowej przebudowy - wymiana części struktury nawierzchni,
- całkowitej przebudowy - wymiana całej konstrukcji nawierzchni.

Rozpoznanie przyczyn powstawania spękań prowadzi także do sformułowania zasad projektowania nowych nawierzchni w taki sposób, aby systemowo uniknąć ryzyka powstania spękań.

Jednym z rodzajów występujących spękań są spękania odbite. Podstawową przyczyną ich powstania są przemieszczenia warstwy podbudowy w obrębie istniejącego w niej pęknięcia. Ruchy podbudowy wywołane oddziaływaniem kół pojazdów oraz zmianami temperatury nawierzchni powodują wystąpienie naprężeń rozciągających lub ściskających w warstwie bitumicznej. Po przekroczeniu wytrzymałości mieszanki mineralno-asfaltowej następuje propagacja pęknięcia.

W drogownictwie stosowane są dwie grupy metod mających na celu wyeliminowanie pojawiania się spękań na powierzchni dróg [1]:

1. Zapobieganie lub naprawa pęknięć przed wykonaniem nakładki.
2. Wykonanie odpowiedniego rodzaju nakładki.

Obie wymienione metody mogą być stosowane oddzielnie lub łączone w razie potrzeby.

Zapobieganie lub naprawa pęknięć przed wykonaniem nakładki

Ta grupa obejmuje metody zapobiegania inicjacji pęknięć już na etapie budowy drogi, zabiegi wykonywane na istniejących pęknięciach, a pozwalające na uczynienie ich mniej aktywnymi oraz stosowanie takich konstrukcji nawierzchni lub rozwiązań materiałowych, które ograniczą ryzyko wystąpienia spękań lub ich intensywność.

Właściwy wybór materiałów, rodzaju konstrukcji nawierzchni, dobra jakość wykonania są podstawowymi zasadami, które powinny być brane pod uwagę już na etapie projektowania:

- Wybór materiałów:
Lepiszczce asfaltowe powinno być wybrane w zależności od warunków klimatycznych oraz rodzaju mieszanki. Należy rozważyć zastosowanie polimerów lub innych dodatków do lepiszcza poprawiających jego odporność na pękanie. W podbudowach stabilizowanych cementem korzystne jest stosowanie kruszyw o niskim współczynniku rozszerzalności termicznej.
- Projekt konstrukcji nawierzchni
Jest oczywiste, że konstrukcja nawierzchni powinna być projektowana w funkcji natężenia ruchu i warunków temperatury, w jakich będzie pracowała. Nieodpowiednia nośność nawierzchni, spowodowana między innymi zbyt małą grubością warstw, powoduje powstawanie spękań zmęczeniowych. W podbudowach stabilizowanych cementem należy minimalizować ryzyko powstawania niekontrolowanych pęknięć.
- Jakość wykonania
Należy stosować wszystkie zasady gwarantujące dobre wykonanie warstw nawierzchni. Wśród nich można wymienić dobre sklejenie międzywarstwowe, właściwie wykonane połączenia ("szwy") podłużne i poprzeczne oraz dobre zagęszczenie.

Podczas wykonywania konstrukcji nawierzchni zawierających warstwy związane spoiwami hydraulicznymi, stosowane są m.in. techniki nacinania warstw związanych jeszcze w fazie budowy. Celem nacięć jest stworzenie prostoliniowych i bardziej regularnych "pęknięć" (zwykle co 2÷3 m.), które są cieńsze i dlatego powodują mniejsze ruchy krawędzi pęknięcia niż pęknięcia naturalne. Dlatego możliwe jest uniknięcie degradacji krawędzi pęknięć i obniżenie prędkości propagacji pęknięcia przez nakładkę. Sztuczne „pęknięcia” wykonywane są zwykle za pomocą specjalnych płyt wibrujących lub przez walce drogowe wyposażone w boczne kółko do cięcia krawędzi. Inną odmianą jest nacinanie dolnej powierzchni warstwy podbudowy. Technika ta jest podobna, z tym, że inicjacja spękań odbywa się na dole warstwy. Odbywa się to przez ułożenie profilu o kształcie trójkąta.

Kolejną techniką stosowaną na etapie wykonywania podbudów związanych cementem jest technika zwana CRAFT. Polega ona na wycinaniu bruzdy w całej niezagęszczonej warstwie, przy zastosowaniu specjalnego noża umożliwiającego wypełnianie jej szybko rozpadową emulsją asfaltową (a ściśle pokrywaniu ścian bruzdy emulsją). Po wykonaniu i wypełnieniu nacięcia, warstwa jest normalnie zagęszczana. Wprowadzenie emulsji tworzy strefę o niskiej odporności na powstawanie pękań. Jednocześnie warstwa lepiszcza zakłóca ciągłość warstwy związanej i uszczelnia ją przed wnikaniem wody.

Jeszcze innym rozwiązaniem jest technika znana jako "aktywne połączenie (szczelina)". Polega na wstępnym rozłożeniu i zagęszczeniu warstwy, a następnie wyłobieniu rowka i wstawieniu profilu w kształcie fali. Następnie rowek jest wypełniany a cała warstwa zagęszczana w normalny sposób. Profile mają ok. 2 m. szerokości lub więcej i umieszczane są poprzecznie w linii środkowej każdego pasa. Wysokość profilu wynosi ok. 2/3 grubości warstwy. Profile pracują jako induktory pęknięć, pozwalają jednak przenosić obciążenia (dzięki swojemu kształtowi - przez klinowanie ścianek).

Metoda wstawiania plastikowych taśm sprężystych, polega na wprowadzeniu w świeżo wykonaną warstwę związaną sprężystej taśmy plastikowej, która byłaby początkiem pęknięcia. Wysokość taśmy wynosi ok. 1/3 grubości warstwy związanej. Grubość taśmy ok. 80 µm pozwala na jej odkształcanie przez kruszywo podczas zagęszczania - pozwala to na osiągnięcie efektywnego stopnia przekazywania obciążeń przez całą grubość podbudowy.

Uszczelnianie i ograniczanie aktywności istniejących spękań

W przypadkach, gdzie istniejące spękania nie mogą być wyeliminowane (z przyczyn technicznych lub ekonomicznych), prace wstępne przed ułożeniem nakładki powinny obejmować zmniejszenie aktywności spękań:

- Technologia "*crack and seat*" w nawierzchniach betonowych, polegająca na skruszeniu (odprężeniu) płyt betonowych i ich zagęszczeniu. Wykonuje się ją w przypadku zmierzonych dużych przemieszczeń pionowych pęknięć.
- Cięcie płyt z betonu cementowego.
- Cięcie i wypełnianie nakładek nad połączeniami w podbudowach związanych.
- Wtryskiwanie zaprawy cementowej lub żywic epoksydowych w celu ograniczenia ruchów pionowych płyt betonowych i wypełnienia pustek pod płytami.
- Wypełnianie szczelin lepiszczami lub asfaltami modyfikowanymi aby uniknąć wnikania wody.
- Naprawa spękań przez tzw. "*bridging*" tzn. przykrywanie pęknięcia na szerokość 10÷20 cm warstwą elastomeroasfaltu o grubości 1÷2 mm. Metoda ta zapewnia szczelność pęknięciu, ale nie przeciwdziała procesowi pęknięcia. Ważne jest, aby przed zabiegiem podłoże zostało dobrze przygotowane oraz aby po zabiegu przykrycie było odpowiednio szorstkie

Nakładki na spękanych nawierzchniach są jednym z najczęściej wykonywanych zabiegów remontowych. Słowo „nakładka” jest rozumiane znacznie szerzej - jako cały system warstw i materiałów tworzących "nadbudowę" nad spękaną warstwą nawierzchni.

Często spotykany sposób wykonywania nakładki jako cieniej, 3÷4 cm warstwy bitumicznej, bez specjalnych dodatkowych wzmocnień, jest rzadko rozwiązaniem trwałym. Dlatego stosowanie nakładek wymaga nie tylko określenia odpowiedniego rodzaju i grubości mieszanki mineralno-bitumicznej, ale także właściwego systemu międzywarstwowego, stanowiącego barierę dla propagacji spękań. System nakładki na spękanej nawierzchni składa się z:

- warstwy wyrównawczej,

- systemu międzywarstwowego,
- nakładki bitumicznej.

W zależności od stanu starej nawierzchni, rodzaju obciążenia i typu przyjętej technologii naprawy, nie wszystkie wyżej wymienione elementy systemu nakładki będą zastosowane. System nakładki układany jest na spękanej nawierzchni po wykonaniu zabiegów (napraw) wstępnych np. uszczelnianiu. Należy dodać, że efektywność zastosowanego systemu nakładki zależy od właściwości wszystkich składników oddzielnie oraz ich współpracy jako systemu będącego częścią struktury nawierzchni. System międzywarstwowy składa się z produktu umocowanego do podłoża dzięki zastosowaniu specjalnej warstwy szepnej lub innej metody zależnej od rodzaju produktu.

Produkty.

- Asfalt piaskowy. Jest to podatna warstwa bitumiczna, składająca się z kruszywa frakcji 0/2 lub 0/6,3 mm i wypełniacza (10÷15%), o dużej zawartości lepiszcza (8÷12%), najczęściej modyfikowanego polimerem. Układana w warstwie o grubości 10÷20 mm.
- Warstwa SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer). Składa się z warstwy lepiszcza (najczęściej modyfikowanego) w ilości ok. 2.5 kg/m² i rozkładanej na lepiszczu warstwy jednofrakcyjnego kruszywa.
- Włóknina. Najczęściej są to włókniny polipropylenowe i poliestrowe o grubości nie przekraczającej kilku milimetrów, rozkładane na starej nawierzchni i nasączone lepiszczem zwykłym lub modyfikowanym. Zakładki wzdłuż styków podłużnych wynoszą zwykle 10 do 15 cm, wzdłuż styków poprzecznych 10 do 20 cm.
- Siatki stalowe. Są wykonywane ze stali galwanizowanej, która jest wzmocniana w regularnych odstępach przez sploty poprzeczne. Zakładki wzdłuż styków podłużnych wynoszą zwykle przynajmniej 30 cm.
- Przestrzenna siatka stalowa „plaster miodu”. Składa się z elementów sześciokątnych o grubości ok. 30 mm. Są one rozciągane na nawierzchni, przymocowywane do niej i wypełnione mieszanką mineralno-bitumiczną.
- Siatki. Składają się z całkowicie lub prawie całkowicie połączonych zeber. Są wykonywane z polipropylenu, polietylenu, poliestru lub z włókna szklanego. Przed ich ułożeniem zwykle wykonuje się spryskanie emulsją asfaltową w ilości co najmniej 400 g/m². Zakładki wzdłuż styków podłużnych wynoszą zwykle 20 cm, wzdłuż styków poprzecznych 10 cm.
- Kompozyty. Niektóre produkty zawierają w sobie połączenie kilku składników np. siatka połączona z włókniną.

Rola warstwy pośredniej zależy przede wszystkim od jej rodzaju i można ją zdefiniować następująco:

- przejmowanie naprężeń powstających wokół pęknięć i w konsekwencji ograniczenie naprężeń pojawiających się nad pęknięciami w nakładce bitumicznej. Produkt w tym wypadku pracuje jako wzmocnienie. Jest to przypadek spotykany w siatkach i siatkach stalowych,

- tworzenie elastycznej warstwy zdolnej do odkształceń poziomych bez zniszczenia, umożliwia to przenoszenie dużych ruchów wokół pęknięć: impregnowane włókniny, warstwy SAMI i asfalt piaskowy. Jest oczywiste, że należy unikać całkowitego „rozklejenia” się warstw, w przeciwnym wypadku dojdzie do szybkiego zniszczenia zmęczeniowego,
- tworzenie warstwy uszczelniającej nawet po ponownym pojawieniu się spękań na powierzchni: włókniny i warstwy SAMI.

Zastosowanie i skuteczność różnych technik zapobiegania powstawaniu lub propagacji pęknięć odbitych od podbudowy sztywnej opisano również w [2].

3. Wytypowanie odcinków badawczych

Do badań wytypowano 16 odcinków, na których występują pęknięcia odbite lub wykonywano prace naprawcze nawierzchni ze spękaniem odbitymi. Dane dotyczące lokalizacji odcinków badawczych i zastosowanej technologii naprawy zestawiono poniżej:

Odcinek nr 1 – . Łądowisko leśne w miejscowości Grądy, naprawa polegała na wzmocnieniu podbudowy z gruncementu, ułożeniu warstwy przeciwspekaniowej z włókniny oraz warstw wyrównawczej i ścieralnej.

Odcinek nr 2 – . Droga nr 7, miejscowość Załuski, w latach 1995 – 1997 dobudowano nową jezdnię z podbudową z chudego betonu, w której wywoływano mikrospeknięcia wałowaniem podbudowy w czasie jej dojrzewania

Odcinek nr 3 – Droga nr 4, Nogowczyce-Gliwice, w 1992 roku wykonywano prace naprawcze starej nawierzchni betonowej polegające na odprężeniu płyt betonowych i ułożeniu nowych warstw bitumicznych.

Odcinek nr 4 – Droga A4, Kraków-Katowice km 14+000 do 43+000, w latach 1996 – 1997 wykonywano naprawę spękanej i zdeformowanej nawierzchni z zastosowaniem pasków membrany przeciwspekaniowej z kompozytu siatki szklanej i włókniny.

Odcinek nr 5 – Droga nr 8 k/Rawy Mazowieckiej, km 68+800 do 81+900, wykonywano naprawę zdeformowanej (koleiny) i spękanej poprzecznie nawierzchni, zastosowanie membrany z siatki polipropylenowej w pasach nad spękaną podbudową ze stabilizacji cementem.

Odcinek nr 6 – Wisłostrada w Warszawie na odcinku od Mostu Gdańskiego do ul. Pułkowej - uszczelnianie spękań zalewą kauczukowo-asfaltową na gorąco.

Odcinek nr 7 – Droga nr 7, okolice mostu w Zakroczmie - uszczelnianie spękań zalewą kauczukowo-asfaltową na gorąco.

Odcinek nr 8 – Droga nr 2, od granicy Warszawy do miejscowości Zakręt - uszczelnianie spękań zalewą kauczukowo-asfaltową na gorąco.

Odcinek nr 9 – Droga nr 7 na obejściu Elbląga, w 1992 roku wykonywano prace naprawcze starej nawierzchni betonowej polegające na odprężeniu płyt betonowych i ułożeniu nowych warstw bitumicznych.

Odcinek nr 10 – Droga nr 22 na obejściu miejscowości Zblewo, km. 292+800 do 293+900, wykonano naprawę starej nawierzchni betonowej, odcinek podzielono na trzy sekcje i na każdej z nich zastosowano inne rozwiązanie techniczne mające opóźnić wystąpienie spękań odbitych z podbudowy sztywnej: nakładka z modyfikacją, geowłóknina + nakładka z modyfikacją.

Odcinek nr 11 – Droga nr 218 Oliwa-Chwaszczyno w obrębie węzła „Wysoka”, km. 0+300 do km 0+730, podczas budowy nowego odcinka, zastosowano trzy rodzaje membran przeciwspekaniowych na podbudowie z chudego betonu: włókninę, siatkę o sztywnych węzłach, „SAMI”.

Odcinek nr 12 – Droga nr 631, km. 29+000 do km 31+000, nawierzchnia z licznymi spękaniami poprzecznymi, spękania siatkowe wokół spękań poprzecznych, nie wykonywano napraw,

Odcinek nr 13 – Ulica Bogatyńska w Warszawie, liczne nie naprawione spękania poprzeczne.

Odcinek nr 14 – Ulica Doroszewskiego w Warszawie, liczne nie naprawione spękania poprzeczne.

Odcinek nr 15 – Ulica Kampinoska w Warszawie, spękania poprzeczne o dużej intensywności, bez napraw.

Odcinek nr 16 – Ulica Wójcickiego w Warszawie, spękania poprzeczne wskazujące na dużą sztywność podbudowy z betonu cementowego, na odcinku nie prowadzono prac naprawczych.

4. Wykonanie badań ugięciomierzem FWD w obrębie spękań i pomiędzy nimi, badania wytrzymałości na ściskanie podbudowy związanej cementem

Do oceny stanu pęknięcia oraz jego przyczyn stosuje się różne metody badawcze [1, 2]. Proces oceny można podzielić na dwie części: identyfikację przyczyn oraz pomiary i badania cech pęknięcia. W pierwszym etapie należy ocenić rodzaj konstrukcji nawierzchni, określić warunki klimatyczne i obciążenia ruchem, ustalić częstotliwość i rodzaj pęknięć. Zebranie tych danych pozwala na dokonanie oceny przyczyn powstania spękań. W ramach badań cech pęknięcia odbitego wykonuje się pomiary ugięć na płytach i na krawędziach spękań oraz rejestruje się wzajemne przemieszczenia płyt pod wpływem zmian temperatury otoczenia i obciążenia ruchem drogowym.

W niniejszej pracy zastosowano te spośród metod badawczych, które możliwe są do wykorzystania w Polsce, głównie z przyczyn sprzętowych. Na wytypowanych odcinkach badawczych przeprowadzono ocenę wizualną stanu i liczby zniszczeń występujących na powierzchni nawierzchni, głównie spękań odbitych i na tej podstawie obliczono tzw. indeks spękań „IS”. Wykonano również badania ugięć ugięciomierzem dynamicznym FWD w celu wyznaczenia wskaźnika stopnia współpracy płyt „k” oraz wskaźnika stopnia podparcia podbudowy sztywnej na podłożu „s”. Pobrano również odwierty z badanych nawierzchni w celu wykonania badań materiałowych: oznaczenia modułu sztywności warstwy lub warstw asfaltowych i zbadania wytrzymałości na ściskanie podbudowy.

Indeks spękań

Rejestrację liczby i rodzaju spękań wykonano na podstawie wizualnej oceny stanu powierzchni badanych odcinków. Miarą intensywności pęknięć poprzecznych jest, wyrażony niemianowaną liczbą, tzw. indeks spękań, którego wartość oblicza się ze wzoru:

$$IS = 1/2L_n + L_p \quad (1)$$

w którym:

- IS - indeks spękań,
- L_n - liczba pęknięć niepełnych na odcinku 100 m,
- L_p - liczba pęknięć pełnych na odcinku 100 m.

Brak jest ogólnych kryteriów oceny na podstawie wartości IS stopnia spękania nawierzchni. Alenowicz w [10] zaproponował następujący podział, przyjęty również w niniejszej pracy:

- odcinki niespękane IS poniżej 0,5
- odcinki średnio spękane IS od 1 do 4
- odcinki mocno spękane IS powyżej 4

Określenie przekazywania obciążeń przez pęknięcia oraz oznaczenie współczynnika współpracy „k”

Sposób przekazywania obciążenia przez pęknięcie ma duże znaczenie dla określenia wielkości przemieszczeń krawędzi pęknięcia. Jest to zarazem pewien wskaźnik szkodliwości pęknięcia (wielkości ścinania przekazywanego do warstw wyżej leżących). Do wykonania pomiaru najlepiej jest stosować ugięciomierz FWD. Standardowo do oceny współpracy płyt ustawia się płytę naciskową stycznie do badanego pęknięcia i rejestruje się ugięcie na części

obciążonej i nieobciążonej. W niniejszej pracy dodatkowo wykonano pomiary przy sześciu różnych pozycjach płyty naciskowej, tzn. tak że badane pęknięcie znajdowało się między poszczególnymi geofonami: 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7. Należy przy tym pamiętać aby czujniki ugięć były jednakowo odległe po obu stronach pęknięcia. Efekty badań przedstawiono na rysunkach 4.1. – 4.20.

W celu ustalenia współpracy dwóch części nawierzchni oddzielonych pęknięciem określa się współczynnik współpracy „k”, wg wzoru:

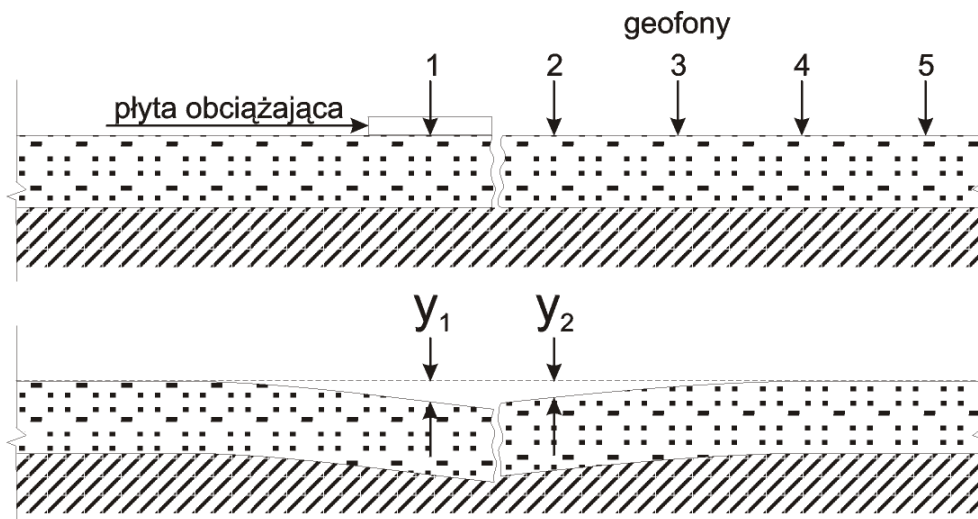
$$k = 2y_2/(y_1 + y_2) \quad (2)$$

w którym:

k - współczynnik współpracy

y_1 - ugięcie nawierzchni po obciążonej stronie pęknięcia,

y_2 - ugięcie nawierzchni po nieobciążonej stronie pęknięcia



Rysunek 1 Schemat obciążenia nawierzchni w celu wyznaczenia wskaźnika „k”

Według raportu RILEM [3], przyjmuje się następujące kryteria oceny nawierzchni pod kątem wartości współczynnika współpracy k:

$k < 0,66$ - oznacza brak współpracy między płytami,

$k: 0,66 \div 0,95$ - oznacza wystarczające przekazywanie obciążenia z jednej płyty na drugą,

$k > 0,95$ - oznacza pełną współpracę płyt, dobre przekazywanie obciążenia.

Pomiary ugięć wykonano ugięciomierzem dynamicznym FWD wg schematu z rys. 1.

Ocena warunków podparcia nawierzchni

Ocenę warunków podparcia podłoża gruntowego w obrębie spękania określa współczynnik wpływu punktu przyłożenia obciążenia „s” wyrażony wzorem:

$$s = y_1/y_0$$

w którym:

y_1 - ugięcie krawędzi obciążonej,

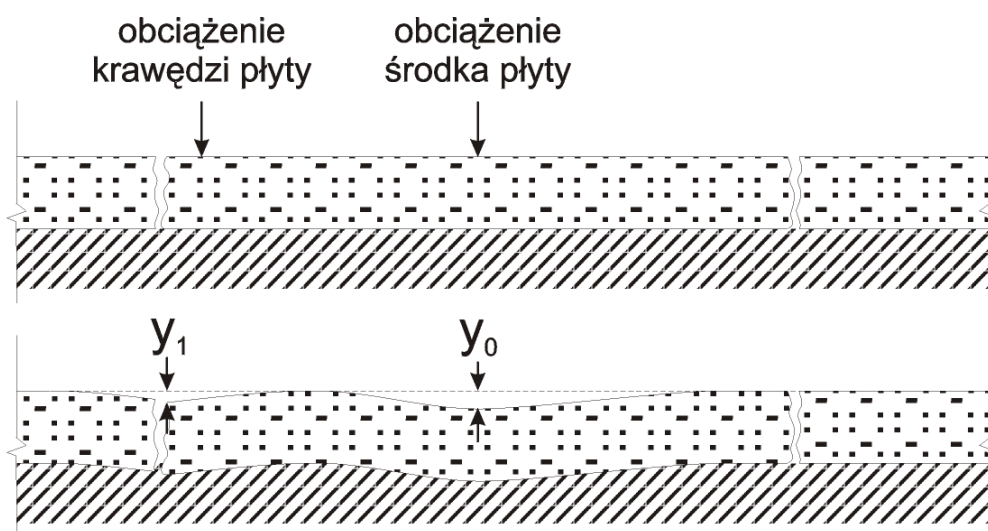
y_0 - ugięcie pomierzone pomiędzy spękaniem (najlepiej w środku rozpiętości płyty)

W ocenie wskaźnika s , wg [2] stosuje się następujący podział:

$s < 1,4$ - oznacza dostateczne podparcie podbudowy w obrębie spękania,

$s \geq 1,4$ - oznacza niedostateczne podparcie podbudowy w obrębie spękania,

Pomiary ugięć w celu wyznaczenia wskaźnika s wykonano ugięciomierzem dynamicznym FWD wg schematu przedstawionego na rys. 2.



Rysunek 2 Schemat obciążenia nawierzchni w celu wyznaczenia wskaźnika „ s ”

Na większości odcinków badawczych wykonano odwierty w konstrukcji nawierzchni, głównie w celu pobrania próbek do badań wytrzymałościowych. Próbki podbudowy związanej cementem zostały specjalnie przycięte, w celu wykonania badania wytrzymałości na rozciąganie, do wymiarów próbki walcowe $\phi = h = 100$ mm. Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono w prasie do osiowego ściskania. Wyniki przeprowadzonych badań wytrzymałościowych zestawiono w tab. 4.19.

4.1. Odcinek nr 1 – Ładowisko w m. Grądy

W 1997 roku, pod nadzorem autorskim IBDiM wykonano modernizację ładowiska leśnego w miejscowości Grądy. Tymczasową nawierzchnie pasa startowego, o wymiarach 25 x 800 m stanowiła warstwa gruntocementu o grubości ok. 22 cm pokryta powierzchniowym utrwaleniem z miazgi kamiennego i emulsji asfaltowej. Na nawierzchni płyty ładowiska występowały liczne zniszczenia powierzchniowe i spęknięcia. Przeważały spęknięcia poprzeczne, spowodowane skurczem gruntocementu. Na długości całego pasa startowego naliczono 172 spęknięcia, z czego 38 stanowiły spęknięcia podłużne na połączeniach technologicznych, 115 spęknięcia poprzeczne występujące na połowie szerokości płyty oraz 19 spęknięć na całej szerokość ładowiska.

Proces przebudowy uszkodzonej warstwy gruntocementowej obejmował następujące czynności:

- wypełnienie ubytków w nawierzchni materiałem doziarniającym (pospółka),

- rozłożenie cementu w ilości określonej receptą,
- frezowanie i wymieszanie destruktu z pospółka, cementem i wodą z zastosowaniem recyklera CATERPILLAR SM-350 na głębokość 10 cm,
- wyprofilowanie i zagęszczenie mieszanki walcem ogumionym i stalowym,
- pielęgnacja w okresie wstępnego twardnienia mieszanki przez polewanie wodą.

W wyniku przeprowadzonych prac uzyskano jednorodną warstwę nośną nawierzchni grubości 22 – 24 cm z gruntocementu o wytrzymałości na ściskanie $R_{28} = 2,5 \div 5,0$ MPa.

Do wyrównania lokalnych nierówności zastosowano warstwę profilującą z mieszanki mineralno-bitumicznej grubości $0 \div 5$ cm. Wcześniej podbudowę skropiono wolnorozpadową emulsją asfaltową, w ilości $0,3 \text{ kg/m}^2$. Warstwę profilującą zagęszczono walcem ogumionym. Na przygotowanej podbudowie ułożono warstwę przeciwspekaniową z geowłókniny poliestrowej, pasmami o szerokości 3 m, na powierzchni skropionej średniorozpadową emulsją asfaltową w ilości $0,8 \text{ kg/m}^2$. Warstwa ściernalna o grubości 3,5 cm wykonana została z mieszanki SMA 0/12 mm. Jako stabilizatora użyto poliolefinu oraz włókna celulozowe.

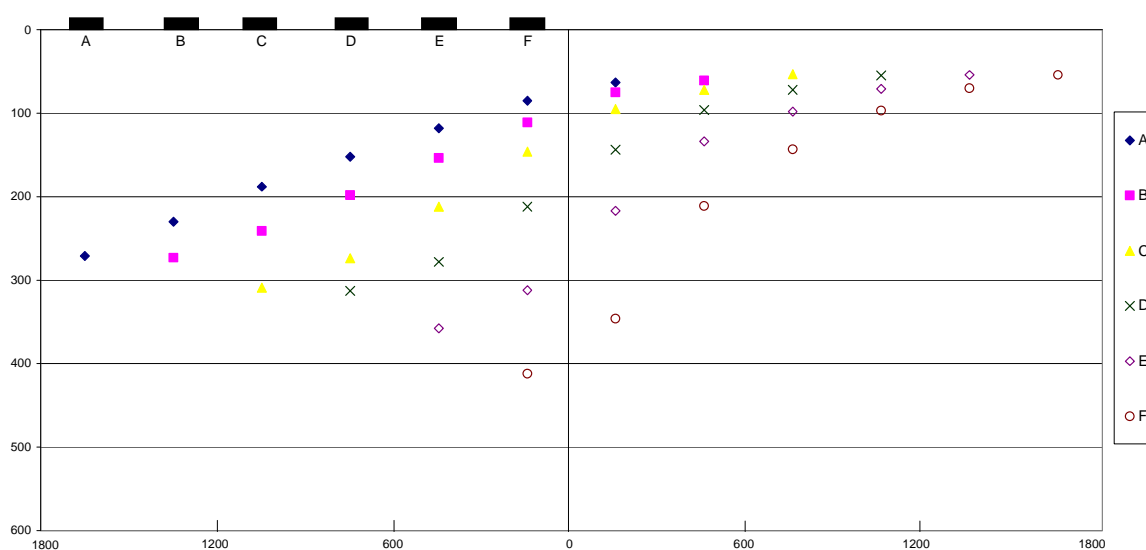
Ocena wizualna wykonana po latach eksploatacji wykazała występowanie na powierzchni spękań, które odtworzyły się z poprzednio istniejących pęknięć podbudowy. Wszystkie spękania zostały uszczelnione zalewą kauczukowa asfaltową metodą pasmową. Warstwa ściernalna nawierzchni układana była w 5 pasach, każdy o szerokości ok. 5m. Rejestrację odtworzonych spękań prowadzono więc pasami, traktując pełne spękanie jako pęknięcie na szerokość jednego pasa. W ocenie wizualnej stwierdzono 62 pęknięcia pełne oraz 38 pęknięć na połowę pasa, co daje indeks spękań $IS = 2$ (dwa pęknięcia na całą szerokość pasa startowego na długości 100m).

Na płycie lądowiska wykonano pomiary ugięć na spękaniach oraz w miejscach nie spękanych. Wyniki badania, wraz z obliczonymi wskaźnikami k i s zestawiono w tablicy 1. Na dwóch spękaniach przeprowadzono również rejestrację ugięć przy różnej konfiguracji ustawienia deflektometrów (geofonów). Wyniki przedstawiono na rysunkach 3 i 4.

Tablica 1 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 1 – Lądowisko Grądy

Pikietaż	Miejsce obciążenia	Wskaźniki deflektometrów (geofonów), μm							Wskaźniki oceny	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	k	s
Strona zachodnia										
0+000	pęknięcie	479	241	145	101	76	63	53	0,67	
0+075	płyta	214	183	140	96	73	55	44		2,24
0+152	pęknięcie	283	177	124	98	75	60	46	0,77	
0+180	płyta	220	188	155	125	100	78	62		1,29
0+190	pęknięcie	412	346	211	143	97	70	54	0,91	
0+260	płyta	300	256	199	149	100	75	62		1,37
0+320	pęknięcie	239	168	127	101	72	59	46	0,83	
0+335	płyta	225	157	123	95	71	58	45		1,06

0+348	pęknięcie	246	168	110	91	69	53	41	0,81	
0+364	plyta	215	165	122	94	68	56	45		1,14
0+377	pęknięcie	290	172	135	100	80	63	51	0,74	
0+397	plyta	206	180	148	122	86	66	55		1,41
0+450	pęknięcie	334	197	134	94	69	54	44	0,74	
0+471	plyta	271	201	146	106	79	58	52		1,23
Strona wschodnia										
0+934	pęknięcie	624	257	149	99	75	57	47	0,58	
0+966	plyta	423	262	180	126	89	69	54		1,48
1+114	pęknięcie	619	349	208	132	91	67	50	0,72	
1+138	plyta	248	190	148	113	89	69	55		2,50
1+250	pęknięcie	455	239	172	126	89	67	53	0,69	
1+275	plyta	369	291	225	166	123	88	67		1,23
Średnia wartość wskaźnika współpracy płyt „k”									0,75	
Odchylenie standardowe									0,09	
Średnia wartość wskaźnika podparcia podbudowy „s”										1,49
Odchylenie standardowe										0,48



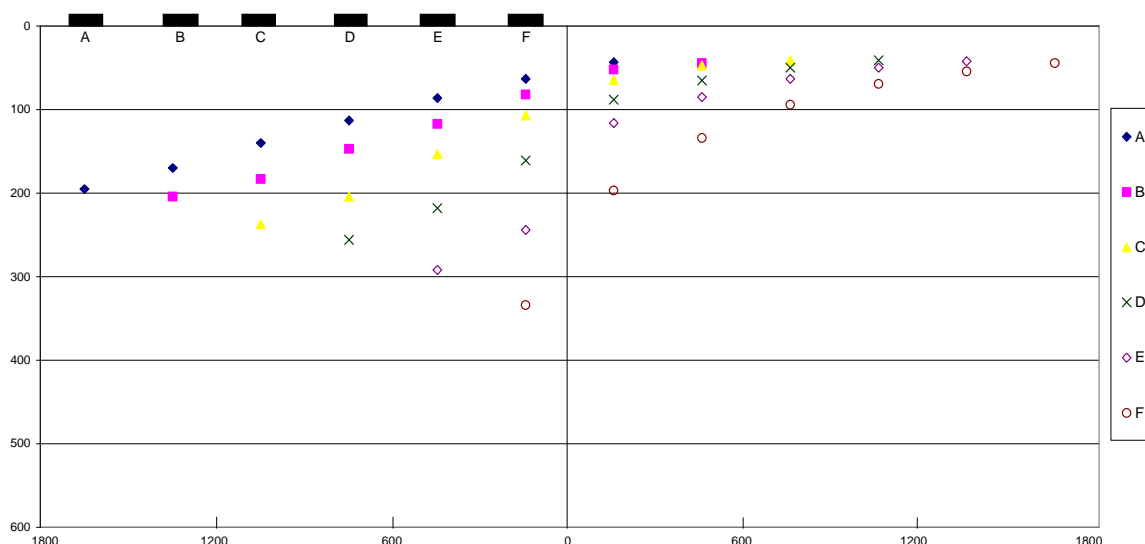
Rysunek 3 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 1 – Łądowisko Grądy, punkt 0+198

Łądowisko w Grądach jest bardzo ciekawym, z badawczego punktu widzenia, odcinkiem doświadczalnym. Nie występuje na nim praktycznie ruch. Można więc obserwować zachowanie podbudowy sztywnej i ułożonych na niej warstw asfaltowych tylko pod kątem wpływów atmosferycznych. Na płycie lotniska występują jedynie naciski od sporadycznie lądujących, lekkich samolotów służących do oprysków terenów leśnych. Nie stwierdzono koncentracji spękań w środkowej części lotniska, co mogłoby sugerować wpływ tych oddziaływań na nawierzchnię. Spękania występują głównie od strony krawędzi płyty.

Na prawie wszystkich badanych spękaniach stwierdzono wystarczającą współpracę płyt w obrębie pęknięcia (średnio $k = 0,75$). Trzeba jednak zaznaczyć, że po stronie wschodniej lotniska wskaźnik k jest niższy. Być może powodem tego jest poprzeczne ukształtowanie pasa startowego: spadek całej nawierzchni jest w kierunku wschodnim. Świadczyć to może o lepszej penetracji wody w tej części płyty lotniskowej, a co za tym idzie większej degradacji podbudowy i podłoża gruntowego.

Podparcie podbudowy w obrębie pęknięć jest niedostateczne. Średni wskaźnik podparcia płyt s wyniósł 1,49, z odchyleniem standardowym 0,48, co świadczy o niejednorodności pracy nawierzchni w pobliżu spękań lub też o zmniejszeniu wytrzymałości podbudowy gruntowocementowej. Świadczyć o tym może również rozproszenie wyników ugięć (rys. 3 i 4), charakterystyczne bardziej dla nawierzchni podatnych.

Wystąpienie 20 % spękań z podbudowy na nawierzchnię, już po dwóch latach eksploatacji wskazuje, że zastosowanie geowłókniny jako warstwy przeciwspekaniowej nie spełniło swego zadania całkowicie. Głównym powodem wystąpienia pęknięć wydaje się być w tym przypadku mała grubość warstw asfaltowych (łącznie 3,5 - 8,5 cm), a co za tym idzie większy gradient temperatury w podbudowie gruntowocementowej. Należy jedna sądzić, że jeśli nowe spęknięcia, które wystąpią na nawierzchni będą nadal sukcesywnie uszczelniane, to lotnisko, przy podobnej jak obecnie częstotliwości lądowań, powinno służyć jeszcze wiele lat.



Rysunek 4 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 1 – Lądowisko Grądy, punkt 0+450

4.2. Odcinek nr 2 – droga nr 7 w miejscowości Załuski

Na odcinku Załuski – Zakroczym, drogi nr 7 wybudowano w latach 1995 – 1997 nową, drogą jezdnię o konstrukcji półsztywnej: trzy warstwy asfaltowe na podbudowie związanej cementem. Kolejne wykonane sekcje drogi oddawano do ruchu. Pęknięcia poprzeczne pojawiły się szybko w warstwach asfaltowych. W nawierzchni oddanej do ruchu w 1995 roku,

po zimie 1996/97, stwierdzono na 6 km lewej jezdni 91 pęknięć poprzecznych na warstwie ścieralnej (łączna grubość warstw asfaltowych 18 cm).

Przeprowadzona w kwietniu 1997 roku inwentaryzacja odcinka wykonanego w 1996 roku wykazała liczne pęknięcia poprzeczne na nawierzchni. Odcinek ten charakteryzował się różnym zaawansowaniem robót i zmienną grubością warstw asfaltowych. Wyniki przeglądu były następujące:

- na sekcjach z podbudową asfaltową, grubości 8 cm, stwierdzono 15 pęknięć na długości 700 m (miejscowość Szczytno, jezdnia prawa), 18 pęknięć na długości 1200 m (miejscowość Załuski, jezdnia prawa); na odcinku testowym w Załuskach zastosowano kontrolowaną degradację podbudowy związanej cementem w postaci wywołania mikrospeknań wałowaniem podbudowy w czasie jej dojrzewania,
- na sekcjach z podbudową asfaltową i z warstwą wiążącą, o łącznej grubości 14 cm występowało 13 pęknięć na długości 2300 m (od skrzyżowania z drogą do Nasielska, jezdnia prawa), 5 pęknięć na długości 800 m (od skrzyżowania z drogą do Sokala, jezdnia prawa).

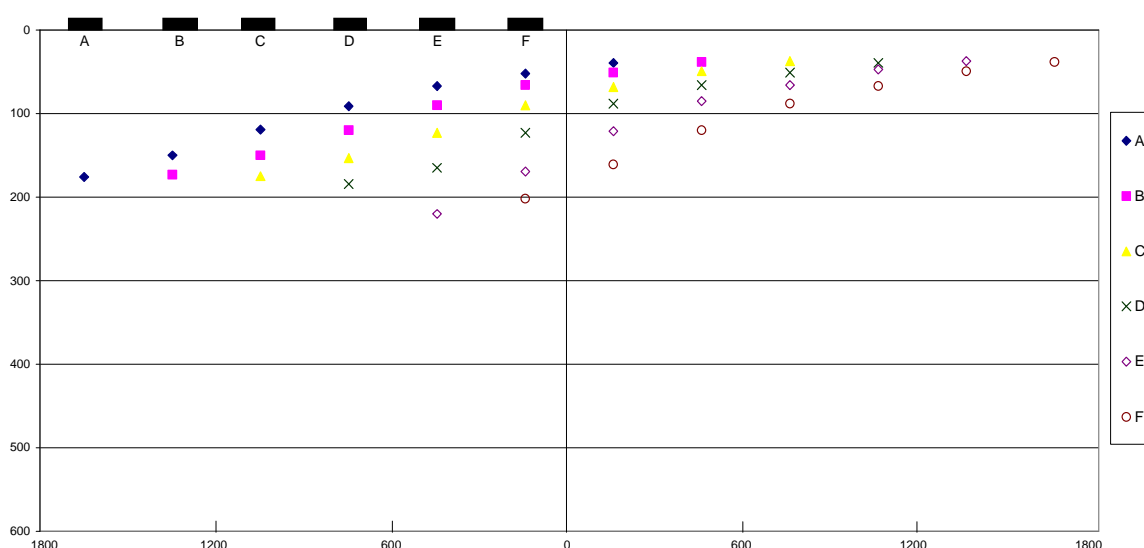
Na starej remontowanej jezdni o konstrukcji podatnej z podbudową niezwiązaną wymieniono warstwę ścieralną nawierzchni oraz dobudowano pasy wyłączeń przed skrzyżowaniami. Na pasach tych nowa konstrukcja jest półsztywna, z podbudową z chudego betonu. Jezdnia ta nigdy nie wykazywała pęknięć poprzecznych, a po przebudowie zauważono pojedyncze pęknięcia w obrębie skrzyżowań, w miejscach dobudowania pasa z podbudową z chudego betonu. W czasie jednej zimy powstało pęknięcie, które rozprzestrzeniło się na cały przekrój jezdni.

Podczas inwentaryzacji speknań, na części odcinka, na której wykonywano badania ugięć stwierdzono występowanie 12 pęknięć na całą szerokość jezdni (na jezdni prawej – 5, na jezdni lewej – 7). Obliczony indeks speknań, odpowiednio dla jezdni prawej wyniósł $IS = 1$, a dla jezdni lewej $IS = 2,5$.

Tablica 2 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 2 – m. Załuski

Pikietaż	Miejsce obciążenia	Wskazania deflektometrów (geofonów), μm							Wskaźniki oceny	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	k	s
Strona prawa										
295+019	pęknięcie	430	127	102	79	61	54	42	0,46	
295+029	plyta	256	216	168	128	94	66	51		1,68
295+149	pęknięcie	202	161	120	88	67	49	38	0,89	
295+156	plyta	139	121	99	80	63	50	37		1,45
295+249	pęknięcie	290	163	120	89	67	51	42	0,72	
295+260	plyta	201	170	132	97	74	57	43		1,44
295+288	pęknięcie	318	177	130	92	73	55	38	0,72	
295+298	plyta	233	195	147	107	77	55	41		1,36

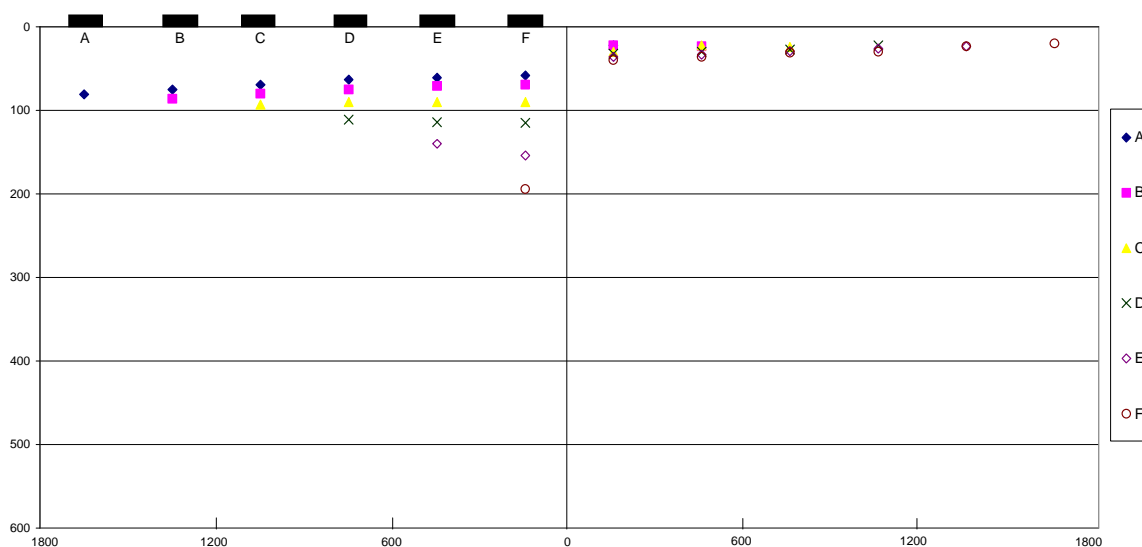
295+457	pęknięcie	296	121	95	75	57	42	32	0,58	
295+462	plyta	174	146	116	91	69	49	36		1,70
Strona lewa										
295+980	pęknięcie	223	61	53	47	40	33	28	0,43	
295+977	plyta	88	85	70	68	54	46	39		2,53
295+911	pęknięcie	246	56	48	42	35	29	26	0,37	
295+902	plyta	85	75	64	56	46	39	34		2,89
295+878	pęknięcie	240	57	50	43	40	35	28	0,38	
295+841	plyta	83	72	62	56	47	39	32		2,89
295+828	pęknięcie	180	85	50	42	35	29	25	0,64	
295+819	plyta	99	84	67	56	46	36	30		1,82
295+808	pęknięcie	194	40	36	31	30	23	20	0,34	
295+797	plyta	80	67	59	52	44	36	30		2,43
295+783	pęknięcie	216	48	38	37	32	26	24	0,36	
295+771	plyta	79	68	59	56	45	39	33		2,73
295+729	pęknięcie	89	81	71	62	56	45	38	0,95	
295+696	plyta	85	74	66	60	49	42	32		1,05
Średnia wartość wskaźnika współpracy płyt „k”									0,57	
Odchylenie standardowe									0,21	
Średnia wartość wskaźnika podparcia podbudowy „s”										2,00
Odchylenie standardowe										0,66



Rysunek 5 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 2 – m. Załuski, punkt 295+149

Pomiary ugięć ugięciomierzem FWD przeprowadzono na wszystkich 12 zarejestrowanych na odcinku nr 2 spękaniach. Wyniki tych badań oraz obliczone na ich podstawie wskaźniki współpracy płyt i warunków podparcia płyty na podłożu k i s zestawiono w tablicy 2. Dwa,

losowo wybrane pęknięcia poddano badaniom ugięć przy różnej konfiguracji ustawienia deflektometrów (geofonów). Wyniki przedstawiono na rysunkach 5 i 6.



Rysunek 6 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 2 – m. Załuski, punkt 295+808

Oceniany odcinek należy uznać jako średnio spękany. Mniejsza intensywność spękań występuje na jezdni prawej, w kierunku na Warszawę. Współpraca pomiędzy płytami jest zmienna (średni współczynnik k wyniósł 0,57). Najliczniej występują miejsca o stwierdzonym braku współpracy pomiędzy płytami (8 punktów z 12 pomierzonych). Są również spękania, na których współpraca płyt jest wystarczająca lub pełna ($k > 0,66$), w szczególności są to punkty 295+019 oraz 295+729. Miejsca te charakteryzują się również najlepszymi warunkami podparcia, na całym badanym odcinku drogi nr 7 ($s < 1,4$). Potwierdzeniem niejednorodności pracy płyt w obrębie pęknięcia poprzecznego są przykłady pokazane na rysunkach 5 i 6, gdzie przedstawiono, w sposób graficzny wyniki badań ugięć w punkcie o braku wzajemnej współpracy sąsiadujących płyt – punkt 295+808 oraz miejsce gdzie ugięcia wywołane na jednej z płyt przenoszone są prawie w całości na płytę drugą – punkt 295+149.

Analizując warunki podparcia podbudowy w obrębie pęknięcia należy stwierdzić, że oprócz dwóch wymienionych wcześniej spękań, na których wskaźnik s był mniejszy od wartości 1,4, na całym odcinku badawczym drogi nr 7 ugięcia w rejonie pęknięć są średnio dwukrotnie większe od ugięć pomierzonych poza spękaniem. Świadczy to o niedostatecznym podparciu płyt w rejonach pęknięć poprzecznych.

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz historii występujących na badanym odcinku spękań poprzecznych, stwierdzono nieskuteczność metody kontrolowanej degradacji podbudowy sztywnej. Pomimo zastosowanego sposobu pęknięcia powstały w znacznej ilości już po pierwszej zimie. Aby uchronić nawierzchnię przed dalszą degradacją podbudowy, zarówno istniejące spękania, jak i nowe, które mogą wystąpić w przyszłości, należy uszczelnić przed dostępem wody i środków odladzających. Jeszcze innym rozwiązaniem,

szczególnie dobrym na spękaniach, na których stwierdzono brak podparcia krawędzi, byłoby wykonanie naprawy z zastosowaniem geosyntetyków, metodą iniekcji zaprawą cementową.

4.3. Odcinek nr 3 – droga nr 4, Nogowczyce-Gliwice

Droga nr 4 na znacznej długości ma nawierzchnie betonową (beton klasy B35) o grubości 22 cm, szerokości 7,5 m i zmiennej szerokości opaski betonowej. Płyty ułożone są na warstwie odsączającej z pospółki. W podłożu występują zróżnicowane grunty od piaszczystych do gliniastych. Płyty mają szerokość 3,75 m, a ich długość jest zmienna i wynosi od 8 do 18 m, lecz spotyka się także płyty długości ok. 22 m. Droga była budowana w latach 1934 – 1938.

Charakterystycznym zniszczeniem płyt są spęknięcia poprzeczne. W płytach długich (16 – 18 m) występują dwa lub trzy pęknięcia poprzeczne, w krótszych płytach występuje jedno lub dwa pęknięcia. Innym rodzajem uszkodzeń obserwowanym na powierzchni nawierzchni betonowej były uskoki między płytami dochodzące w granicznych przypadkach do 6 cm. Oprócz tego sporadycznie występowały obłamania naroży i krawędzi płyt, brak wypełnienia szczelin oraz miejscowe ubytki powierzchniowe. Nie zaobserwowano zniszczeń zmęczeniowych (typu siatkowego) świadczących o utracie nośności wskutek powtarzalnych obciążeń od pojazdów samochodowych.

Zniszczenia nawierzchni, a szczególnie uciążliwe dla ruchu samochodowego uskoki i szczeliny między płytami spowodowały decyzję o naprawie nawierzchni. Zdecydowano się na remont polegający na:

- odprężaniu płyt betonowych, w celu minimalizacji ruchów poziomych płyt,
- wykonaniu warstwy wyrównawczej grubości 1 – 3 cm,
- wykonaniu warstwy wiążącej grubości 4 cm,
- ułożeniu warstwy ścieralnej grubości 5 cm.

Prace realizowane były w okresie lipiec-wrzesień 1992 roku. Odprężenie płyt betonowych wykonano młotem samojezdnym ARROW. Płyty uderzano w odstępach ok. 1 m. Odprężone płyty skropiono emulsją asfaltową w celu lepszego połączenia z warstwą wyrównawczą z betonu asfaltowego średnioziarnistego. Warstwę wiążącą wykonano z betonu asfaltowego modyfikowanego elastomerem SBS. Warstwę ścieralną wykonano z mastyksu grysowego SMA 0/12,8 z elastomerem SBS.

W ramach niniejszej pracy, wykonano na całym 2,5-kilometrowym odcinku drogi ocenę intensywności spękań. W tym celu policzono wszystkie pęknięcia poprzeczne, oddzielnie dla prawego i lewego pasa ruchu. Wyniki inwentaryzacji i obliczone indeksy spękań zestawiono w tablicy 3.

Na 14 spękaniach, po 7 na pasie prawym i lewym oraz w miejscach niespękanych wykonano pomiary ugięć nawierzchni ugięciomierzem FWD. Wyniki badania, wraz z obliczonymi wskaźnikami k i s zestawiono w tablicy 4. Na dwóch spękaniach przeprowadzono również

rejestrację ugięć przy różnym ustawieniu deflektometrów i płyty naciskowej względem pęknięcia. Wyniki przedstawiono na rysunkach 7 oraz 8.

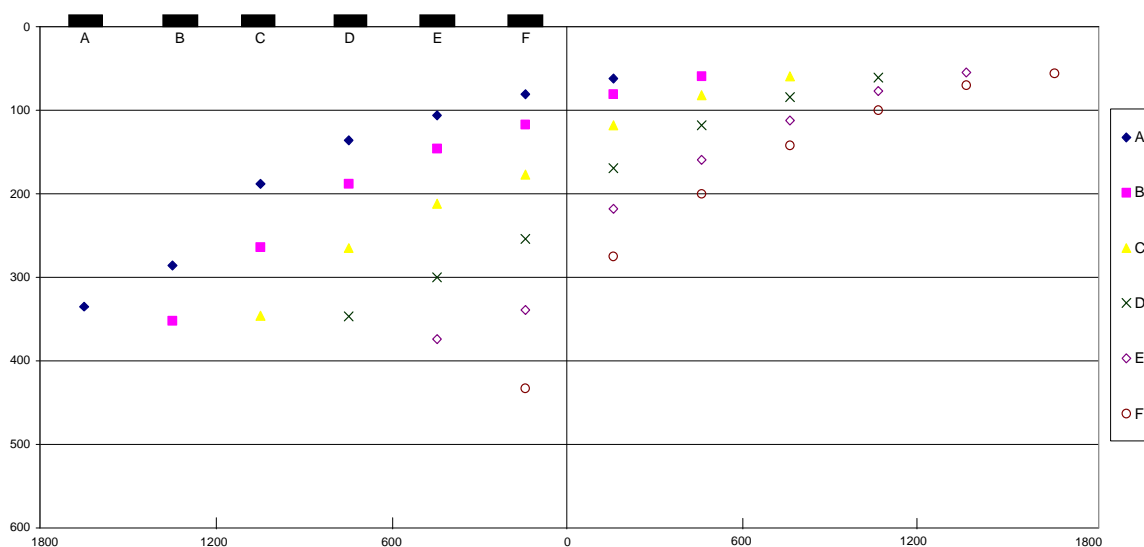
Tablica 3 Zestawienie liczby spękań na odcinku nr 3

Kilometr	Wartość IS		Kilometr	Wartość IS	
	Pas prawy	pas lewy		pas prawy	pas lewy
293,3 – 293,2	7,5	8,0	292,0 – 291,9	5,0	5,0
293,2 – 293,1	4,0	3,5	291,9 – 291,8	1,0	1,0
293,1 – 293,0	1,5	1,5	291,8 – 291,7	1,5	1,0
293,0 – 292,9	4	2,0	291,7 – 291,6	2,5	2,5
292,9 – 292,8	4,5	4,0	291,6 – 291,5	4,5	3,0
292,8 – 292,7	1,5	1,5	291,5 – 291,4	0,5	3,0
292,7 – 292,6	1,0	1,0	291,4 – 291,3	2,5	6,0
292,6 – 292,5	2,0	2,0	291,3 – 291,2	2,5	2,5
292,5 – 292,4	5,0	1,5	291,2 – 291,1	2,0	6,0
292,4 – 292,3	6,0	7,0	291,1 – 291,0	2,5	2,0
292,3 – 292,2	1,0	1,0	291,0 – 290,9	4,0	5,5
292,2 – 292,1	2,0	1,0	290,9 – 290,8	4,0	3,0
292,1 – 292,0	-	1,0	SUMA	72,5	75,5

Tablica 4 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 3 – droga krajowa nr 4

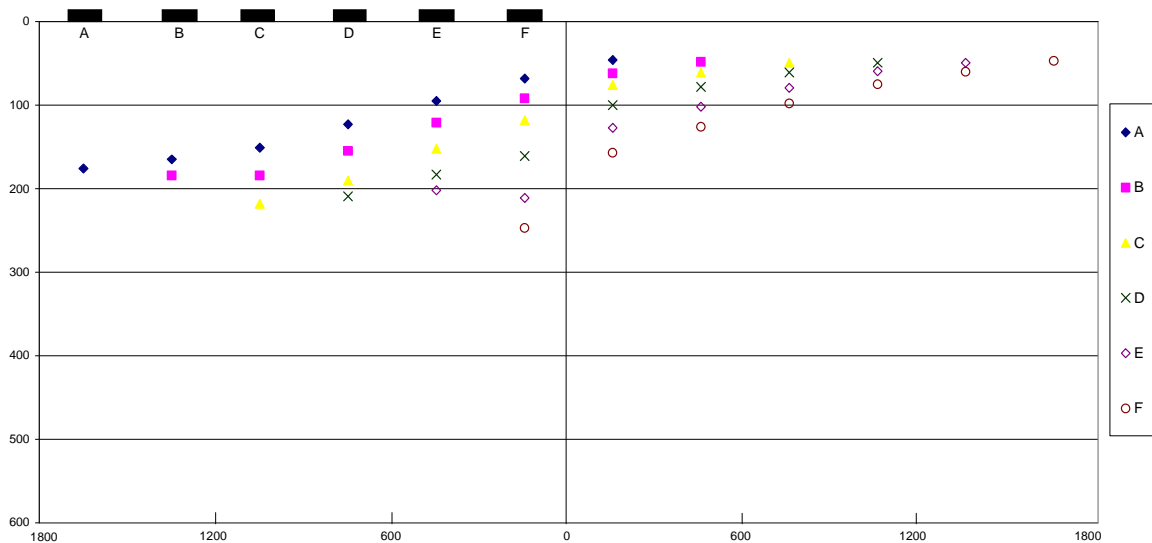
Pikietaż	Miejsce obciążenia	Wskazania deflektometrów (geofonów), μm							Wskaźniki oceny	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	k	s
Strona prawa										
291+633	pęknięcie	328	130	110	93	78	63	53	0,57	
291+638	płyta	233	218	173	134	100	76	63		1,41
291+770	pęknięcie	247	157	126	98	75	60	47	0,78	
291+776	płyta	183	168	138	110	85	67	52		1,35
291+828	pęknięcie	314	183	147	113	87	67	54	0,74	
291+834	płyta	192	180	159	133	108	87	69		1,64
291+923	pęknięcie	330	120	105	91	78	67	57	0,53	
291+931	płyta	201	176	155	142	119	99	82		1,64
291+962	pęknięcie	349	183	148	112	85	64	53	0,69	
291+967	płyta	174	154	134	111	93	74	62		2,01
292+112	pęknięcie	381	254	191	138	106	82	64	0,80	
292+117	płyta	272	266	211	165	125	92	71		1,40
292+213	pęknięcie	371	175	136	114	90	66	53	0,64	
292+219	płyta	256	223	190	159	125	97	79		1,45

Strona lewa										
292+357	pęknięcie	396	285	206	156	113	83	66	0,84	
292+355	plyta	313	287	211	158	118	87	64		1,27
292+342	pęknięcie	496	318	211	132	101	77	58	0,78	
292+338	plyta	327	239	169	128	96	71	52		1,52
292+220	pęknięcie	433	275	200	142	100	70	56	0,78	
292+217	plyta	342	269	193	135	99	76	64		1,27
292+164	pęknięcie	541	315	196	145	109	84	65	0,74	
292+160	plyta	219	199	177	138	114	90	69		2,47
291+930	pęknięcie	289	51	48	43	40	32	32	0,30	
291+926	plyta	102	97	87	80	68	56	49		2,83
291+831	pęknięcie	338	224	162	112	86	64	52	0,80	
291+826	plyta	273	226	186	137	110	86	67		1,24
291+773	pęknięcie	305	132	98	78	62	50	41	0,60	
291+770	plyta	196	173	146	116	90	71	54		1,56
Średnia wartość wskaźnika współpracy płyt „k”									0,68	
Odchylenie standardowe									0,15	
Średnia wartość wskaźnika podparcia podbudowy „s”										1,65
Odchylenie standardowe										0,48



Rysunek 7 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 3 – droga nr 4, punkt 292+220

Na podstawie przeprowadzonej inwentaryzacji na odcinku badawczym można stwierdzić, że intensywność spękań poprzecznych określona indeksem spękań jest dla obu kierunków ruchu podobna i wynosi średnio $IS = 3,0$. Wyniki badań FWD wskazują na nieciągłość pracy podbudowy betonowej i obniżenie nośności nawierzchni w obrębie spękań. Uzyskane wartości wskaźników k i s charakteryzują niedostateczne podparcie podbudowy i znacznie obniżony stopień współpracy między płytami w rejonie pęknięć.



Rysunek 8 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 3 – droga nr 4, punkt 291+770

Znaczne rozproszenie wyników ugięć stwierdzone w punkcie 292+200 (rys. 7), charakterystyczne jest bardziej dla nawierzchni podatnych. Świadczyć to może o rozluźnieniu podbudowy sztywnej spowodowanym wykonanym w 1992 roku odprężeniem płyt oraz o dalszej degradacji podbudowy.

Należy stwierdzić, że przy dość znacznym obciążeniu ruchem drogowym i niedużej grubości warstw asfaltowych, wynoszącej ok. 10 cm intensywność spękań zaobserwowana na odcinku badawczym nr 3 nie jest duża. Wykonany remont polegający na odprężeniu płyt i ułożeniu nowych warstw asfaltowych znacznie polepszył komfort jazdy. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i oceny wizualnej należy jednak przewidywać stopniową dalszą degradację podbudowy. Przykładem tego może być odcinek od km 292+500 do 292+300, gdzie zaobserwowano utratę nośności nawierzchni w postaci licznych spękań siatkowych oraz początków koleinowania się jezdni. Takie miejsca wymagają już głębszej przebudowy konstrukcji.

4.4. Odcinek nr 4 – autostrada A4, Kraków-Katowice

Autostrada A4, na odcinku Kraków-Katowice, ma nawierzchnią asfaltową na podbudowie z kruszywa stabilizowanego cementem. Występowały na niej spękania poprzeczne oraz, szczególnie na pasie prawym, deformacje lepkoplastyczne (koleiny). Remont nawierzchni miał poprawić komfort jazdy (likwidacja kolein) oraz zapobiec odtworzeniu się zaobserwowanych deformacji i spękań. W naprawie zastosowano warstwę przeciwspekaniową w postaci pasów na występujących spękaniach oraz beton asfaltowy w nowych warstwach odporny na deformacje trwałe. Remont polegał na: sfrezowaniu warstw wiążącej i ścieralnej na głębokość 10 cm, ułożeniu pasów membrany przeciwspekaniowej z

kompozytu siatki szklanej i włókniny na spękaniach (szerokość pasów 1m) oraz ułożeniu trzech nowych warstw asfaltowych łącznej grubości 18 cm – 6 cm podbudowy, 7 cm warstwy wiążącej i 5 cm ścieralnej (dwie górne warstwy z dodatkiem 35 % destruktu ze starych warstw).

Po pierwszym okresie zimowym od wykonania naprawy, na jej niektórych odcinkach pojawiły się spęknięcia poprzeczne. Inwentaryzacja spękań wskazywała, że;

- pęknięcia mają charakter odbity; występowały w warstwach asfaltowych nad pęknięciami w warstwie podbudowy z kruszywa stabilizowanego cementem,
- stan podbudowy, jej rozkruszenie w sąsiedztwie pęknięcia, świadczy, że mamy do czynienia ze ścinaniem warstw (ruchy pionowe płyt podbudowy),
- pęknięcia występują na odcinkach, na których grubość warstw asfaltowych jest mniejsza (łączna grubość warstw asfaltowych 13 cm),
- pęknięcia odtworzyły się w naprawianych siatką miejscach jedynie w 7 % - co może świadczyć o skuteczności tej metody przeciwdziałania spękaniom odbitym,
- spęknięcia pojawiły się w strefach poza pasami siatki, a więc nie były wcześniej zinwentaryzowane,
- pęknięcia nie występują na odcinkach, gdzie położona jest warstwa ścieralna łącznej grubości 18 cm oraz na odcinku przebudowanym całkowicie, o konstrukcji podatnej, z podbudową z mieszanki mineralnej.

Analiza wyników inwentaryzacji wskazuje na nakładanie się efektów pęknięcia termicznego i odbitego: jeśli grubość warstw asfaltowych jest mała, to pęknięcie ma charakter gwałtownego, szybkiego procesu, postępującego od góry i od dołu. Większa grubość warstw asfaltowych zapobiega temu zjawisku dzięki mniejszemu spadkowi temperatury w warstwach asfaltowych.

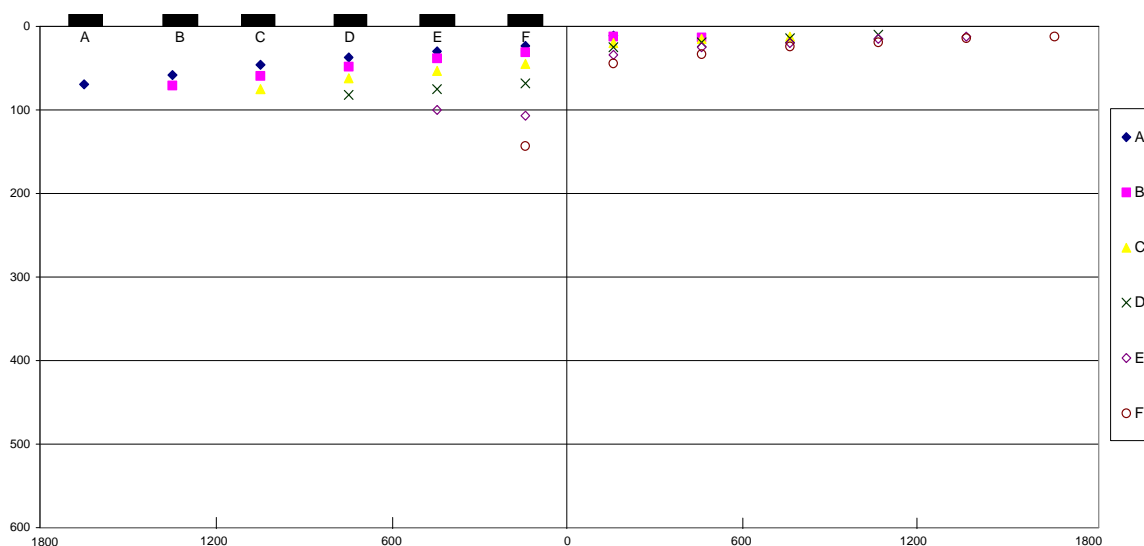
Do pomiarów ugięć i inwentaryzacji spękań wybrano odcinek jezdni lewej (pas zewnętrzny) od km 35+633 do km 31+364. Stwierdzono występowanie na nim 10 pęknięć poprzecznych, średni indeks spękań wyniósł więc $IS = 0,25$. Wszystkie spęknięcia uszczelnione były zalewą kauczukowo-asfaltową.

Wyniki badania oraz obliczone wskaźniki k i s zestawiono w tablicy 5. Na dwóch spękaniach przeprowadzono rejestrację ugięć przy różnym ustawieniu deflektometrów i płyty naciskowej względem pęknięcia. Wyniki przedstawiono na rysunkach 9 i 10.

Tablica 5 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 4 – autostrada A4

Pikietaż	Miejsce obciążenia	Wskazania deflektometrów (geofonów), μm							Wskaźniki oceny	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	k	s
35+633	pęknięcie	201	46	38	31	26	21	19	0,37	
35+627	płyta	66	60	53	48	42	35	31		3,05
35+246	pęknięcie	133	38	31	26	22	16	14	0,44	
35+241	płyta	65	56	45	38	30	24	20		2,05

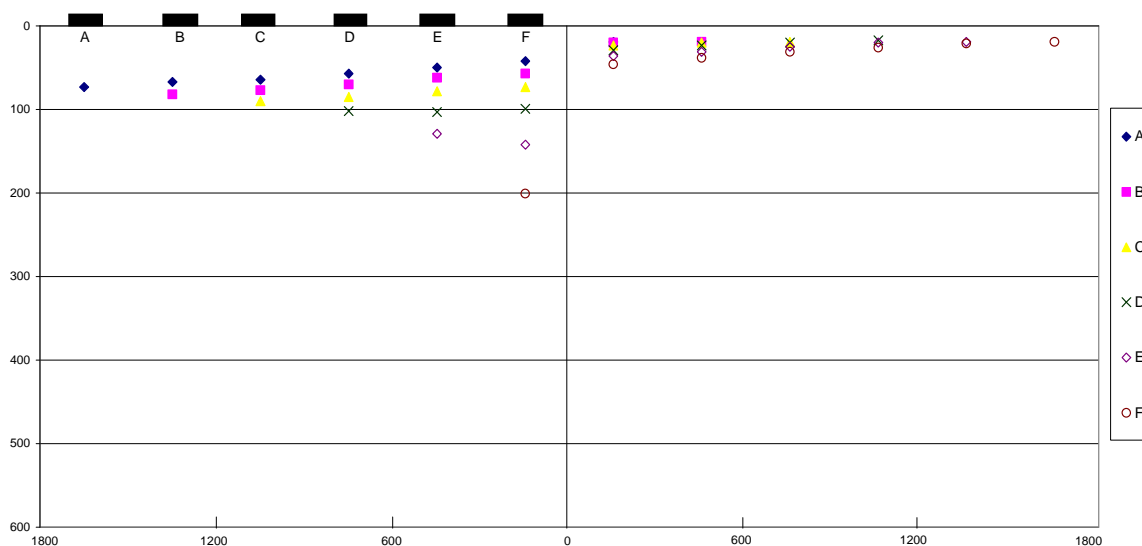
33+733	pęknięcie	762	365	187	59	36	25	19	0,65	
33+729	plyta	143	106	80	61	43	28	18		5,33
33+662	pęknięcie	252	61	47	35	28	21	18	0,39	
33+657	plyta	97	80	63	49	37	28	23		2,60
33+364	pęknięcie	143	44	33	24	19	14	12	0,47	
33+360	plyta	55	46	40	34	30	24	21		2,60
32+995	pęknięcie	104	37	31	25	24	18	15	0,52	
32+990	plyta	48	42	38	34	28	24	21		2,17
31+690	pęknięcie	136	123	99	75	58	40	28	0,95	
31+685	plyta	140	120	98	76	55	40	28		0,97
31+690	pęknięcie	180	144	104	75	51	35	24	0,89	
31+684	plyta	126	111	90	71	54	39	29		1,43
31+533	pęknięcie	71	64	59	52	44	36	30	0,95	
31+528	plyta	82	74	66	57	47	36	28		0,87
31+370	pęknięcie	187	117	94	72	60	45	34	0,77	
31+364	plyta	118	105	90	76	64	52	42		1,58
Średnia wartość wskaźnika współpracy płyt „k”									0,64	
Odchylenie standardowe									0,23	
Średnia wartość wskaźnika podparcia podbudowy „s”										2,26
Odchylenie standardowe										1,29



Rysunek 9 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 4 – A-4, punkt 33+364

Na badanym odcinku autostrady intensywność spękań była mała, wynosiła $IS = 0,25$. Zważywszy jednak na klasę drogi oraz na fakt wystąpienia pęknięć już po trzech latach od wykonania remontu, skłania to do dokładniejszego zbadania przyczyn tego zjawiska. Oceniany odcinek można generalnie podzielić na dwie części. Pierwsza z nich, pododcinek od

km 35+633 do km 32+990 charakteryzował się zarówno brakiem współpracy płyt oddzielonych pęknięciem ($k < 0,66$), jak i niedostatecznym podparciem krawędzi płyt ($s > 1,4$). Przedstawione na rysunkach 9 i 10 dwa przykłady pomiarów ugięć na tym pododcinku potwierdzają te obserwacje. W obu wypadkach widać duże różnice między wynikami uzyskanymi na obciążonej i nieobciążonej stronie pęknięcia. Świadczy to o braku współpracy płyt. Wskaźniki obliczone dla drugiego pododcinka wskazują, że warunki podparcia płyt są dużo lepsze niż na pierwszym pododcinku (średnio $k = 0,81$, $s = 1,21$). Brak jest więc ścinania na styku płyt.



Rysunek 10 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 4 – A-4, punkt 35+633

Wyniki pomiarów i oceny wizualnej wskazują na konieczność wykonywania badań przed przystąpieniem do remontu, w celu określenia, który rodzaj mechanizmu pęknięcia może wystąpić w nowych warstwach asfaltowych, tj. jaki jest stan podbudowy i podłoża, czy jest współpraca między płytami i czy nie grozi wystąpienie ścinania w pęknięciu. W wypadku niebezpieczeństwa pojawienia się ścinania, konieczna jest naprawa podbudowy i podłoża, aby nowe warstwy ścieralne miały w sąsiedztwie pęknięcia odpowiednie podparcie, żadna bowiem ze znanych membran przeciwspekaniowych nie jest skuteczna w zapobieżeniu przeniesienia spękań w przypadku ścinania. Na odcinkach gdzie ścinanie nie występuje (dobre podłoże i podbudowa oraz współpraca płyt), to grubość warstw asfaltowych na spękanym podłożu powinna wynosić co najmniej 20 cm, aby pęknięcie nie było odbite (bez innych zabiegów przeciwspekaniowych). Konieczna jest przy tym naprawa, uszczelnienie pęknięcia przed rozłożeniem na nim warstwy asfaltowej, aby zapobiec zjawisku koncentracji naprężeń.

4.5. Odcinek nr 5 – droga nr 8, km 68+800 do 81+900

Nawierzchnia drogi nr 8 wykonana była w latach 1970-tych. W roku 1993, po ponad 20-letnim użytkowaniu wykazywała zniszczenia wskazujące na konieczność szybkiej poprawy jej stanu technicznego. Na nawierzchni występowały głównie odkształcenia trwałe warstw bitumicznych (zwłaszcza prawego pasa ruchu, najbardziej obciążonego ciężkim ruchem) oraz

spękania odbite, przeniesione z pęknięć podbudowy z chudego betonu. Remont wykonany wiosną 1994 roku polegał na:

- sfrezowaniu i usunięciu warstwy ścieralnej prawego pasa ruchu,
- wykonaniu w miejsce usuniętej warstwy ścieralnej prawego pasa nowej warstwy wiążącej z betonu asfaltowego,
- wykonaniu nowej warstwy ścieralnej na całej jezdni (na lewym pasie ruchu nowa warstwa ścieralna została położona na starej warstwie ścieralnej),
- naprawie pęknięć poprzecznych nawierzchni poprzez usunięcie pasa warstw asfaltowych, ułożenie siatki polietylenowej i wykonanie nowych warstw asfaltowych,
- dobudowaniu utwardzonych poboczy.

W końcu lipca 1994 roku stwierdzono pojawienie się deformacji trwałych, które w kolejnych miesiącach jeszcze bardziej się pogłębiły. Przyczyną powstania kolein należy poszukiwać w stosowaniu mieszanek mineralno-asfaltowych nieodpornych na deformacje trwałe, wyjątkowo wysokiej temperaturze występującej latem 1994 roku oraz nietypowych warunkach obciążenia pasa ruchu szybkiego, który wskutek wyłączenia drugiej jezdni poddany został powolnemu ruchowi ciężkich pojazdów.

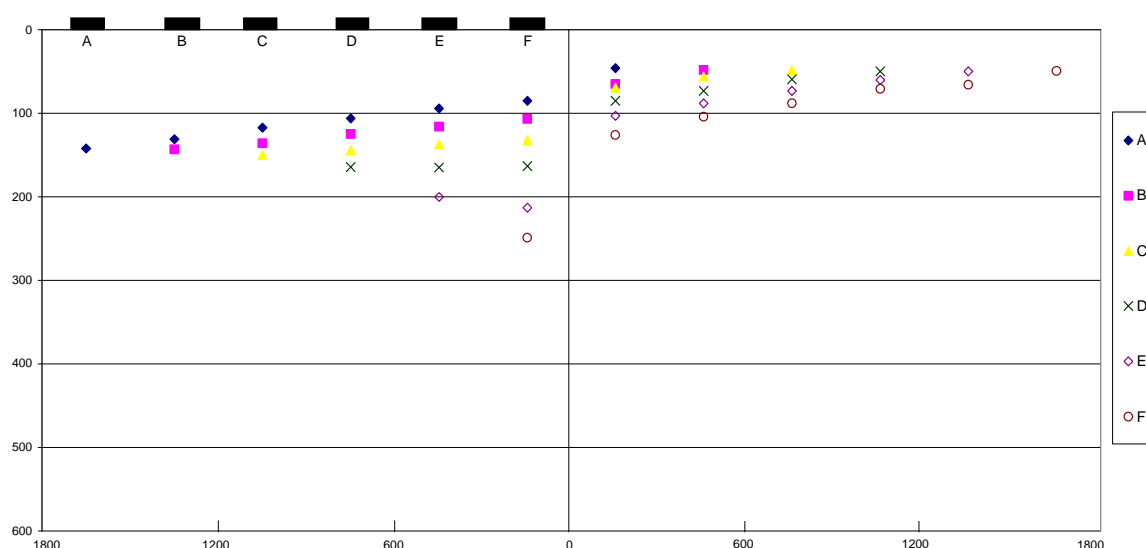
Po zimie 1995/96 na obu jezdniach pojawiły się pęknięcia poprzeczne. Według informacji DODP Łódź spękania te odtworzyły się w naprawianych siatką poliuretanową miejscach: pęknięcia przeszły przez siatkę, nie zrywając jej. Koleiny występujące na jezdni lewej, z asfaltem D70, pogłębiły się, natomiast na jezdni prawej (z asfaltem D50) deformacje się nie pojawiły.

Przeprowadzona ocena wizualna na wytypowanym do badań odcinku drogi nr 8 (km 73+453 do km 72+958, jezdnia lewa) wykazała występowanie 13 pęknięć poprzecznych na długości ok. 500 m nawierzchni. Średni indeks spękań wyniósł więc $IS = 2,6$. Na wszystkich zarejestrowanych spękaniach pomierzono ugięcia pod obciążeniem dynamicznym urządzeniem FWD. Wyniki badania oraz obliczone wskaźniki k i s zestawiono w tabelicy 6, a ugięcia dla dwóch wybranych losowo pęknięciach przedstawiono na rysunkach 11 i 12.

Tabela 6 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 5 – droga nr 8, km 68+800 do 81+900

Pikietaż	Miejsce obciążenia	Wskazania deflektometrów (geofonów), μm							Wskaźniki oceny	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	k	s
73+453	pęknięcie	302	158	124	98	76	59	48	0,69	
73+446	plyta	177	156	129	103	80	60	48		1,71
73+406	pęknięcie	276	92	81	69	60	51	45	0,50	
73+398	plyta	178	142	112	93	76	69	51		1,55
73+387	pęknięcie	283	124	101	85	70	55	48	0,61	
73+380	plyta	153	133	119	101	79	66	56		1,85
73+314	pęknięcie	244	128	103	83	67	61	45	0,69	
73+302	plyta	156	141	127	114	96	75	62		1,56
73+279	pęknięcie	249	126	104	88	71	66	49	0,67	

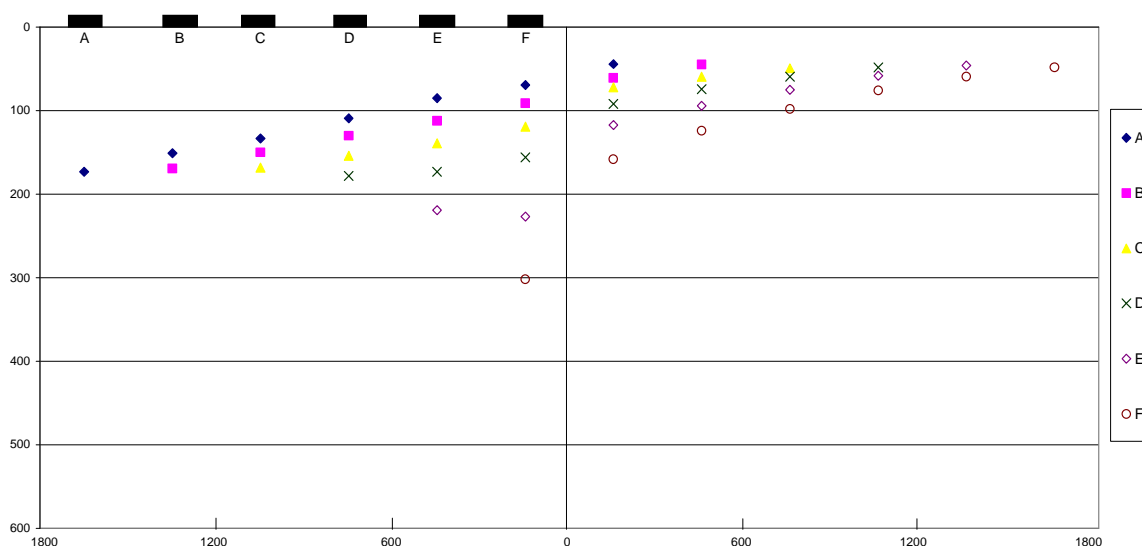
73+273	płyta	143	126	110	94	79	65	54		1,74
73+238	pęknięcie	311	117	98	83	68	63	45	0,55	
73+228	płyta	140	121	105	88	74	60	48		2,22
73+196	pęknięcie	226	128	102	85	65	59	43	0,72	
73+187	płyta	115	114	99	84	72	59	50		1,97
73+176	pęknięcie	239	145	116	91	74	58	46	0,76	
73+169	płyta	107	95	81	71	62	55	42		2,23
73+158	pęknięcie	237	89	77	67	57	50	43	0,55	
73+150	płyta	112	102	91	80	70	59	50		2,12
73+132	pęknięcie	315	114	93	76	62	50	42	0,53	
73+122	płyta	121	115	100	84	72	59	50		2,60
73+110	pęknięcie	299	128	105	87	68	55	47	0,60	
73+100	płyta	172	144	120	100	84	68	57		1,74
73+087	pęknięcie	261	91	79	70	60	58	44	0,52	
73+075	płyta	132	128	113	95	84	72	62		1,98
72+965	pęknięcie	245	150	112	86	66	52	43	0,76	
72+958	płyta	121	106	92	76	65	52	42		2,02
Średnia wartość wskaźnika współpracy płyt „k”									0,63	
Odchylenie standardowe									0,09	
Średnia wartość wskaźnika podparcia podbudowy „s”										1,95
Odchylenie standardowe										0,30



Rysunek 11. Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 5 – droga nr 8, punkt 73+280

Wyniki otrzymane w rezultacie badań ugięciomierzem FWD wskazują na podobieństwo pracy nawierzchni w obrębie pęknięć na całej długości badanego odcinka (km 73+453 do km 72+958). Wartości ugięć na płytach (centralny geofon) wynoszą ok. 150 μm , a na

krawędziach pęknięć ok. 270 μm . Wskaźniki k i s również odznaczają się małymi odchyleniami od wartości średniej. Odcinek charakteryzuje się zarówno brakiem współpracy płyt oddzielonych pęknięciem ($k < 0,66$), jak i niedostatecznym podparciem krawędzi płyt ($s > 1,4$). Potwierdzają te spostrzeżenia rysunki 4.9 i 4.10, gdzie widać wyraźny „skok” w ugięciach w obrębie spękania.



Rysunek 12 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 5 – droga nr 8, punkt 73+453

Z przeprowadzonej oceny nasuwa się generalnie jeden podstawowy wniosek: membrana przeciwspekaniowa w postaci siatki polipropylenowej ułożonej w pasach o szerokości 1 m wzdłuż pęknięcia w podbudowie, na którą położono dwie warstwy asfaltowe o łącznej grubości 10 cm, okazała się nieskuteczna. Wystąpiło zjawisko ścinania w obrębie przykrytych spękań poprzecznych. Skuteczność zabiegu byłaby prawdopodobnie większa (dłuższy czas propagacji pęknięcia), gdyby większa była grubość warstw asfaltowych.

4.6. Odcinek nr 6 – Wisłostrada w Warszawie

Na północnym fragmencie „Wisłostrady” w Warszawie, od Mostu Gdańskiego do ul. Pułkowej występowały liczne spękania charakterystyczne dla pęknięć odbitych z podbudowy związanej cementem. Jako sposób naprawy zniszczeń wybrano uszczelnienie zalewą kauczukowo-asfaltową. Prace wykonano w okresie letnim, w 1995 roku.

Opisany wyżej odcinek Wisłostrady wytypowany został jako jeden z odcinków badawczych do przeprowadzenia analizy pracy spękanej nawierzchni asfaltowej. Badania prowadzono od km 334+839 do km 335+186, na obu jezdniach (łącznie ok. 300 m bieżących nawierzchni). Pikietaż odcinka badawczego dowiązано do drogi nr 7. Przeprowadzona inwentaryzacja wykazała występowanie 11 pęknięć poprzecznych. Średni indeks spękań wyniósł więc $IS = 3,7$. Na wszystkich zarejestrowanych spękaniach pomierzono ugięcia urządzeniem FWD, a wyniki badania oraz obliczone wskaźniki k i s zestawiono w tablicy 7. Przeprowadzone

dotatkowo szczegółowe pomiary ugięcia dla dwóch spękań przedstawiono na rysunkach 13 oraz 14.

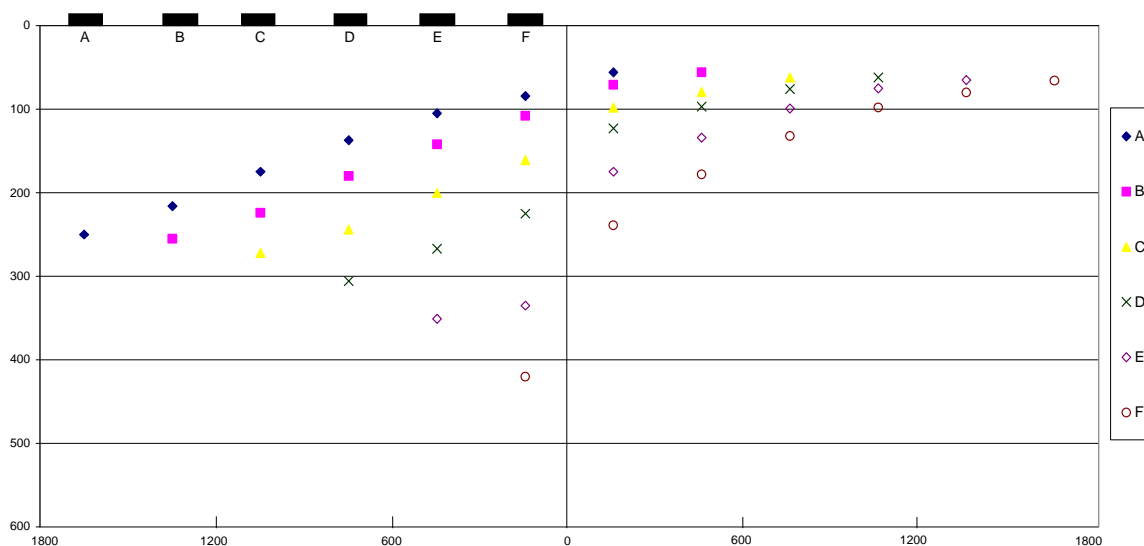
Tablica 7 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 6 – Wistostrada w Warszawie

Pikietaż	Miejsce obciążenia	Wskazania deflektometrów (geofonów), μm							Wskaźniki oceny	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	k	s
Strona prawa										
334+839	pęknięcie	346	136	112	86	68	54	43	0,56	
334+905	plyta	197	168	137	111	90	75	62		1,76
334+911	pęknięcie	445	244	178	133	99	76	63	0,71	
334+918	plyta	219	192	160	128	97	76	62		2,03
334+931	pęknięcie	557	215	156	109	83	62	57	0,56	
334+942	plyta	243	211	168	126	95	70	52		2,29
334+954	pęknięcie	420	239	178	132	98	80	66	0,73	
334+970	plyta	204	175	139	110	83	70	58		2,06
335+011	pęknięcie	529	262	191	131	93	73	62	0,66	
335+017	plyta	255	217	178	131	105	78	63		2,07
Strona lewa										
335+186	pęknięcie	345	126	88	62	48	37	32	0,54	
335+180	plyta	260	213	171	136	109	86	66		1,33
335+166	pęknięcie	317	232	130	97	73	51	43	0,85	
335+159	plyta	235	199	148	108	81	59	39		1,35
335+151	pęknięcie	346	181	125	88	63	47	39	0,69	
335+146	plyta	219	196	155	122	88	62	48		1,58
335+123	pęknięcie	340	180	119	86	61	45	36	0,69	
335+115	plyta	303	241	175	120	83	57	43		1,12
335+091	pęknięcie	312	145	115	92	78	62	50	0,63	
335+084	plyta	197	163	123	88	63	44	36		1,58
335+073	pęknięcie	379	201	142	105	75	57	43	0,69	
335+069	plyta	242	194	144	105	80	60	48		1,57
Średnia wartość wskaźnika współpracy płyt „k”									0,66	
Odchylenie standardowe									0,09	
Średnia wartość wskaźnika podparcia podbudowy „s”										1,70
Odchylenie standardowe										0,37

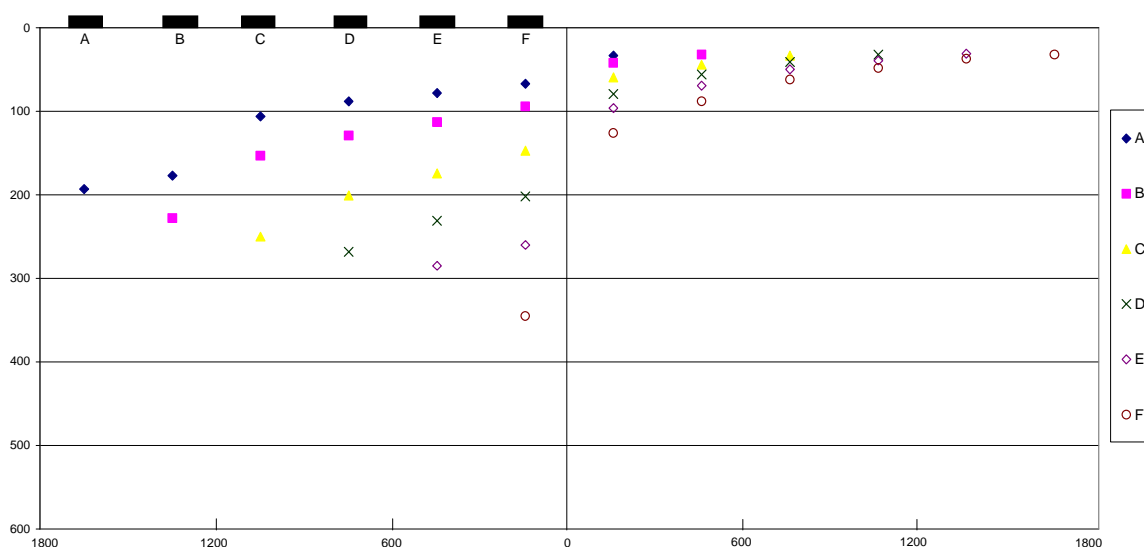
Z obserwacji wynika, że na wykonanych uszczelnieniach spękań metodą mostkowania po okresach niskich temperatur w większości przypadków uległy one odtworzeniu. Zaobserwowano również utratę szczelności spękań naprawianych metodą rozfrezowania, jeśli odległości między spękaniami były większe od 50 metrów. Przy długościach płyt poniżej 10 m naprawione spękania pozostały szczelne niezależnie od techniki uszczelnienia. Utrata

szczelności naprawianych spękań techniką pasmową objawiła się podłużnym przerwaniem nałożonego na gorąco pasma drogowej zalewy kauczukowo-asfaltowej, a przy technice rozfrezowania pęknięcia i wypełnienia go na gorąco zalewą kauczukowo-asfaltową występowało nieraz po ostrej zimie nowe pęknięcie w nawierzchni, tuż obok istniejącego uszczelnienia.

Z przeprowadzonych badań wynika, że podobnie jak na poprzednim odcinku nr 5 również na Wiskostradzie brak jest współpracy płyt oddzielonych pęknięciem oraz występuje niedostateczne podparcie krawędzi płyt ($s > 1,4$). Potwierdzają to rysunki 13 i 14, gdzie widać charakterystyczne przesunięcia lewej i prawej części wykresu. Wykonany zabieg nie przeciwdziała propagacji spękań z podbudowy związanej cementem, a jedynie w pewnej mierze zabezpiecza przed wnikaniem wody i środków odladzających do niżej położonych warstw konstrukcyjnych.



Rysunek 13 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 6 – Wiskostrada, punkt 334+954



Rysunek 4.12. Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 6 – Wisłostrada, punkt 335+186

4.7. Odcinek nr 7 – droga nr 7, Zakroczym, km 300+950 do 307 +700

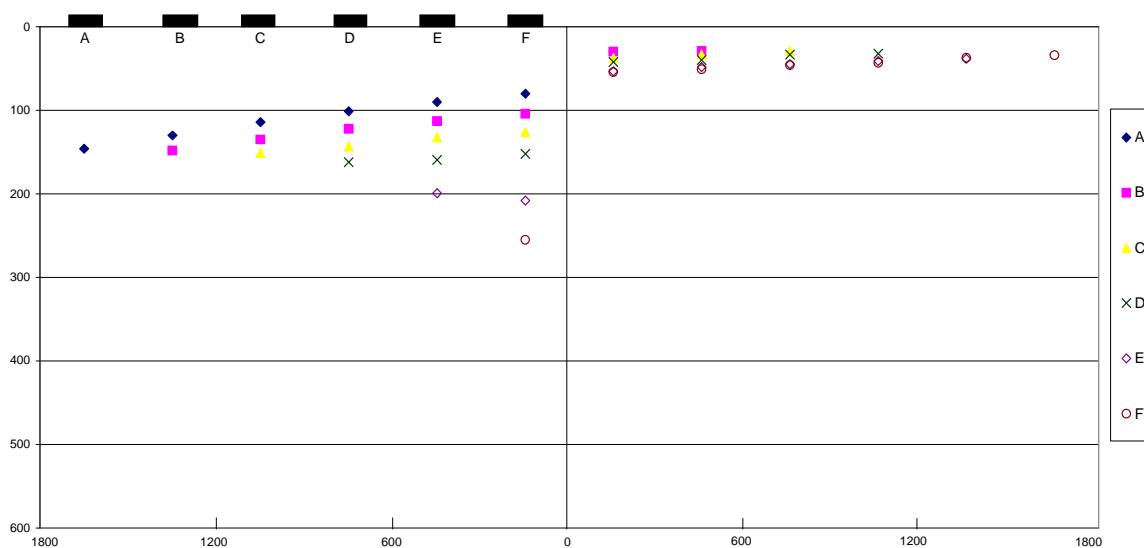
Na drodze nr 7, w okolicach Zakroczymia (km 300+950 do 307+800) występowały spękania odbite z podbudowy sztywnej. Intensywność ich występowania ($IS = 0,6$), jak również rozwartość szczelin nie były duże. Naprawy poprzez uszczelnienie wymagało ok. 300 mb spękań. Większość uszczelnień, ok. 90 % wykonano metodą poszerzenia przez frezowanie. Pozostałą część naprawy wykonano metodą pasmową.

Z naprawianego odcinka, wybrano do badań ugięć dwa pododcinki, po jednym na obu jezdniach, o łącznej długości ok. 750m. Intensywność spękań wyniosła na nich $IS = 1,2$ (zarejestrowano 9 pęknięć). Wyniki wykonanych na odcinkach pomiarów ugięć zestawiono w tablicy 8 oraz przedstawiono na rysunkach 15 i 16.

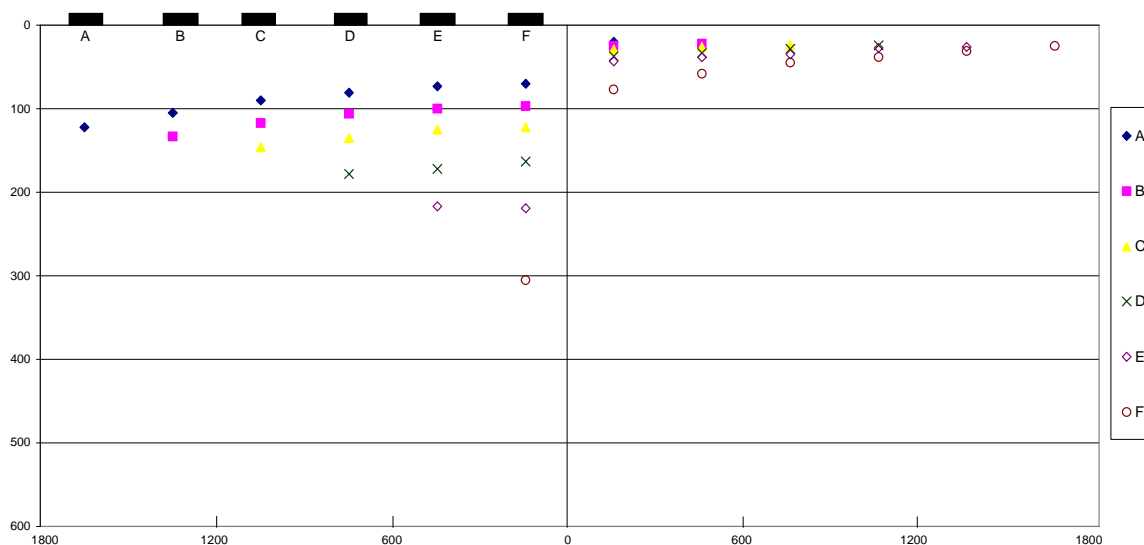
Tablica 8 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 7 – droga nr 7, Zakroczym

Pikietaż	Miejsce obciążenia	Wskazania deflektometrów (geofonów), μm							Wskaźniki oceny	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	k	s
Strona lewa										
306+337	pęknięcie	290	92	73	58	47	37	33	0,48	
306+324	plyta	119	98	81	65	53	43	36		2,44
306+316	pęknięcie	305	77	58	45	38	31	25	0,40	
306+303	plyta	101	90	81	73	65	54	40		3,02
306+243	pęknięcie	221	42	37	34	31	26	24	0,32	
306+233	plyta	115	102	84	68	57	47	39		1,92
306+202	pęknięcie	175	97	80	67	53	43	32	0,71	
306+191	plyta	96	86	77	64	52	45	37		1,82
Strona prawa										
304+460	pęknięcie	255	54	51	46	43	37	34	0,35	
304+472	plyta	139	122	104	88	74	60	50		1,83
304+542	pęknięcie	259	78	69	61	52	43	36	0,46	
304+559	plyta	147	124	97	76	61	48	35		1,76
304+769	pęknięcie	218	90	75	62	56	47	41	0,58	
304+783	plyta	87	76	67	147	52	44	39		2,51
304+806	pęknięcie	217	126	99	80	63	52	42	0,73	
304+831	plyta	121	107	84	81	61	51	43		1,79
304+842	pęknięcie	221	136	108	85	65	52	45	0,76	
304+851	plyta	122	106	87	71	60	49	40		1,81
Średnia wartość wskaźnika współpracy płyt „k”									0,53	
Odchylenie standardowe									0,17	

Średnia wartość wskaźnika podparcia podbudowy „s” Odchylenie standardowe	2,10
	0,45



Rysunek 15 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 7 – droga nr 7, punkt 304+460



Rysunek 16 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 7 – droga nr 7, punkt 306+316

Charakterystyczne dla badanego odcinka są niskie wartości ugięć pomierzonych na niespękanych częściach nawierzchni. Świadczy to o dużej sztywności podbudowy. Na całym odcinku otrzymano niekorzystne wartości wskaźników k i s . Średnia wartość współczynnika współpracy płyt w obrębie spękań wyniosła $k = 0,53$, a współczynnik podparcia płyt wyniósł $s = 2,1$. Obie obliczone wartości wskazują na złe podparcie płyt na krawędzi spękania, czyli występowanie ścinania na granicy podbudowy i warstw asfaltowych. Potwierdzają to wykresy przedstawione na rysunkach 15 i 16, gdzie widać wyraźny brak ciągłości między lewą i prawą częścią wykresu, świadczący o niedostatecznym podparciu podbudowy w obrębie spękania.

Wykonany zabieg nie ograniczył propagacji spękań z podbudowy z chudego betonu. Należy dobrać taki rodzaj naprawy, który ustabilizuje warunki podparcia krawędzi pęknięć (ograniczy ruchy pionowe na styku płyt).

4.8. Odcinek nr 8 – droga nr 2, Warszawa-Zakręt

W 1995 roku na drodze krajowej nr 2, na odcinku od Warszawy do miejscowości Zakręt występowały liczne spękania, głównie o charakterze pęknięć odbitych z podbudowy związanej cementem. Przeprowadzona inwentaryzacja tych uszkodzeń wykazała, że na długości 8 km (km 499+787 do 508+900) naprawy wymaga ponad 2000 mb pęknięć. Jako sposób naprawy zniszczeń wybrano uszczelnienie zalewą kauczukowo-asfaltową, metodą pasmową (mostkowania) lub metodą rozfrezowania pęknięć. Większość spękań poprzecznych naprawiono metodą pasmową ponieważ przeważały szczeliny o rozwartości większej niż 3 mm (1910 mb). Metodę rozfrezowania zastosowano dla ok. 160 mb pęknięć.

Badany pododcinek od km 500+146 do km 500+734 wykazywał dużą intensywność spękań. Zinwentaryzowano 48 pęknięć pełnych (na szerokości całej jezdni) oraz 12 na szerokość jednego pasa ruchu. Obliczony indeks spękań wyniósł $IS = 9$.

Wyniki przeprowadzonych pomiarów ugięć zestawiono w tabelicy 9. Nie wykonywano badań ugięć przy różnej konfiguracji ustawienia geofonów. Występujące na drodze duże natężenie ruchu, szczególnie pojazdów ciężkich zakłócało rejestrację pomiarów oraz stwarzało zagrożenie życia ekipy wykonującej badanie. Dlatego też odstąpiono od pełnej procedury pomiarowej.

Podobnie jak na poprzednich odcinkach, na których wykonywano naprawę spękań odbitych przez ich uszczelnienie zalewą kauczukowo-asfaltową, tak i na odcinku drogi nr 2 stwierdzono złe warunki podparcia płyt w obrębie spękań. Badany odcinek charakteryzował się ponadto wysokim indeksem spękań nawierzchni ($IS = 9,0$).

Zastosowana metoda nie zapobiega propagacji spękań z podbudowy, lecz dzięki niedużym długościom płyt tworzy dość szczelne zabezpieczenie nawierzchni przed przenikaniem wody w głębsze warstwy konstrukcji (duża część wykonanych napraw zachowała swoją szczelność).

Tablica 9 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 8 – droga nr 2, Warszawa-Zakręt

Pikietaż	Miejsce obciążenia	Wskazania deflektometrów (geofonów), μm							Wskaźniki oceny	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	k	s
500+146	pęknięcie	367	210	138	99	79	59	50	0,73	
500+157	płyta	194	162	137	122	100	80	63		1,89
500+187	pęknięcie	316	185	126	96	77	62	49	0,74	
500+207	płyta	221	184	130	104	84	68	53		1,43
500+312	pęknięcie	431	231	134	90	69	57	46	0,70	

500+326	plyta	270	212	159	132	104	81	64		1,60
500+362	peknięcie	294	162	117	89	74	64	47	0,71	
500+402	plyta	152	129	108	91	77	59	45		1,93
500+425	peknięcie	315	204	143	101	79	61	46	0,79	
500+449	plyta	196	162	119	95	78	64	52		1,61
500+508	peknięcie	292	145	98	76	66	54	43	0,66	
500+524	plyta	109	107	90	89	76	69	57		2,68
500+606	peknięcie	338	223	150	111	81	61	44	0,80	
500+641	plyta	182	160	132	109	84	66	53		1,86
500+689	peknięcie	380	188	137	108	89	68	51	0,66	
500+703	plyta	117	106	97	77	66	53	42		3,25
500+718	peknięcie	476	175	131	104	79	60	46	0,54	
500+734	plyta	136	119	105	89	77	63	48		3,50
Średnia wartość wskaźnika współpracy płyt „k”									0,70	
Odchylenie standardowe									0,08	
Średnia wartość wskaźnika podparcia podbudowy „s”										2,19
Odchylenie standardowe										0,76

4.9. Odcinek nr 9 – droga nr 7, obejście Elbląga

Droga nr 7 na obejściu Elbląga eksploatowana jest już ponad 50 lat. Nawierzchnia betonowa z płyt zbrojonych i niezbrojonych o różnej grubości, wykonana została w latach 1936-38. Duże zniszczenia nawierzchni oraz uciążliwość dla ruchu samochodowego spowodowało pilną potrzebę wykonania naprawy nawierzchni. Zdecydowano się na remont polegający na odprężeniu płyt betonowych i wykonanie warstw bitumicznych.

Prace naprawcze wykonane zostały w lipcu i sierpniu 1992 roku. Jezdnię szerokości 2 x 375 cm poszerzały opaski szerokości 100 cm każda. Nawierzchnię opaski stanowiła 3 cm warstwa bitumiczna na 9 – 12 cm warstwie betonowej. Pod względem nośności, nawierzchnię jezdni cechowała 3 krotnie wyższa nośność w porównaniu do opasek. Szczeliny między płytami nawierzchni jezdni, a płytami betonowymi opasek wypełnione były bitumiczną masą uszczelniającą. Warstwa bitumiczna była spękana z powodu niskiej nośności płyt betonowych opasek, a beton w strefie przypowierzchniowej stracił swą pierwotną zwartą strukturę pod wpływem destrukcyjnego działania roztworu wody i środków chemicznych, stosowanych przed śliskością zimową. W związku z tym warstwę bitumiczną oraz zwietrzały beton trzeba było usunąć, a ubytki uzupełnić.

Nawierzchnia betonowa została odprężona przez firmę niemiecką ABS – Asphalt – Beton – Service z Hamburga za pomocą specjalnego urządzenia samojezdnego, wyposażonego w młot o wadze 2 ton. Powierzchnie przy brzegach płyt łatwiej ulegały odprężeniu niż powierzchnie środkowe. Również osiadanie płyt pod wpływem uderzeń młota było zauważalnie większe dla

stref brzegowych. Świadczyć to może o osłabionym podłożu w pobliżu szczelin dylatacyjnych. Po połamaniu, płyty dogęszczono walcem stalowym.

Na wyrównanym poboczu i odprężonej warstwie betonowej wykonano warstwę wiążącą z gruboziarnistej mieszanki mineralno-bitumicznej grubości ok. 8 cm. Warstwę ścieralną grubości 4 cm wykonano z mieszanki SMA 0/11 z zastosowaniem plastomeru.

Po latach eksploatacji, na nawierzchni badanego odcinka stwierdzono występowanie spękań, które odtworzyły się nad pęknięciami podbudowy betonowej. Na całym, ponad siedmio-kilometrowym odcinku wykonano dokładną inwentaryzację pęknięć poprzecznych, a jej wyniki zestawiono w tablicy 10.

Tablica 10 *Inwentaryzacja spękań poprzecznych występujących na odcinku nr 9*

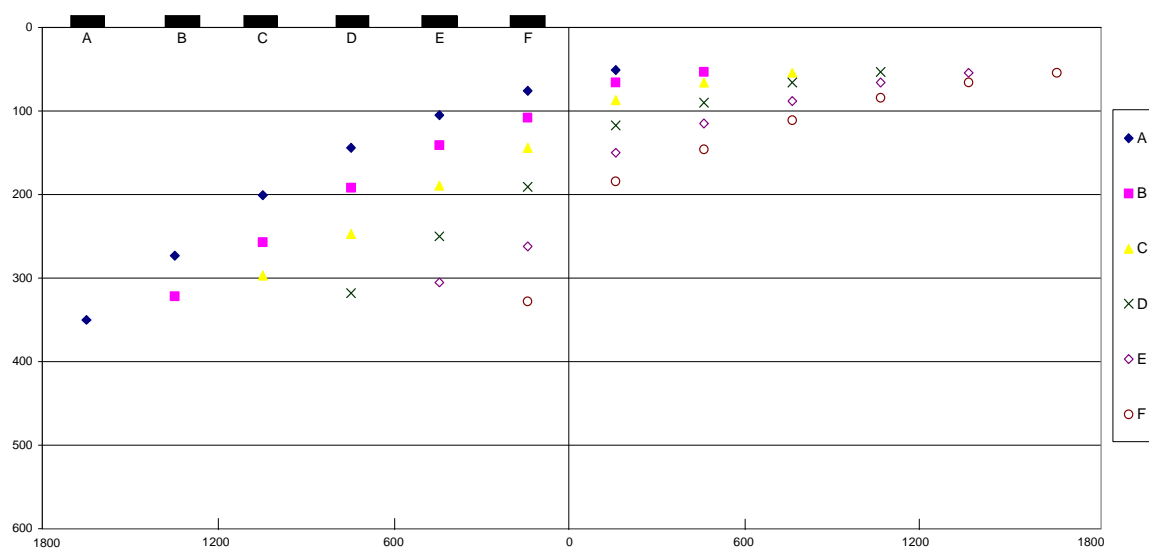
Kilometr	Wartość IS	
	pas prawy	pas lewy
55+630 ÷ 56+000	5,0	5,0
56+000 ÷ 57+000	1,0	1,0
57+000 ÷ 58+000	1,5	1,0
58+000 ÷ 59+000	2,5	2,5
59+000 ÷ 60+000	4,5	3,0
60+000 ÷ 61+000	0,5	3,0
61+000 ÷ 62+000	2,5	6,0
62+000 ÷ 62+985	2,5	2,5
ŚREDNI IS	2,5	3,0

Na 10 pęknięciach (od km 62+027 do km 60+690) przeprowadzono pomiary ugięć nawierzchni w celu określenia współczynnika warunków podparcia płyt *s* oraz współczynnika współpracy sąsiednich płyt oddzielonych pęknięciem *k*. Wyniki pomiarów zestawiono w tablicy 11 oraz na rysunkach 17 i 18.

Tablica 11 *Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 9 – droga nr 7, obejście Elbląga*

Pikietaż	Miejsce obciążenia	Wskazania deflektometrów (geofonów), μm							Wskaźniki oceny	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	<i>k</i>	<i>s</i>
60+027	pęknięcie	407	259	195	142	104	75	59	0,78	
60+033	płyta	297	237	177	136	108	85	66		1,37
60+051	pęknięcie	328	184	146	111	84	66	54	0,72	
60+074	płyta	241	204	159	121	92	71	58		1,36
60+159	pęknięcie	329	224	157	123	98	71	56	0,81	
60+221	płyta	319	254	179	129	95	72	55		1,03
60+231	pęknięcie	338	189	142	107	85	67	54	0,72	
60+241	płyta	370	281	205	147	104	75	60		0,91
60+304	pęknięcie	368	210	154	116	94	76	62	0,73	

60+315	plyta	315	252	184	139	108	81	64		1,17
60+503	pęknięcie	327	242	178	130	98	75	59	0,85	
60+515	plyta	435	323	206	139	105	82	65		0,75
60+541	pęknięcie	364	246	172	119	87	67	56	0,81	
60+544	plyta	276	211	153	119	94	74	59		1,32
60+611	pęknięcie	379	271	164	116	90	68	59	0,83	
60+620	plyta	321	263	200	148	113	82	65		1,18
60+632	pęknięcie	296	196	152	121	97	76	62	0,80	
60+640	plyta	274	230	180	136	105	80	64		1,08
60+683	pęknięcie	272	197	152	117	90	70	58	0,84	
60+690	plyta	219	188	151	118	94	74	61		1,24
Średnia wartość wskaźnika współpracy płyt „k”									0,79	
Odchylenie standardowe									0,05	
Średnia wartość wskaźnika podparcia podbudowy „s”										1,14
Odchylenie standardowe										0,20

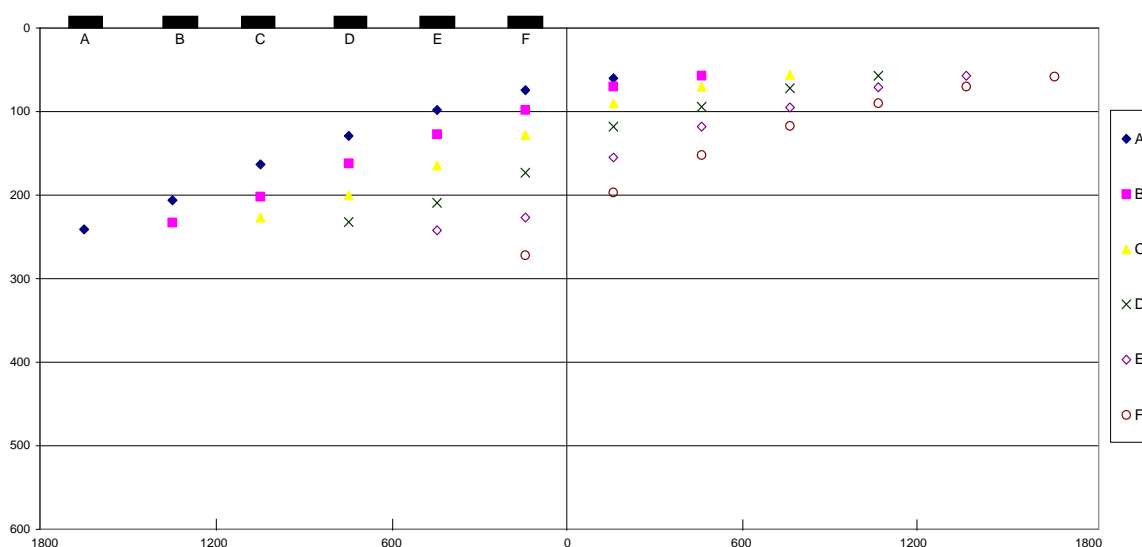


Rysunek 17 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 9 – droga nr 7, punkt 60+050

Obliczony, na podstawie inwentaryzacji indeks spękań jest na średnim poziomie, zarówno na prawym jak i na lewym pasie ruchu. Wyznaczone, średnie wskaźniki $k = 0,79$ i $s = 1,14$, świadczą o dobrych warunkach podparcia płyt w rejonie pęknięć. Małe odchylenia standardowe tych wskaźników wskazują na dużą jednorodność konstrukcji i podobne warunki pracy nawierzchni w obrębie spękań. Zamieszczone na rysunkach 17 i 18 wykresy są charakterystyczne dla nawierzchni o konstrukcji podatnej. Powodem tego jest gęste połamanie płyt betonowych w czasie wykonywanego w 1992 roku remontu.

Wyniki pomiarów i oceny wizualnej wskazują na skuteczność przeprowadzonej naprawy. Występowanie nielicznych spękań odbitych (2,5 do 3 na 100m długości nawierzchni)

świadczy o prawidłowym wyborze technologii remontu. Należy również pamiętać, że grubość warstw asfaltowych była stosunkowo mała (12 cm), co przyspieszyło proces propagacji spękań z podbudowy na warstwy wierzchnie. Występujące na badanej drodze spękania odbite należy uszczelnić przed przenikaniem wody do konstrukcji.



Rysunek 18 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 9 – droga nr 7, punkt 60+683

4.10. Odcinek nr 10 – droga nr 22, obejście m. Zblewo

Pod koniec lat 80-tych, eksploatowana od ponad 40 lat, betonowa nawierzchnia drogi nr 22 wykazywała liczne uszkodzenia, głównie w postaci złuszczeń i płytkich ubytków oraz uszkodzenia w obrębie szczelin. Sporadycznie występowały również spękania poprzeczne. W roku 1989 podjęto decyzję o odnowie wybranego odcinka drogi, długości ok. 1,1 km w rejonie miejscowości Zblewo (km 292+800 do 293+900). Założono, że doświadczenia zdobyte w czasie remontu będą mogły być następnie wykorzystane przy naprawie kolejnych odcinków nawierzchni drogi nr 22. Remontowany odcinek został podzielony na trzy sekcje, różniące się przyjętymi rozwiązaniami technologicznymi przeciwdziałania spękanom odbitym. Nawierzchnię o szerokości 10 metrów stanowiły płyty z betonu cementowego, dwuwarstwowe, niezbrojone ze szczelinami niedyblowanymi.

Stan nawierzchni oceniono wiosną 1989 roku i stwierdzono występowanie licznych uszkodzeń powierzchniowych i strukturalnych, takich jak: złuszczenia powierzchni płyt, brak wypełnienia szczelin, pęknięcia poprzeczne, uskoki w obrębie szczelin i pęknięć. Ponieważ podstawowym rodzajem uszkodzeń były uszkodzenia powierzchniowe przyjęto jako założenie minimalizację grubości nakładki asfaltowej. Zdecydowano się na ułożenie pojedynczej warstwy betonu asfaltowego grubości 4 cm, na warstwie wyrównawczej o średniej grubości 3 cm. Wykonano 3 sekcje o następującej technologii:

- sekcja 1 – nakładka ze średnioziarnistego betonu asfaltowego, niemodyfikowanego, brak warstwy pośredniej w obrębie szczelin,

- sekcja 2 – nakładka ze średnioziarnistego betonu asfaltowego, modyfikowanego lateksem, brak warstwy pośredniej,
- sekcja 3 – nakładka ze średnioziarnistego betonu asfaltowego, modyfikowanego lateksem, warstwa pośrednia z geowłókniny w obrębie szczelin.

Przed ułożeniem nakładki wykonano prace przygotowawcze, które objęły: oczyszczenie płyt i szczelin, wypełnienie szczelin, wyrównanie uskoków płyt, rozłożenie i przyklejenie włókniny nad szczelinami i pęknięciami, skropienie nawierzchni, ułożenie warstwy wyrównawczej. Zastosowano włókninę grubości 2,5 mm, wykonaną z propylenu. Do wykonania nakładki użyto betonu asfaltowego średnioziarnistego wg PN-74/S-96022.

W okresie od 1990 do 1997 roku prowadzono na omawianym odcinku nawierzchni obserwacje stanu spękań. Pozwoliły one na dokonanie następujących spostrzeżeń:

- w nagorszym stanie był odcinek 1 bez modyfikacji asfaltu lateksem i bez włókniny nad spękaniami i szczelinami,
- modyfikacja asfaltu lateksem dała niewielką poprawę odporności na odwzorowanie spękań odbitych,
- dużo lepszy rezultat dało zastosowanie włókniny jako warstwy pośredniej w sekcji 3,

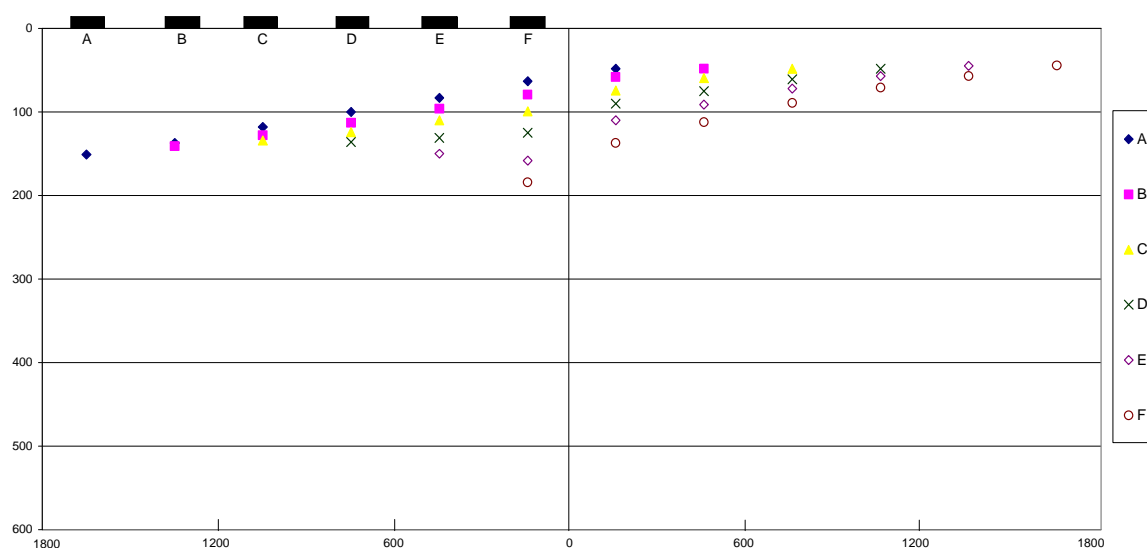
Zaobserwowano również, że zastosowanie na krótkim odcinku sekcji 3, włókniny innej niż przewidywał projekt, o grubości ok. 5 mm, spowodowało wystąpienie już po pierwszej zimie spękań wzdłuż krawędzi ułożonej włókniny. Z upływem czasu pęknięcia poszerzały się, prowadząc do powstania wybojów. Przyczyny należy upatrywać w niepełnym nasyceniu włókniny asfaltem, przez co powstała słaba warstwa, która pod wpływem ruchu się ugiwała, co doprowadziło do powstania spękań. Przykład ten dowodzi, jak istotny jest właściwy dobór parametrów włókniny oraz jej pełne nasycenie asfaltem.

Wykonana w ramach niniejszej pracy ocena wizualna pozwoliła na stwierdzenie występowania na badanym odcinku 183 pęknięć poprzecznych, z czego 96 stanowiły spękania przez całą szerokość drogi, 74 – na szerokości jednego pasa ruchu oraz 13 pęknięć przez połowę pasa. Średni indeks spękań wyniósł dla ocenianego odcinka $IS = 12,6$, co świadczy o bardzo dużej intensywności występujących spękań poprzecznych. W każdej z trzech sekcji występowała podobna liczba pęknięć poprzecznych, a indeks spękań dla każdego obserwowanego 100-metrowego odcinka nawierzchni wynosił od 10 do 16.

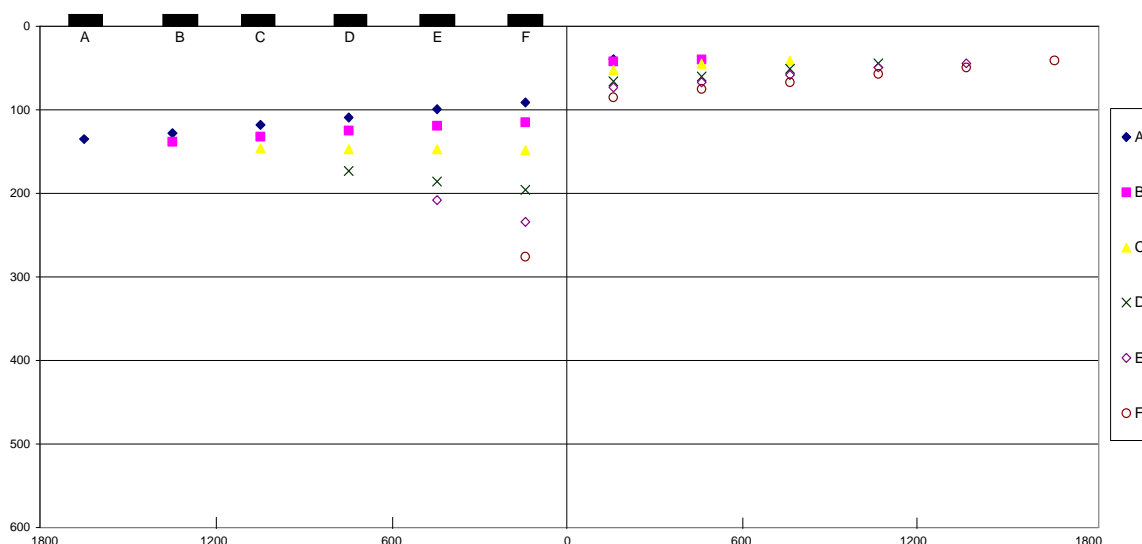
Na 11 pęknięciach (od km 292+810 do km 293+878) przeprowadzono pomiary ugięć nawierzchni w celu określenia współczynnika warunków podparcia płyt s oraz współczynnika współpracy sąsiednich płyt oddzielonych pęknięciem k . Wyniki pomiarów zestawiono w tablicy 12 oraz na rysunkach 19 i 20.

Tablica 12 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 10 – droga nr 22

Pikietaż	Miejsce obciążenia	Wskaźania deflektometrów (geofonów), μm							Wskaźniki oceny	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	k	s
292+810	pęknięcie	184	113	92	74	56	44	31	0,76	
292+819	plyta	135	113	89	72	61	48	37		1,36
292+899	pęknięcie	184	137	112	89	71	57	44	0,85	
292+911	plyta	118	110	94	79	66	52	42		1,56
293+011	pęknięcie	229	169	118	80	62	48	38	0,85	
293+014	plyta	123	111	101	87	75	59	49		1,86
293+101	pęknięcie	256	138	113	96	76	61	49	0,70	
293+104	plyta	141	133	119	104	89	73	60		1,82
293+200	pęknięcie	275	126	103	83	66	54	45	0,63	
293+201	plyta	147	129	108	89	78	61	47		1,87
293+319	pęknięcie	296	67	60	54	49	43	40	0,37	
293+322	plyta	129	119	111	99	88	72	61		2,29
293+400	pęknięcie	276	85	75	67	57	49	41	0,47	
293+403	plyta	144	134	123	110	95	79	64		1,92
293+493	pęknięcie	230	248	87	76	64	52	43	1,04	
293+496	plyta	143	134	117	100	88	72	59		1,61
293+719	pęknięcie	276	85	74	63	55	46	38	0,47	
293+722	plyta	135	126	113	95	81	65	52		2,04
Średnia wartość wskaźnika współpracy płyt „k”									0,62	
Odchylenie standardowe									0,24	
Średnia wartość wskaźnika podparcia podbudowy „s”										1,98
Odchylenie standardowe										0,62



Rysunek 19 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 10 – droga nr 22, punkt 292+899



Rysunek 20 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 10 – droga nr 22, punkt 293+400

Stan pracy nawierzchni w obrębie spękań poprzecznych jest bardzo zmienny. Występują miejsca o dobrej współpracy między sąsiadującymi ze sobą płytami (np. punkt 292+899, rys. 19), jak i wykazujące jej brak (punkt 293+400, rys. 20). Badania ugięć ugięciomierzem FWD wskazują również na niedostateczne podparcie podbudowy w obrębie spękań (średnia wartość $s = 1,98$). W tych warunkach pracy nawierzchni i jednocześnie przy małej grubości warstw asfaltowych (8 cm) żadna z zastosowanych na poszczególnych sekcjach metod naprawy nie może być skuteczna. Przy obecnym stanie nawierzchni najskuteczniejszym sposobem zapobieżenia występowaniu spękań jest przebudowa podbudowy sztywnej na podatną.

4.11. Odcinek nr 11 – droga nr 218, Oliwa-Chwaszczyno

W 1994 roku na odcinku drogi nr 218, w obrębie węzła „Wysoka” na obwodnicy Trójmiasta wykonywano nawierzchnię o konstrukcji półsztywnej, której podbudowę stanowiło kruszywo naturalne stabilizowane cementem. Na przełomie lipca i sierpnia, w okresie intensywnych upałów, wystąpiły na podbudowie spękania poprzeczne. Stwierdzono, że mają charakter skurczowy i powstały głównie w wyniku skurczu termicznego, spowodowanego dużymi zmianami dobowymi temperatury.

Dyrekcja Okręgowa Dróg Publicznych w Gdańsku podjęła decyzję potraktowania omawianego odcinka jako doświadczalnego, na którym zostaną wypróbowane różne rozwiązania technologiczne wykonania warstw pośrednich i dokonana zostanie ocena ich skuteczności w przeciwdziałaniu spękaniami odbitym z podbudowy sztywnej. Odcinek doświadczalny składa się z czterech części o długości ok. 100 m każdy. Na trzech spośród nich zastosowano, w obrębie występujących spękań podbudowy, następujące techniki przeciwdziałania spękaniami odbitym:

- włóknina ułożona na warstwie bitumu,
- siatka o sztywnych węzłach,
- warstwa „SAMI”.

Czwarty odcinek potraktowano jako porównawczy, bez warstwy pośredniej.

Przyjęte rozwiązania technologiczne zastosowano w pasach wzdłuż istniejących spękań podbudowy, o szerokości:

- ok. 0,5 do 0,7 m w przypadku włókniny i „SAMI”,
- ok. 1 m w przypadku siatki.

Przed wykonaniem odcinka doświadczalnego wykonano inwentaryzację spękań warstwy stabilizacji cementem i stwierdzono, że ich liczba w poszczególnych sekcjach jest zbliżona i wynosi ok. 10 przez całą szerokość podbudowy. Przeprowadzono również pomiary ugięć nawierzchni na odcinku doświadczalnym, bezpośrednio na warstwie podbudowy. Ugięcia w miejscach spękań podbudowy mierzono za pomocą dwóch ugięciomierzy Benkelmana, ustawianych tak by możliwy był jednoczesny pomiar na krawędzi obciążonej i nieobciążonej. Wpływ spękań na nośność i trwałość nawierzchni oceniono na podstawie:

- współczynnika współpracy w obrębie spękania,
- różnicy ugięć obciążonej i nieobciążonej krawędzi pęknięcia,
- stosunku ugięcia w obrębie pęknięcia i w środku odcinka między pęknięciami.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że współpraca płyt, stykających się w obrębie pęknięcia w nowej podbudowie jest bardzo zróżnicowana. Występowały zarówno przypadki pełnej jak również całkowitego braku współpracy. W 80% przypadków współczynnik współpracy k był mniejszy od 0,66, a w 50% mniejszy od 0,50. Ugięcia podbudowy w środku rozpiętości płyt były przeciętnie trzykrotnie mniejsze niż na krawędzi. Świadczy to o istotnym obniżeniu nośności podbudowy w obrębie spękania.

Podbudowa odcinka doświadczalnego, wraz z warstwami pośrednimi została następnie przykryta dwoma warstwami asfaltowymi. Konstrukcja nawierzchni na ocenianym odcinku jest następująca:

- warstwa ścieralna z betonu asfaltowego grubości 5 cm,
- warstwa wiążąca z betonu asfaltowego grubości 7 cm,
- warstwa podbudowy z kruszywa naturalnego stabilizowanego cementem grubości 22 cm,
- podbudowa pomocnicza z piasku grubości 50 cm.

W kolejnych latach eksploatacji nawierzchni dokonywano oceny stanu warstw asfaltowych pod względem liczby spękań poprzecznych. Po roku nie stwierdzono spękań, natomiast wiosną 1996 roku zarejestrowano cztery pęknięcia, po jednym w każdej sekcji odcinka doświadczalnego.

Po pięciu latach eksploatacji nawierzchni stwierdzono występowanie 9 pęknięć na odcinku badawczym. Spękania te były dość równomiernie rozłożone na długości ocenianego odcinka. Indeks spękań na każdej sekcji wyniósł $IS = 2$. Na wszystkich zarejestrowanych spękaniach pomierzono ugięcia urządzeniem FWD, a wyniki badania oraz obliczone wskaźniki k i s zestawiono w tablicy 13. Przeprowadzone dodatkowo szczegółowe pomiary ugięcia dla dwóch spękań przedstawiono na rysunkach 21 i 22.

Tablica 13 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 11 – droga nr 218

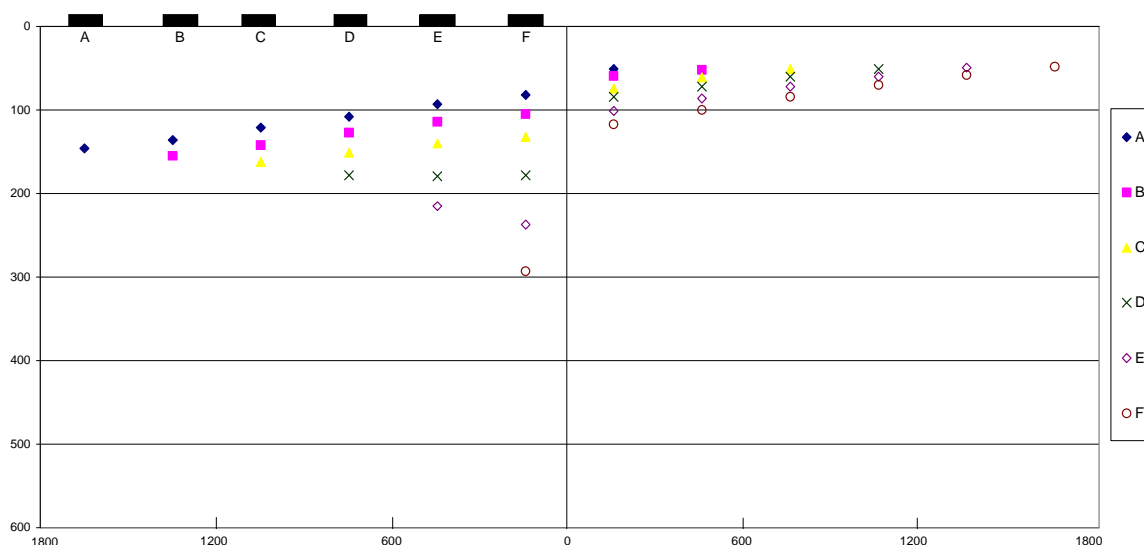
Pikietaż	Miejsce obciążenia	Wskazania deflektometrów (geofonów), μm							Wskaźniki oceny	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	k	s
0+456	pęknięcie	285	149	115	91	74	60	50	0,69	
0+461	plyta	234	201	157	121	88	67	57		1,22
0+517	pęknięcie	293	117	100	84	70	58	48	0,57	
0+522	plyta	140	128	114	101	86	73	62		2,09
0+571	pęknięcie	266	116	93	76	63	50	40	0,61	
0+576	plyta	189	161	124	94	75	54	42		1,41
0+628	pęknięcie	396	178	124	90	68	54	44	0,62	
0+634	plyta	132	119	106	94	78	65	54		3,00
0+701	pęknięcie	257	132	110	91	73	58	45	0,68	
0+704	plyta	162	138	117	96	78	61	50		1,59
0+707	pęknięcie	124	115	101	89	75	63	51	0,96	
0+710	plyta	129	126	119	111	92	75	62		0,96
0+731	pęknięcie	248	128	111	93	76	61	51	0,68	
0+735	plyta	122	119	115	105	89	75	65		2,03
0+807	pęknięcie	232	119	96	76	60	48	41	0,68	
0+812	plyta	119	107	95	80	65	53	40		1,95
0+830	pęknięcie	167	115	99	83	67	54	45	0,82	
0+835	plyta	139	121	106	91	74	60	49		1,20
Średnia wartość wskaźnika współpracy płyt „k”									0,70	
Odchylenie standardowe									0,12	
Średnia wartość wskaźnika podparcia podbudowy „s”										1,72
Odchylenie standardowe										0,63

W wyniku przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że współpraca płyt, stykających się w obrębie pęknięć jest zróżnicowana. Obok miejsc charakteryzujących się pełną współpracą płyt występują miejsca o obniżonej współpracy lub nawet o jej braku.

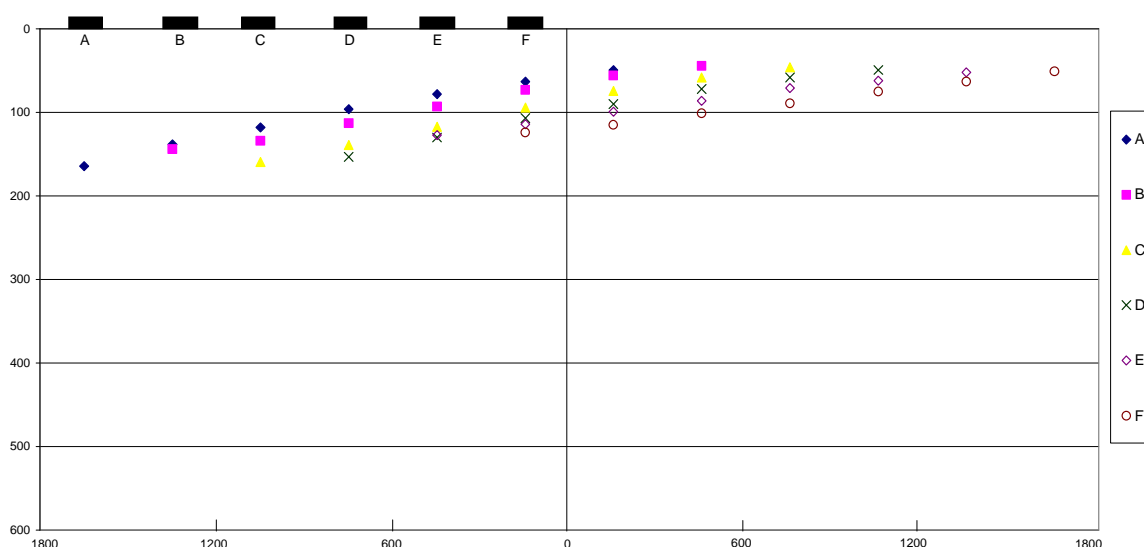
Rozkład pęknięć na długości odcinka był równomierny. Szczególnym przypadkiem jest pęknięcie w punkcie 0+706 (rysunek 22), charakteryzujące się bardzo dobrymi parametrami k i s. Znajduje się ono blisko innego pęknięcia, oddalonego o ok. 6 m, w obrębie którego stwierdzono obniżenie nośności. Spękanie w punkcie 0+706 jest prawdopodobnie nowe.

Generalnie można uznać, że wszystkie trzy zastosowane techniki są skuteczne. Po pięciu latach eksploatacji tylko 20% spękań przeszło z podbudowy sztywnej na nawierzchnię. Trudno jest wskazać, które z technik jest efektywniejsze. Zachowanie nawierzchni i liczba spękań na poszczególnych częściach odcinka doświadczalnego są zbliżone. Nie można

wykluczyć jednak, że w dłuższym okresie czasu niektóre z zastosowanych rozwiązań wykazują wyższość.



Rysunek 21 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 11 – droga nr 218, punkt 0+516



Rysunek 22 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 11 – droga nr 218, punkt 0+706

4.12. Odcinek nr 12 - Droga nr 631

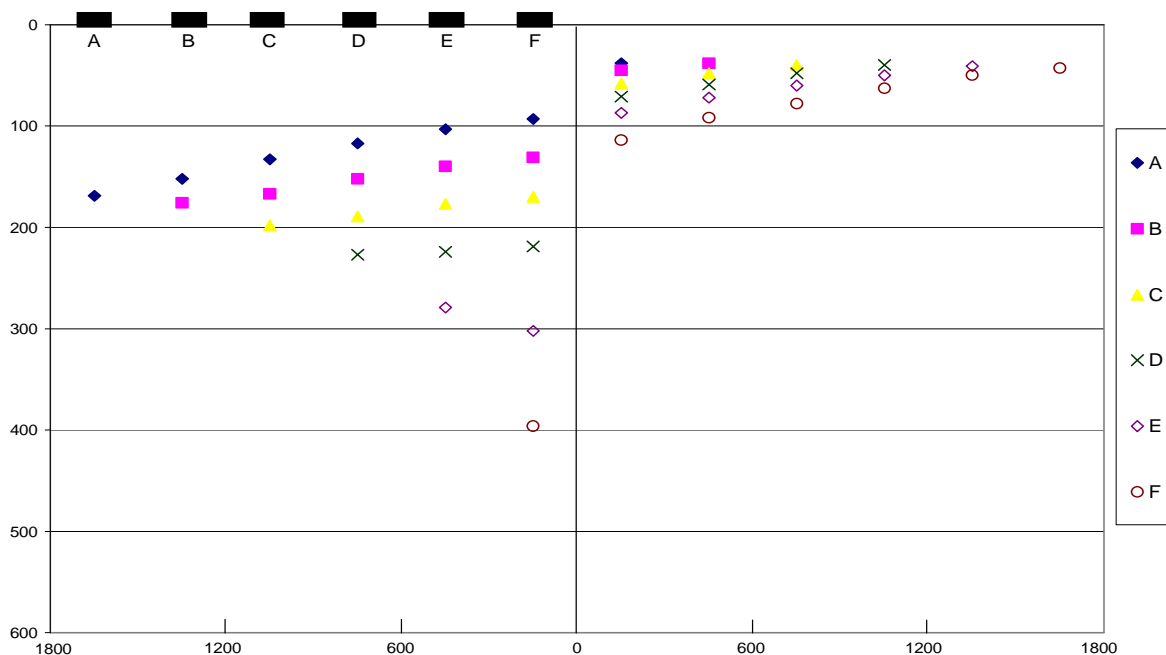
Oceniany odcinek drogi wojewódzkiej nr 631 jest bardzo spękany. Podczas inwentaryzacji spękań przeprowadzonej w ramach pracy, na części odcinka, na której wykonywano badania ugięć stwierdzono występowanie 13 pęknięć na całą szerokość jezdni. Obliczony indeks spękań wyniósł $IS = 5$.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że współpraca płyt, stykających się w obrębie pęknięć jest zróżnicowana. Obok miejsc charakteryzujących się pełną współpracą płyt występują miejsca o obniżonej współpracy lub nawet o jej braku. Przypadek niedostatecznej

współpracy płyt ($k < 0,66$) przedstawiono na rys. 23. Wysokie wartości wsp. s wskazują na złe podparcie płyt w obrębie pęknięcia poprzecznego (średnia wartość wsp. $k = 1,70$).

Tablica 14 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 12 – droga nr 631

Pikietaż	Miejsce obciążenia	Wskazania deflektometrów (geofonów), μm							Wskaźniki oceny	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	k	s
29+435	pęknięcie	396	114	92	78	63	50	43	0,45	
29+493	plyta	183	161	134	110	88	71	57		2,16
29+478	pęknięcie	388	224	157	115	86	67	54	0,73	
29+493	plyta	183	161	134	110	88	71	57		2,12
29+499	pęknięcie	442	147	118	92	72	56	46	0,50	
29+493	plyta	183	161	134	110	88	71	57		2,42
29+522	pęknięcie	399	187	136	104	78	59	47	0,64	
29+598	plyta	262	223	162	115	82	60	46		1,52
29+580	pęknięcie	486	243	172	123	88	65	49	0,67	
29+598	plyta	262	223	162	115	82	60	46		1,85
29+604	pęknięcie	452	289	180	118	81	58	45	0,78	
29+598	plyta	262	223	162	115	82	60	46		1,73
29+616	pęknięcie	509	282	172	109	77	61	49	0,71	
29+598	plyta	256	223	162	115	82	60	46		1,99
29+662	pęknięcie	461	238	166	119	84	64	50	0,68	
29+598	plyta	313	223	162	115	82	60	46		1,47
29+679	pęknięcie	813	519	250	142	92	62	50	0,78	
29+598	plyta	466	223	162	115	82	60	46		1,74
29+699	pęknięcie	434	228	158	108	74	54	41	0,69	
29+691	plyta	466	390	217	142	91	61	47		0,93
29+716	pęknięcie	541	315	196	145	109	84	65	0,74	
29+691	plyta	733	365	184	132	94	68	51		0,74
Średnia wartość wskaźnika współpracy płyt „k”									0,67	
Odchylenie standardowe									0,11	
Średnia wartość wskaźnika podparcia podbudowy „s”										1,70
Odchylenie standardowe										0,51

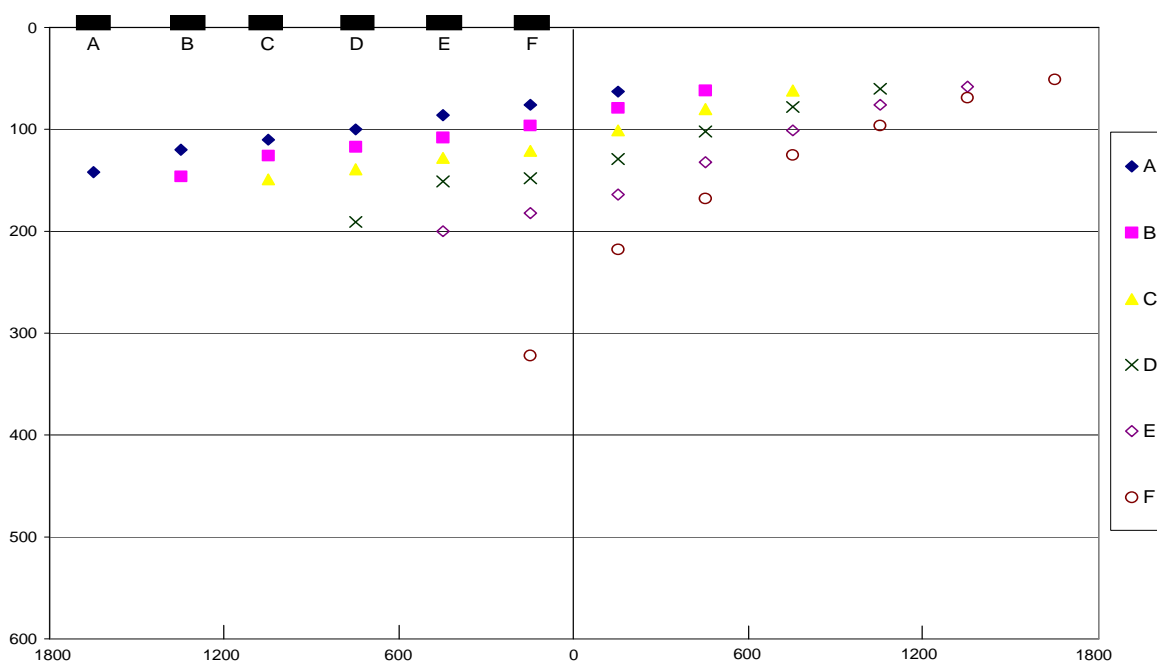


Rysunek 23 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 12 – droga nr 631, punkt 29+435

4.13. Odcinek nr 13 – Ulica Bogatyńska w Warszawie

Oceniany odcinek ul. Bogatyńskiej jest bardzo spękany. Na części ulicy, na której przeprowadzono pomiary FWD stwierdzono występowanie 9 pęknięć na całą szerokość jezdni. Obliczony indeks spękań wyniósł $IS = 4$.

Pomiary ugięć na spękaniach oraz na płytach wykazały bardzo dobrą współpracę płyt w obrębie pęknięć ($k = 0,89$) co pozwala na zastosowanie w naprawie nawierzchni membrany przeciwspekaniowej. Jednocześnie jednak brak jest odpowiedniego podparcia płyt pod pęknięciami ($s = 1,82$). Należy uwzględnić to podczas projektowania wzmocnienia nawierzchni.



Rysunek 24 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 13 – ul. Bogatyńska, punkt 0+104

Tablica 15 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 13 – ul. Bogatyńska

Pikietaż	Miejsce obciążenia	Wskazania deflektometrów (geofonów), μm							Wskaźniki oceny	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	k	s
0+006	pęknięcie	356	261	194	142	106	76	61	0,85	
0+031	plyta	161	132	111	91	73	59	49		2,21
0+019	pęknięcie	281	231	178	140	111	86	67	0,90	
0+031	plyta	161	132	111	91	73	59	49		1,75
0+023	pęknięcie	421	341	221	141	95	68	53	0,90	
0+031	plyta	161	132	111	91	73	59	49		2,61
0+044	pęknięcie	295	223	156	113	81	61	48	0,86	
0+031	plyta	161	132	111	91	73	59	49		1,83
0+143	pęknięcie	322	218	168	125	96	69	51	0,81	
0+176	plyta	419	340	271	215	172	133	100		0,77
0+172	pęknięcie	429	340	246	183	135	94	64	0,88	
0+176	plyta	419	340	271	215	172	133	100		1,02
0+182	pęknięcie	393	324	244	179	125	89	64	0,90	
0+222	plyta	145	126	108	91	74	60	49		2,71
0+208	pęknięcie	247	213	168	134	103	79	61	0,93	
0+222	plyta	145	126	108	91	74	60	49		1,70
0+230	pęknięcie	254	250	168	124	94	70	54	0,99	
0+222	plyta	145	126	108	91	74	60	49		1,75
Średnia wartość wskaźnika współpracy płyt „k”									0,89	
Odchylenie standardowe									0,05	
Średnia wartość wskaźnika podparcia podbudowy „s”										1,82
Odchylenie standardowe										0,65

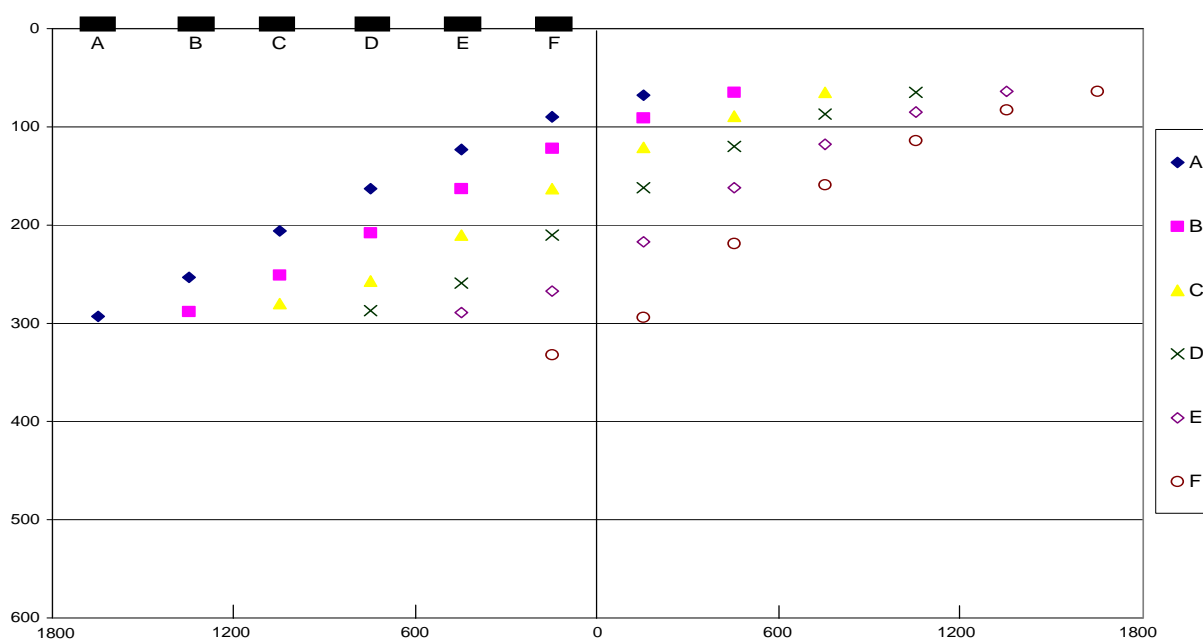
4.14. Odcinek nr 14 – Ulica Doroszewskiego w Warszawie

Nawierzchnia ulicy jest średnio spękana. Charakter występujących pęknięć wskazuje, że podbudowa wykonana jest z betonu o wysokiej wytrzymałości. Obliczony indeks spękań wyniósł $IS = 2,4$.

Pomiary ugięć na spękaniach oraz na płytach (tablica 16) wykazały bardzo dobrą współpracę płyt w obrębie pęknięć ($k = 0,88$) oraz złe podparcie płyt pod pęknięciami ($s = 1,76$). Należy uwzględnić to podczas projektowania wzmocnienia nawierzchni, ponieważ w obrębie pęknięć będziemy mieli do czynienia z obniżeniem nośności konstrukcji nawierzchni (wyższe wartości ugięć). Krawędzie płyt powinny więc zostać „podparte” poprzez wykonanie odpowiedniej naprawy tej części nawierzchni, np. poprzez iniekcję zaczynem cementowym.

Tablica 16 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 14 – ul. Doroszewskiego

Pikietaż	Miejsce obciążenia	Wskazania deflektometrów (geofonów), μm							Wskaźniki oceny	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	k	s
0+010	pęknięcie	293	245	194	151	118	89	69	0,91	
0+126	plyta	148	146	133	119	103	87	73		1,98
0+087	pęknięcie	277	257	206	162	125	96	75	0,96	
0+126	plyta	148	146	133	119	103	87	73		1,87
0+132	pęknięcie	192	192	157	129	103	82	67	1,00	
0+126	plyta	148	146	133	119	103	87	73		1,30
0+186	pęknięcie	406	308	225	163	120	88	66	0,86	
0+126	plyta	148	146	133	119	103	87	73		2,74
0+263	pęknięcie	332	294	219	159	114	83	64	0,94	
0+126	plyta	148	146	133	119	103	87	73		2,24
0+267	pęknięcie	239	195	156	124	95	68	52	0,90	
0+126	plyta	148	146	133	119	103	87	73		1,61
0+315	pęknięcie	220	206	163	126	95	71	53	0,97	
0+324	plyta	347	267	194	139	102	73	53		0,63
0+328	pęknięcie	575	193	138	100	73	56	46	0,50	
0+324	plyta	347	267	194	139	102	73	53		1,66
Średnia wartość wskaźnika współpracy płyt „k”									0,88	
Odchylenie standardowe									0,16	
Średnia wartość wskaźnika podparcia podbudowy „s”										1,76
Odchylenie standardowe										0,63



Rysunek 25 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 14 – ul. Doroszewskiego, punkt 0+263

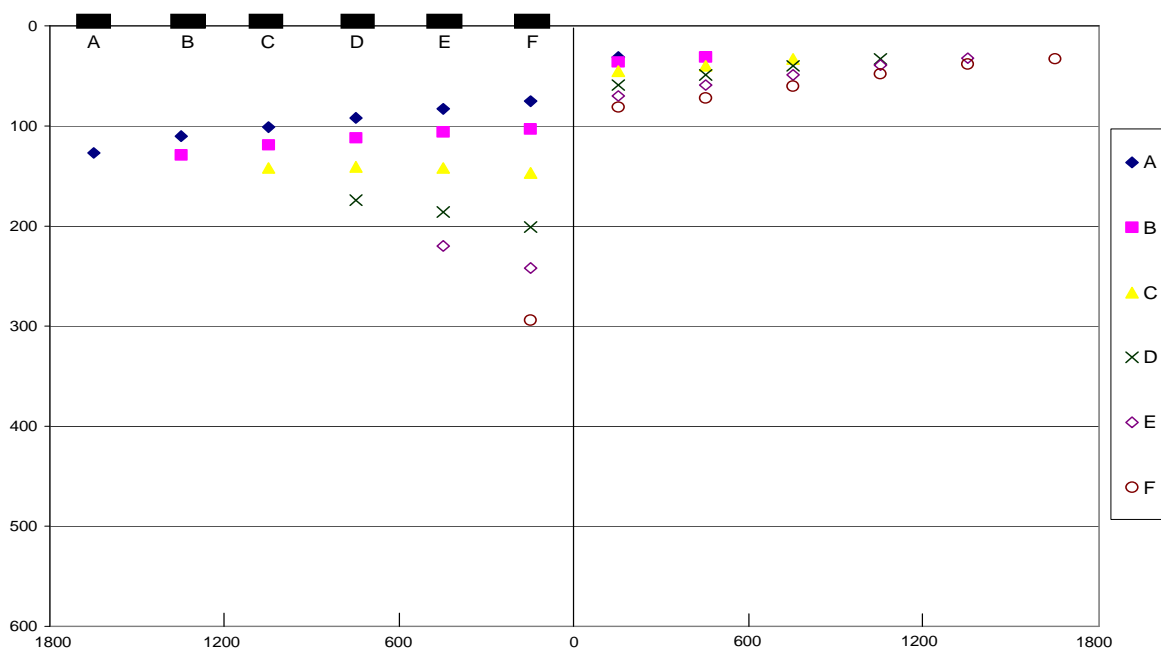
4.15. Odcinek nr 15 – Ulica Kampinowska w Warszawie

Nawierzchnia ulicy jest nowa, o kilkuletnim okresie eksploatacji. Pęknięcia są równe, bez spękań i ubytków wokół krawędzi. Na badanym odcinku występuje 11 spękań poprzecznych, z czego 9 na całą szerokość jezdni. Indeks spękań wyniósł $IS = 4$. Na 11 pęknięciach poprzecznych wykonano pomiary ugięć FWD. Wyniki zestawiono w tab. 17 oraz na rys.26

Tablica 17 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 15 – ul. Kampinowska

Pikietaż	Miejsce obciążenia	Wskazania deflektometrów (geofonów), μm							Wskaźniki oceny	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	k	s
0+033	pęknięcie	294	81	72	60	48	38	33	0,43	
0+183	plyta	156	134	117	97	81	58	44		1,88
0+085	pęknięcie	303	79	68	57	47	38	32	0,41	
0+183	plyta	156	134	117	97	81	58	44		1,94
0+174	pęknięcie	264	83	68	57	45	37	30	0,48	
0+183	plyta	156	134	117	97	81	58	44		1,69
0+194	pęknięcie	380	168	112	78	58	45	35	0,61	
0+204	plyta	193	164	134	107	84	63	46		1,97
0+211	pęknięcie	300	269	131	88	55	42	33	0,95	
0+204	plyta	193	164	134	107	84	63	46		1,55
0+253	pęknięcie	503	259	152	93	65	45	35	0,68	
0+264	plyta	310	224	151	104	72	50	37		1,62
0+270	pęknięcie	424	124	90	66	50	38	30	0,45	
0+264	plyta	310	224	151	104	72	50	37		1,37
0+303	pęknięcie	498	162	111	80	59	40	32	0,49	
0+313	plyta	482	360	220	131	86	60	46		1,03
0+319	pęknięcie	724	433	265	144	92	64	43	0,75	
0+313	plyta	482	360	220	131	86	60	46		1,50
0+329	pęknięcie	338	93	75	59	47	36	30	0,43	
0+313	plyta	482	360	220	131	86	60	46		0,70
0+413	pęknięcie	267	80	66	53	43	34	29	0,46	
0+313	plyta	482	360	220	131	86	60	46		0,55
Średnia wartość wskaźnika współpracy płyt „k”									0,56	
Odchylenie standardowe									0,17	
Średnia wartość wskaźnika podparcia podbudowy „s”										1,44
Odchylenie standardowe										0,48

Pomiary ugięć na spękaniach oraz na płytach (tablica 17) wykazały niedostateczną współpracę płyt w obrębie pęknięć ($k = 0,56$) oraz gorsze od zalecanego podparcie płyt pod pęknięciami ($s = 1,44$). Stwierdzony stan wskazuje na nieskuteczność naprawy przez zastosowanie membrany przeciwspekaniowej np. w postaci siatek.



Rysunek 26 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 15 – ul. Kampinoskiej, punkt 0+033

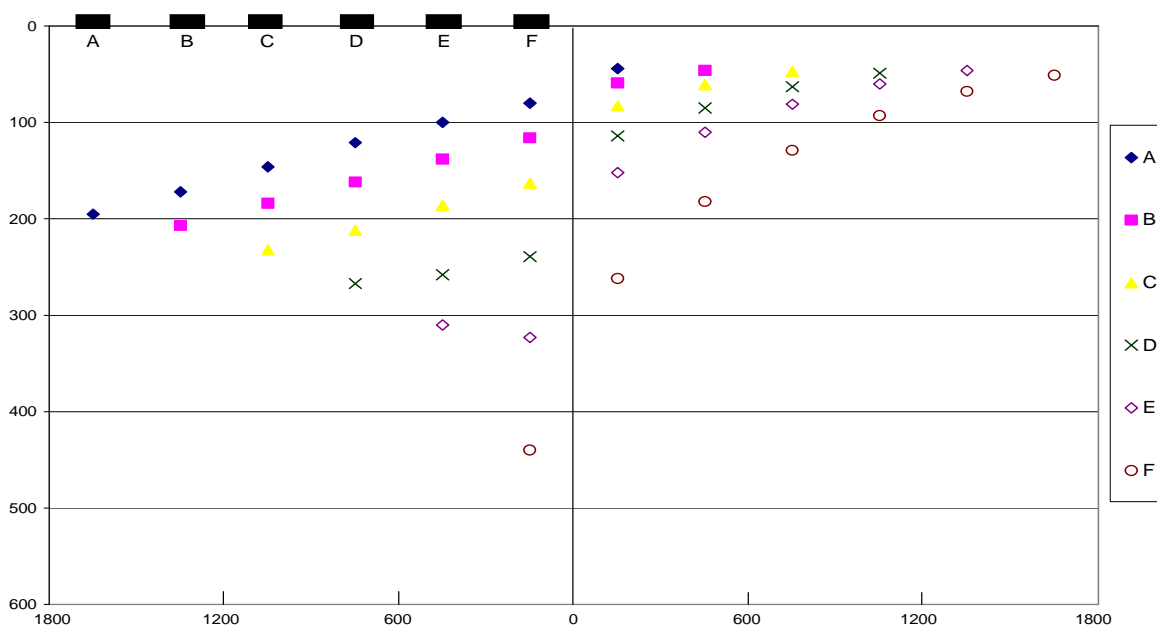
4.16. Odcinek nr 16 – Ulica Wójcickiego w Warszawie

Oceniany odcinek ulicy Wójcickiego jest bardzo spękany. Podczas inwentaryzacji spękań na części odcinka, na której wykonywano badania ugięć stwierdzono występowanie 11 pęknięć na całą szerokość jezdni. Obliczony indeks spękań wyniósł $IS = 8$.

Tablica 18 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 16 – ul. Wójcickiego

Pikietaż	Miejsce obciążenia	Wskazania deflektometrów (geofonów), μm							Wskaźniki oceny	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	k	s
0+005	pęknięcie	304	298	114	86	67	52	41	0,99	
0+022	plyta	232	196	158	121	84	58	44		1,31
0+012	pęknięcie	440	262	182	129	93	68	51	0,75	
0+022	plyta	232	196	158	121	84	58	44		1,90
0+030	pęknięcie	545	221	146	102	76	58	46	0,58	
0+061	plyta	145	123	106	90	72	57	45		3,76
0+045	pęknięcie	338	93	75	59	47	36	30	0,43	
0+061	plyta	145	123	106	90	72	57	45		2,33
0+067	pęknięcie	388	174	119	93	72	54	43	0,62	
0+061	plyta	145	123	106	90	72	57	45		2,68
0+074	pęknięcie	284	228	82	67	55	44	37	0,89	
0+061	plyta	145	123	106	90	72	57	45		1,96
0+093	pęknięcie	359	163	107	78	58	43	35	0,62	
0+061	plyta	145	123	106	90	72	57	45		2,48
0+098	pęknięcie	434	189	133	94	67	50	39	0,61	
0+104	plyta	430	305	210	146	106	78	59		1,01

0+108	pęknięcie	301	311	221	90	56	39	31	1,02	
0+141	plyta	227	188	144	116	94	75	58		1,33
0+133	pęknięcie	310	142	88	66	52	41	34	0,63	
0+141	plyta	227	188	144	116	94	75	58		1,37
0+157	pęknięcie	242	244	103	78	58	44	35	1,00	
0+141	plyta	227	188	144	116	94	75	58		1,07
Średnia wartość wskaźnika współpracy płyt „k”									0,74	
Odchylenie standardowe									0,20	
Średnia wartość wskaźnika podparcia podbudowy „s”										1,92
Odchylenie standardowe										0,84



Rysunek 27 Wyniki pomiarów ugięć na odcinku nr 16 – ul. Wójcickiego, punkt 0+012

Pomiary ugięć na spękaniach oraz na płytach (tablica 18) wykazały dobrą współpracę płyt w obrębie pęknięć ($k = 0,74$) oraz złe podparcie płyt pod pęknięciami ($s = 1,92$). Niedostateczne podparcie płyt wskazuje na konieczność naprawy nawierzchni w obrębie pęknięcia, np. poprzez iniekcję zaczynem cementowym.

5. Wnioski z przeprowadzonych badań

Na podstawie przeprowadzonych badań, obserwacji postępu degradacji spękanych nawierzchni na odcinkach badawczych oraz analizy wartości przyjętych w ocenie parametrów, można sformułować następujące wnioski:

- efektywność poszczególnych sposobów opóźniania propagacji spękań w warstwach asfaltowych zależy przede wszystkim od właściwej oceny przyczyn ich powstania, oceny stanu nawierzchni w ich obrębie oraz wyboru na tej podstawie odpowiedniej technologii naprawy,
- przystępując do naprawy spękań odbitych konieczne jest określenie, który rodzaj mechanizmu pęknięcia może wystąpić w nowych warstwach asfaltowych, tj. jaki jest stan podbudowy i podłoża, czy jest współpraca między płytami i czy nie grozi wystąpienie ścinania w pęknięciu,
- w wypadku niebezpieczeństwa pojawienia się ścinania w strefie pęknięcia, konieczna jest naprawa podbudowy i podłoża, aby nowe warstwy asfaltowe miały w sąsiedztwie pęknięcia odpowiednie podparcie,
- żadna ze znanych membran przeciwspekaniowych nie jest skuteczna w zapobieżeniu przeniesienia spękań w przypadku ścinania,
- warstwy przeciwspekaniowe najlepiej stosować na całej naprawianej powierzchni;
- bardzo istotny jest właściwy dobór parametrów membrany przeciwspekaniowej w zależności od jej zastosowania; należy dopełnić wszystkich reżimów technologicznych odpowiednich dla danego typu membrany, np. pełnego nasycenia włókniny asfaltem,
- jeżeli występują nośne podłoża i podbudowa oraz jest dobra współpraca płyt, to grubość warstw asfaltowych na spękanym podłożu powinna wynosić co najmniej 20 cm, aby pęknięcie nie było odbite (bez innych zabiegów przeciwspekaniowych); konieczna jest przy tym naprawa, uszczelnienie pęknięcia przed rozłożeniem na nim warstwy asfaltowej, aby zapobiec zjawisku koncentracji naprężeń,
- radykalnym, ale najskuteczniejszym sposobem zapobiegania spękaniom jest przebudowa podbudowy sztywnej na podatną,
- analiza współpracy płyt w obrębie pęknięcia (wyznaczenie wskaźnika k) na podstawie pomiarów FWD z różnymi ustawieniami geofonów w stosunku do pęknięcia (rysunki 3 – 27) pozwala na graficzne przedstawienie jakości połączenia dwóch części nawierzchni oddzielonych pęknięciem; zarówno dobra jak i zła współpraca płyt daje w pomiarach ugięć bardzo charakterystyczne obrazy: dla wysokich wartości współczynnika k linie wyznaczone przez ugięcia poszczególnych geofonów są ciągłe (rys. 5) natomiast dla niskich wartości k – niedostateczne połączenie płyt (rys. 6) widać wyraźny „uskok” na pęknięciu,

- analizując wyniki ugięć nawierzchni przedstawione na rysunkach 3 – 27 można wyznaczyć graniczną wartość współczynnika k dla której współpraca płyt jest wystarczająca; oscyluje ona od wartości $k = 0,65$ do $k = 0,75$,
- wartości współczynnika k wyznaczone z dwóch pierwszych geofonów (procedura standardowa wg [2]) są bardzo zbliżone do wartości k wyznaczonych z porównania ugięć pod innymi geofonami (procedura rozszerzona zastosowana w niniejszej pracy); można więc uznać, że ocena współpracy w pęknięciu odbitym w nawierzchni półsztywnej wykonywana wg metody opisanej w Katalogu [2] (Załącznik C, procedura 6) jest właściwa,
- skorygowania wymagają zapisy w procedurze 6 dotyczące interpretacji obliczonych wartości k ; na podstawie wyników niniejszej pracy proponuje się następujące zapisy:
 - $k < 0,70$ - oznacza brak współpracy między płytami,
 - $0,7 \leq k < 0,95$ - oznacza wystarczające przekazywanie obciążeń z jednej płyty na drugą,
 - $k \geq 0,95$ - oznacza pełną współpracę płyt,
- prawie wszystkie uzyskane w badaniach średnie wartości współczynnika s są większe niż 1,4; prawdopodobną przyczyną tego zjawiska jest fakt, że oceniane odcinki charakteryzują się długimi okresami eksploatacji, stąd większa degradacja podłoża w obrębie spękań (przenikanie wody i środków odladzających przez pęknięcia),
- wysokie wartości współczynników s świadczą o znacznych różnicach między wartościami ugięć na płytach oraz na krawędziach spękań; wskazuje to na konieczność projektowania wzmocnień nawierzchni na podstawie pomiarów ugięć na pęknięciach lub naprawy nawierzchni w obrębie spękań metodami pozwalającymi na uzyskanie właściwego podparcia płyt (np. metodą iniekcji zaczynem cementowym),
- nie stwierdzono wyraźnej korelacji pomiędzy wartościami k a sztywnością konstrukcji nawierzchni, którą charakteryzuje moduł zastępczy $E_{zast.}$; „podatność” nawierzchni, zależna od rodzaju i stanu podbudowy sztywnej nie jest więc głównym powodem różnic w wielkości ugięć po obu stronach pęknięcia,
- wyniki analiz wskazują również na brak zależności współczynnika k od indeksu spękań IS ; obserwacje te skłaniają do wniosku, że badania współpracy płyt w pęknięciu odbitym należy wykonywać na wszystkich występujących na ocenianym odcinku pęknięciach,
- wartości współczynników k uzyskane z wyniki pomiarów w okresie wiosennym są o 5 – 17% wyższe od uzyskanych w pomiarach w niskich temperaturach; wynika to prawdopodobnie z mniejszej rozwarości rys w wyższej temperaturze oraz większej podatności nawierzchni na wiosnę (większe ugięcia); skłania to do zalecenia wykonywania pomiarów ugięć na pęknięciach w niskich temperaturach – wówczas będzie na podstawie badań wykrywać wszystkie miejsca, w których następuje ścinanie w obrębie pęknięć poprzecznych.

Bibliografia

- [1] Mechowski T., Błażejowski K., Opracowanie metod oceny stanu pęknięcia poprzecznego nawierzchni. IBDiM 1998
- [2] Katalog Wzmocnień i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych, Warszawa 2001
- [3] RILEM Report 18, ed. Francken L. Vanelstraete A. 1997
- [4] Jabłoński K., Naprawa spękań poprzecznych nawierzchni asfaltowych. Drogownictwo nr 11/97
- [5] Jabłoński K., Konstrukcyjno-technologiczne aspekty przywracania szczelności spękanym poprzecznie nawierzchniom asfaltowym. Międzynarodowe Seminarium „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”. Kielce 1997
- [6] Sybilski D., Poprzeczne spękania odbite nawierzchni autostrady A4 (Kraków - Katowice). Drogownictwo nr 11/97
- [7] Sybilski D. i in., Remont nawierzchni betonowej. Drogownictwo nr 7/93
- [8] Sybilski D., Dlaczego powinniśmy ograniczać stosowanie podbudów sztywnych? Międzynarodowe Seminarium „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”. Kielce 1998
- [9] Alenowicz J., Badania spękań odbitych w nawierzchni drogi krajowej nr 7 na odcinku Przejazdowo - Kieżmark. Międzynarodowe Seminarium „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”. Kielce 1998
- [10] Sybilski D., Postęp techniczny w polskim drogownictwie a nowy katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Międzynarodowe Seminarium „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”. Kielce 1997
- [11] Alenowicz J., Badania terenowe spękań poprzecznych w nawierzchni asfaltowej. Międzynarodowe Seminarium „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”. Kielce 1997
- [12] Grzybowska W., Wojtowicz J., Pierwsze próby zastosowań geowłóknin polskiej produkcji do remontów nawierzchni w regionach krakowskim i bielskim. Międzynarodowe Seminarium „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”. Kielce 1997

- [13] Kukielka J., Likwidacja pęknięć poprzecznych nawierzchni bitumicznej przed jej wzmocnieniem. Drogownictwo nr 9/95
- [14] Koba H., Wpływ temperatury na spękania poprzeczne nawierzchni bitumicznych. Drogownictwo nr 8/96
- [15] Judycki J. i in., Projektowanie wzmocnień i technologii remontu nawierzchni ulic w Gdańsku. Seminarium naukowo-techniczne „Diagnostyka i ocena stanu dróg”. Szczecin 1997
- [16] Bartkowiak E., Iglowane geowłókniny do zastosowań w konstrukcjach nawierzchni bitumicznych. Międzynarodowe Seminarium „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”. Kielce 1998
- [17] Alenowicz J., Sposoby ograniczenia propagacji spękań odbitych w asfaltowych warstwach nawierzchni. Międzynarodowe Seminarium „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”. Kielce 1995
- [18] Sybilski D. i in., Wstępne zalecenia oceny, zapobiegania powstawaniu i napraw spękań poprzecznych nawierzchni bitumicznych. IBDiM - Sprawozdanie z tematu TN/TG-141. Warszawa 1992
- [19] Sybilski D., Spękania nawierzchni bitumicznych na podbudowach ze spoiwem hydraulicznym. Prace IBDiM nr 1/91

Załącznik

Wyniki pomiarów ugięciomierzem FWD – seria wiosenna