



JÓZEF JUDYCKI

jozef.judycki@wilis.pg.gda.pl



PIOTR JASKUŁA

piotr.jaskula@wilis.pg.gda.pl



BOHDAN DOŁŻYCKI

bohdan.dolzycki@wilis.pg.gda.pl



MAREK PSZCZOŁA

marek.pszczola@wilis.pg.gda.pl



MARIUSZ JACZEŃSKI

mariusz.jaczenski@wilis.pg.gda.pl



DAWID RYŚ

dawid.rys@wilis.pg.gda.pl



MARCIN STIENS

marcin.stiens@pg.gda.pl

Politechnika Gdańska

# Badania spękań niskotemperaturowych podbudów z AC WMS na nowobudowanej autostradzie A1 w Polsce

## Część 1 – Badania terenowe i laboratoryjne

W okresie od 1995 do 2005 r. na wielu drogach w Polsce występował istotny problem kolein, który ze względu na dużą liczbę skoleinowanych odcinków oraz znaczną głębokość kolein negatywnie wpływał na komfort i bezpieczeństwo ruchu. W celu przeciwdziałania problemowi kolein podjęto środki, które polegały głównie na zabiegach utrzymaniowych istniejących dróg oraz na modyfikacji i udoskonaleniu procedur projektowania i badań mieszanek mineralno-asfaltowych, a także na zastosowaniu twardszych asfaltów. Asfalty drogowe o penetracji 70, które wcześniej były powszechnie stosowane do produkcji betonów asfaltowych w Polsce, zostały zastąpione przez asfalty o penetracji 50/70 w przypadku mieszanek stosowanych do warstw ścieralnych oraz przez asfalt o penetracji 35/50 – w przypadku mieszanek stosowanych do warstw wiążących i podbudów. Do mieszanek dla warstw ścieralnych zaczęto również częściej niż poprzednio stosować asfalty modyfikowane (PMB). Deformacje trwałe były w dalszym ciągu problemem na drogach znacznie obciążonych ruchem ciężkim, co spowodowało stopniowe wprowadzanie nawierzchni, w których podbudowa lub warstwa wiążąca wykonana jest z betonu asfaltowego o wysokim module sztywności AC WMS. Liczba odcinków z mieszankami AC WMS znacznie wzrosła w latach 2008-2010, kiedy wbudowano je na większości nowych autostrad, dróg ekspresowych i dróg krajowych. Celowość stosowania mieszanek o wysokim module sztyw-

ności była przedmiotem dyskusji pomiędzy ekspertami. Argumentem przeciwko stosowaniu w polskich warunkach mieszanek AC WMS z asfaltem o penetracji 20/30 była obawa, że nawierzchnie, w których będą one wbudowane mogą charakteryzować się obniżoną odpornością na powstawanie spękań niskotemperaturowych. Mieszanki AC WMS zostały opracowane we Francji i są tam stosowane do chwili obecnej (oznaczane są jako AC-EME). Należy jednak podkreślić, że klimat we Francji jest bardziej łagodny niż w Polsce. W naszym kraju odnotowuje się znacznie niższe temperatury. Przykładowo najniższa odnotowana we Francji temperatura powietrza od 1981 r. wynosi  $-25^{\circ}\text{C}$ , podczas gdy według notowań prowadzonych od 1971 r. w Polsce jest to  $-34,3^{\circ}\text{C}$  [1].

W lutym 2012 r. w wielu regionach Polski temperatura powietrza spadła do  $-6^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$  w ciągu dnia oraz do  $-14^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$  w ciągu nocy. Ujemne temperatury utrzymywały się przez okres około dwóch tygodni. W konsekwencji powstały spękania na podbudowach wykonanych z AC WMS, które zostały wykonane w okresie lata i jesieni 2011 r. a nie zostały przykryte warstwą wiążącą lub ścieralną na okres zimy. Problem dużej liczby spękań zaskoczył i zaniepokoił inżynierów drogowych i stał się tematem gorącej dyskusji w środowiskach masowego przekazu. Do tego czasu nie obserwowano tak dużej liczby pęknięć nawierzchni powstałych podczas jednego sezonu zimowego. Ponadto należy dodać, że na realizację inwestycji związanych z budową autostrad w Polsce przeznaczono znaczne środki finansowe, dlatego też oczekiwano wykonania o najwyższym standardzie.

### Cel i zakres badań

Katedra Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej przeprowadziła badania zjawiska spękań poprzecznych warstw z betonu asfaltowego o wysokim module sztywności, jakie wystąpiły na polskich autostradach w czasie mrozów zimą 2012 r. Warstwy z betonu asfaltowego były pozostawione na okres zimy bez przykrycia warstwą asfaltową i popękały w okresie występowania niskiej temperatury. Celem badań było określenie przyczyn powstania spękań oraz zaproponowanie metod naprawy. Badania miały także odpowiedzieć na pytanie, czy prace zostały wykonane zgodnie ze specyfikacjami na wymaganym poziomie jakościowym, a ponadto czy ewentualne błędy technologiczne miały wpływ na wystąpienie spękań.

## Zakres badań objął następujące zagadnienia:

1. Analiza dokumentacji technicznej budowy nawierzchni.
2. Badania terenowe: ocena wizualna stanu nawierzchni, inwentaryzacja spękań, odwierty i odkrywki w nawierzchni.
3. Badania laboratoryjne: określenie właściwości fizycznych i cech mechanicznych próbek pobranych z warstwy podbudowy AC WMS, z warstwy podbudowy z kruszywa łamanego niezwiązanego i z warstwy podbudowy pomocniczej z materiału stabilizowanego cementem.
4. Analiza przyczyn powstania spękań nawierzchni obejmująca: analizę temperatur powietrza i nawierzchni w okresie wystąpienia spękań, ocena PG zastosowanego asfaltu i temperatury krytycznej w danym regionie, ocena sztywności i relaksacji naprężeń w mieszankach mineralno-asfaltowych, obliczenia naprężeń termicznych, określenie wpływu niejednorodności mieszanek na ilość spękań.
5. Określenie metod zabezpieczenia spękań.

Prace badawcze zostały wykonane w przypadku następujących odcinków nowobudowanych autostrad i dróg ekspresowych: autostrada A1 odcinek Czerniewice – Kowal, autostrada A2 Stryków – Konotopa, sekcja B, autostrada A4 na odcinku Rzeszów Centralny – Rzeszów Wschód oraz droga ekspresowa S7 na odcinku Obwodnicy Kielc. W niniejszym artykule przedstawiono, jako wybrany przykład, prace badawcze zrealizowane na autostradzie A1, gdzie zakres występujących spękań poprzecznych był największy. Wyniki badań i wnioski w przypadku pozostałych autostrad były podobne.

Niniejszy artykuł jest pierwszą częścią z serii dwóch artykułów. Przedstawiono w nim opis konstrukcji nawierzchni wykonanej na rozpatrywanym odcinku autostrady, najważniejsze wymagania dotyczące mieszanek AC WMS, wyniki oceny terenowej stanu spękań nawierzchni oraz wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych na próbkach pobranych z nawierzchni.

## Projekt konstrukcji nawierzchni i podstawowe wymagania w odniesieniu do AC WMS

Analizowany odcinek autostrady A1 ma długość 64 km i przebiega od węzła Czerniewice do węzła Kowal (km 151+900 do km 215+850). Położony jest w województwie kujawsko-pomorskim, w centralnej części Polski.

Konstrukcja nawierzchni całego analizowanego odcinka autostrady A1 została zaprojektowana z zastosowaniem betonów asfaltowych AC WMS zarówno do warstwy wiążącej, jak i do warstwy podbudowy. Konstrukcja składała się z następujących warstw:

- 4 cm warstwa ścieralna z mastyksu grysowego SMA o uziarnieniu 0/11 mm z asfaltem modyfikowanym PmB 45/80-55,
- 10 cm warstwa wiążąca z betonu asfaltowego AC WMS o uziarnieniu 0/16 mm z asfaltem modyfikowanym PmB 25/55-60,
- 14 cm warstwa podbudowy asfaltowej z betonu asfaltowego AC WMS o uziarnieniu 0/16 mm z asfaltem 35/50 typu multigrade, układana w dwóch warstwach o grubości po 7 cm,
- 15 cm warstwa podbudowy z mieszanki kruszyw niezwiązanym o uziarnieniu 0/31,5 mm,

- 15 cm warstwa z gruntu lub kruszywa stabilizowanego cementem  $R_m = 2,5$  MPa,
- 15 cm warstwa odsączająca z mieszanki kruszywa naturalnego,
- podłoże gruntowe o wymaganej wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 \geq 120$  MPa.

Nasypy wykonano z piasków równoziarnistych, które występują powszechnie w rejonie budowy autostrady.

Na etapie wykonywania inwestycji nastąpiła zamiana asfaltów, które wcześniej zostały przewidziane do podbudowy z betonu asfaltowego AC WMS. Pierwotnie projektowany asfalt 35/50 typu *multigrade* został zamieniony na asfalt zwykły 20/30. Zamiana rodzaju asfaltu została zaproponowana przez Wykonawcę i zaakceptowana przez Inwestora. Wynikało z problemów z dostępnością tych asfaltów typu *multigrade* na polskim rynku. Podstawowe wymagania dotyczące betonu asfaltowego AC WMS zgodnie z dokumentacją projektową autostrady A1 przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wymagane właściwości betonu asfaltowego AC WMS zgodnie z dokumentacją projektową autostrady A1

Lp.	Badana cecha	Metoda i warunki badania	Wymaganie
1.	Wolna przestrzeń w mma	PN-EN 12697-8, p. 4	$V_{\min 2,0}$ $V_{\max 4,0}$
2.	Wolna przestrzeń w warstwie	PN-EN 12697-8, p. 4	$V_{\min 2,0}$ $V_{\max 5,0}$
3.	Wskaźnik zagęszczenia w warstwie	PN-EN 12697-6	$\geq 98\%$
4.	Odporność na działanie wody	PN-EN 12697-12, kondycjonowanie 40°C, 1 cykl zamrażania, T = 15°C	ITSR <sub>90</sub>
5.	Odporność na deformacje trwałe	PN-EN 12697-22, metoda B (mały koleinomierz), powietrze, PN-EN 13108-20 D.1.6, 60°C, 10 000 cykli	WTS <sub>AIR 0,10</sub> PRD <sub>AIR 3,0</sub>
6.	Moduł sztywności	PN-EN 12697-26, 4PB-PR, T = 10°C, f = 10 Hz	S <sub>min 14000</sub>
7.	Odporność na zmęczenie	PN-EN 12697-24, 4PB-PR, T = 10°C, f = 10 Hz	$\epsilon_{6-130}$

Przedstawione w tabeli 1 wymagania dla AC-WMS wynikały z polskich wytycznych technicznych WT-2 2008 [3], jakie obowiązywały w latach 2008-2010. Różnią się one od francuskiej wersji betonu asfaltowego o wysokim module sztywności EME (fr. *Enrobé à Module Élevé*) [2, 4]. Podstawowe różnice wynikają z ograniczenia rodzaju asfaltów, które można stosować w Polsce, tzn. do asfaltów o penetracji 20/30 oraz twardych asfaltów modyfikowanych. We Francji mogą być stosowane również twardsze asfalty o penetracji 10/20. Francuskie przepisy dla warstw wykonanych z EME 2 dopuszczają 6% wolnych przestrzeni, natomiast polskie wytyczne ograniczyły ten zakres do 5%. recepta laboratoryjna opracowana na etapie prac przygotowawczych w związku z budową odcinka autostrady A1 zakładała zawartość asfaltu 20/30 w mieszance mineralno-asfaltowej wynoszącą 5,2%(m/m). Mieszanka mineralna składała się z kruszyw melafirowych oraz kruszyw wapiennych. Maksymalny wymiar ziaren w mieszance mineralnej wynosił 16 mm.

## Badania terenowe

Zakres badań terenowych obejmował: inwentaryzację spękań poprzecznych podbudowy asfaltowej z AC WMS z podziałem na spękania w spoinach roboczych i poza nimi, identyfikację spękań poprzecznych poza podbudową asfaltową, ocenę wizualną jednorodności powierzchni podbudowy asfaltowej z AC WMS oraz odwierty i odkrywki w wykonanej konstrukcji nawierzchni (podbudowa asfaltowa, podbudowa z kruszywa łamanego, stabilizacja kruszywa cementem) wykonane w miejscach spękań poprzecznych, w celu możliwości ustalenia głębokości penetracji spękania. Badania dotyczyły trzech odcinków autostrady A1 realizowanych w tym samym czasie przez jedno konsorcjum.

## Inwentaryzacja niskotemperaturowych spękań poprzecznych

### Spękania w warstwie podbudowy asfaltowej AC WMS

Pierwsze spękania podbudowy AC WMS wykonawca robót stwierdził w końcu stycznia oraz na początku lutego 2012 r., w okresie kiedy temperatura powietrza obniżyła się do około  $-22^{\circ}\text{C}$ . Rodzaj spękań ograniczał się wyłącznie do spękań poprzecznych, nie wystąpiły spękania podłużne lub nieregularne. Pierwszą inwentaryzację spękań podbudowy wykonał wykonawca odcinka na podstawie obserwacji wizualnej przeprowadzonej w ostatniej dekadzie lutego 2012 r., tj. około 10-15 dni po wystąpieniu spękań.

W trakcie wykonanej przez pracowników Politechniki Gdańskiej inwentaryzacji spękań (już w okresie występowania temperatur dodatnich) rozpoznano następujące rodzaje spękań poprzecznych:

- typowe spękania niskotemperaturowe w podbudowie asfaltowej występujące poza spoiną technologiczną (fot. 1); oznaczone jako *LTC* (skrót z ang. *Low Temperature Cracks*),
- spękania niskotemperaturowe występujące w poprzecznej spoinie technologicznej podbudowy asfaltowej (fot. 2); oznaczone jako *JLTC* (skrót z ang. *Joint Low Temperature Cracks*).

Spękania typu *LTC*, czyli poprzeczne spękania niskotemperaturowe poza spoiną technologiczną miały różny przebieg. W większości stwierdzano regularne spękania w przebiegu poprzecznym. Występowały również spękania, których przebieg był dość regularny w połowie jezdni, natomiast przy krawędziach jezdni (około 1 m od krawędzi) odchyłał się od 20 do 50 cm (fot. 1). Szerokość spękań poza spoiną technologiczną była niewielka, zwykle wynosiła 1–2 mm.



Fot. 1. Spękanie poprzeczne zlokalizowane poza spoiną technologiczną (*LTC*)



Fot. 2. Spękanie poprzeczne zlokalizowane w spoinie technologicznej (*JLTC*)

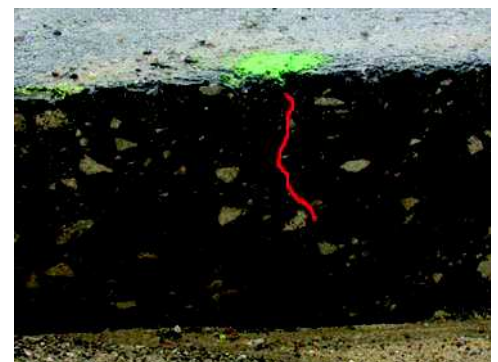
Spękania niskotemperaturowe w poprzecznych spoinach technologicznych, typu *JLTC* miały przebieg regularny. Były odwzorowaniem zakończenia działki roboczej, po odcięciu krawędzi wcześniej wykonanej warstwy (fot. 2). Zazwyczaj ich szerokość w dniu przeprowadzonej wizji lokalnej była w przedziale 3-4 mm, pojawiały się również rozwarścia o szerokości 6 i 8 mm.

Podczas wizji lokalnej obserwowano różny zakres propagacji spękań. Po wykonaniu odwiertów możliwe było stwierdzenie, że spękania przechodziły przez całą podbudowę asfaltową, zarówno w przypadku wbudowywania podbudowy jednowarstwowo, jak i dwuwarstwowo (fot. 3). Zauważono ponadto, że w niektórych przypadkach propagacja spękania kończyła się w górnej warstwie podbudowy asfaltowej i nie przechodziła przez dolną warstwę (fot. 4). Spękania z ograniczeniem propagacji tylko do warstwy górnej podbudowy występowały wtedy, gdy pomiędzy warstwą górną a warstwą dolną podbudowy wbudowanej dwuwarstwowo nie było pełnego związania względnie spękania dopiero powstawały.

Zestawienie podsumowujące ilości spękań poprzecznych (typów *LTC* i *JLTC*) w warstwie podbudowy asfaltowej AC WMS przedstawiono w tabeli 2.



Fot. 3. Spękanie poprzeczne poza spoiną technologiczną, przebieg przez dwuwarstwową podbudowę asfaltową



Fot. 4. Spękanie poprzeczne poza spoiną technologiczną, czerwona linia odwzorowuje spękanie

Tabela 2. Zestawienie spękań podbudowy asfaltowej na odcinkach 1, 2 i 3

Odcinek/ jezdnia	Długość L [km]	Liczba spękań [sztuk]		Indeks spękań IS [sztuk/km]	
		JLTC	LTC	JLTC+LTC	LTC
1, lewa	4,36	10	38	11	9
1, prawa	5,50	6	45	9	8
2, lewa	8,66	19	17	4	2
2, prawa	7,33	9	5	2	1
3, lewa	6,86	8	29	5	4
3, prawa	7,73	7	23	4	3

Oznaczenia do tabeli 2:

**JLTC** – spękanie poprzeczne niskotemperaturowe w spoinie technologicznej,

**LTC** – spękanie poprzeczne niskotemperaturowe poza spoiną technologiczną, typowe spękanie niskotemperaturowe.

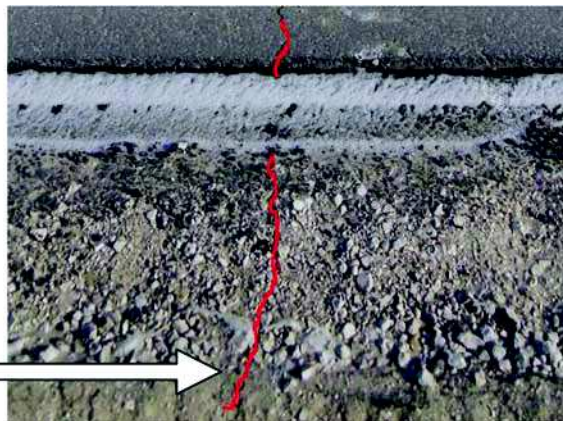
### Spękania w innych elementach autostrady

W okresie występowania temperatury ujemnej (koniec stycznia, początek lutego), kiedy pojawiały się spękania w warstwach podbudowy AC WMS, zaobserwowano także spękania innego rodzaju. Wystąpiły sporadycznie spękania w podbudowie zasadniczej z kruszywa niezwiązanego (rys. 1 i 2) i w podbudowie pomocniczej z kruszywa stabilizowanego cementem. Można było zaobserwować także spękania gruntu w pasie dzielącym (rys. 3 i 4), jak i skarpy oraz podłoża rodzimego poza nasypem.

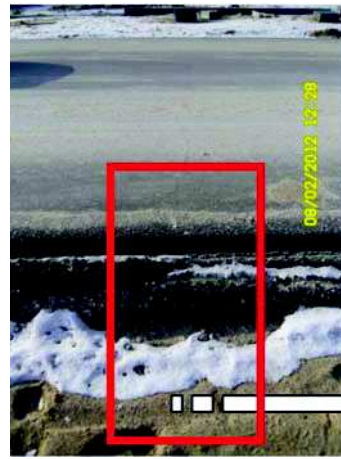
Część spękań poprzecznych obserwowano bezpośrednio nad przykanalikami, przy wpustach studzienek deszczowych lub w ich bliskim sąsiedztwie, a także wystąpiły spękania fundamentów betonowych pod elementami ścieku przykrawędziowego. Zagadnienie spękań elementów sąsiadujących z nawierzchnią, takich jak dolne warstwy podbudowy, gruntu przylegającego do podbudowy i elementów odwodnienia nie będzie dalej omawiane. Dlatego w tym miejscu można dodać jako wyjaśnienie, że wykonane obliczenia wykazały, że podłużne siły rozciągające jakie występują przy pękaniu niskotemperaturowym warstwy asfaltowej AC WMS o grubości 15 cm są równe około 700 kN na 1 m szerokości podbudowy. Te ogromne siły przekazywane poprzez tarcie na elementy sąsiadujące z podbudową AC WMS powodowały ich pękanie.



Rys.1. Spękanie LTC, przebieg poniżej podbudowy asfaltowej



Rys. 2. Spękanie LTC, powiększenie rys. 1, czerwona linia odwzorowuje spękanie



Rys. 3. Spękanie LTC, przebieg poniżej podbudowy asfaltowej



Rys. 4. Spękanie LTC, powiększenie rys. 3, czerwona linia odwzorowuje przebieg spękania

### Ocena wizualna jednorodności powierzchni podbudowy z AC WMS

Na podstawie wizualnej oceny stanu powierzchni podbudowy stwierdzono powierzchniowe niejednorodności, objawiające się zmiennością w wyglądzie i strukturze powierzchni w kierunku poprzecznym i podłużnym. Stwierdzono ponadto różnorodną otwartość struktury mieszanki (fot. 5–8).

W kierunku poprzecznym pojawiały się miejsca ze strukturą bardziej otwartą, w których obserwowano wyraźnie pojedyncze ziarna obtoczonego kruszywa, jak i miejsca z mniej otwartą strukturą powierzchni, w których mieszanka stanowiła całość (fot. 8). Niejednorodności pojawiały się przy krawędziach, odpowiadającym skrajom rozkładarki, jak i w obszarze środka przejścia rozkładarki.

W kierunku podłużnym pojawiały się miejsca ze strukturą bardziej otwartą, gdzie obserwowano pojedyncze ziarna obtoczonego kruszywa, jak i miejsca z mniej otwartą strukturą powierzchni. Obserwowano pewną regularność w zakłóceniach jednorodności w kierunku podłużnym, która prawdopodobnie odpowiadała zatrzymaniom rozkładarki podczas wbudowywania warstwy lub odpowiadała zsypanyemu mieszanki ze skrzydełek kosza zasypowego rozścielacza, względnie innej sytuacji, która związana była z lokalnym wbudowaniem wystudzonej mieszanki mineralno-asfaltowej.

Należy stwierdzić także, że część spękań poprzecznych poza spoinami technologicznymi występowała na wyraźnej granicy w wyglądzie i strukturze powierzchni podbudowy asfaltowej. Prawdopodobnie występowało to w miejscu wydłużonego przestoju rozkładarki lub wbudowaniu wystudzonej mieszanki (fot. 5, 9 i 10).

Zestawienie klasyfikacji jednorodności powierzchni podbudowy asfaltowej, na podstawie subiektywnej oceny, przedsta-



Fot. 5. Niejednorodność powierzchni podbudowy asfaltowej



Fot. 6. Niejednorodność powierzchni podbudowy asfaltowej



Fot. 7. Niejednorodność powierzchni podbudowy asfaltowej



Fot. 8. Jednorodność powierzchni podbudowy asfaltowej



Fot. 9. Niejednorodność powierzchni podbudowy asfaltowej, spękanie na granicy zmiany struktury



Fot. 10. Niejednorodność powierzchni podbudowy asfaltowej, spękanie na granicy zmiany struktury

## Odwierty i odkrywki

Na każdym odcinku wykonano po jednej odkrywce oraz pobierano trzy odwierty. Lokalizację miejsc, w których przeprowadzono badania terenowe, określono na podstawie wcześniejszej przeprowadzonej inwentaryzacji spękań. Były to miejsca ze spękaniami niskotemperaturowymi typu JLTC lub LTC. Badania były prowadzone według następującego schematu:

Odkrywki o wymiarach około 100 × 50 cm wykonywano poprzez kolejne usuwanie każdej warstwy konstrukcji nawierzchni, aby ocenić propagację spękania (fot. 11 i 12).

Odwierty: w miejscach spękania (fot. 13, 14, 15, 16, 17 i 18), posłużyły do oceny propagacji spękania i pomiaru grubości poszczególnych warstw oraz odwierty wykonane obok spękań do pobrania próbek do badań laboratoryjnych.

Dodatkowo, w celu kontroli jakości wykonanych robót, w trakcie prac terenowych sprawdzono zagęszczenie górnej strefy nasypu oraz pobrano do badań materiał z warstwy związanej cementem oraz z warstwy kruszywa łamanego.

## Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne obejmowały sprawdzenie jakości wykonania wszystkich warstw konstrukcji na-

wiono w tabeli 3. Jednorodność powierzchni podbudowy AC WMS oceniał wizualnie kilkusobowy zespół ekspertów, klasyfikując ją jako jednorodną lub niejednorodną. W przypadku każdego odcinka autostrady ustalono udział procentowy poszczególnych powierzchni nawierzchni o różnej jednorodności.

Tabela 3. Jednorodność powierzchni na odcinkach 1, 2 i 3

Odcinek/ Jezdnia	Długość L [km]	Udział nawierzchni o różnej jednorodności powierzchni [%]	
		Niejednorodne	Jednorodne
1/lewa	4,36	41	59
1/prawa	5,50	52	48
2/lewa	8,66	26	74
2/prawa	7,33	0	100
3/lewa	6,86	19	81
3/prawa	7,73	30	70



Fot. 11. Propagacja spękania przez podbudowę AC WMS widoczna w warstwie kruszywa łamanego



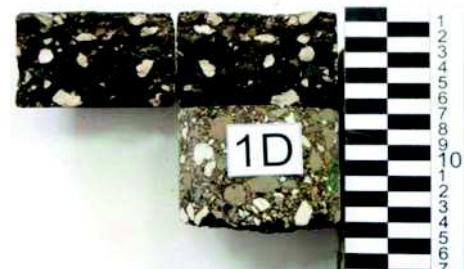
Fot. 12. Propagacja spękania przez podbudowę AC WMS oraz przez warstwę kruszywa łamanego jest widoczna w warstwie związanej cementem



Fot. 13. Spękanie propaguje tylko w górnej warstwie AC WMS



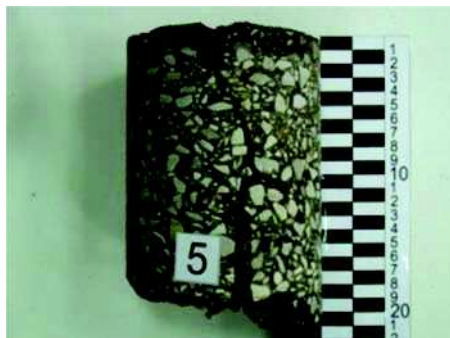
Fot. 14. Spękanie propaguje przez całą konstrukcję nawierzchni



Fot. 15. Spękanie propaguje tylko w górnej warstwie AC WMS



Fot. 16. Spękanie propaguje częściowo i zanika w warstwie dolnej



Fot. 17. Spoina technologiczna w dolnych warstwach inicjuje spękanie w górnych warstwach



Fot. 18. Brak uszczelnienia połączenia technologicznego

wierzchni (warstw asfaltowych, warstw z mieszanek niezwiązanych, warstw związanych cementem), a także robót ziemnych. Zakres badań był uzależniony od istotności rozpatrywanej warstwy w procesie powstawania spękań. Główny nacisk położono na badania mieszanek mineralno-asfaltowych, które zrealizowano w dwóch etapach. W pierwszym etapie wykonano badania próbek pobranych z podbudowy AC WMS w zakresie: składu, zagęszczenia i zawartości wolnych przestrzeni, modułu sztywności oraz wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. W drugim etapie przeprowadzono badania podbudów AC WMS wykonanych w laboratorium z materiałów pobranych z budowy i według recept kontraktowych, których celem było wykazanie wpływu asfaltu 20/30 i wielorodzajowego 35/50 na cechy podbudowy AC WMS. Zastosowanie w badaniach laboratoryjnych asfaltu wielorodzajowego 35/50 multigrade miało na celu pokazanie wpływu użytego asfaltu na właściwości niskotemperaturowe podbudowy AC WMS w porównaniu do asfaltu 20/30. Należy tu zauważyć, że asfalt 35/50 multigrade był pierwotnie przewidziany do zastosowania i został zmieniony na asfalt 20/30 na wniosek Wykonawcy robót.

Przeprowadzone badania wykonanych robót ziemnych i dolnych warstw leżących pod podbudową AC WMS wykazały, że roboty ziemne pod względem zagęszczenia wykonano prawidłowo. Dolna warstwa podbudowy związana cementem charakteryzowała się wymaganą wytrzymałością na

ściskanie, natomiast warstwę podbudowy z kruszywa łamanego wykonano z materiałów spełniających wymagania określone w specyfikacjach technicznych.

Stwierdzono, że warstwy dolne nie miały wpływu na powstawanie spękań niskotemperaturowych w warstwie podbudowy AC WMS. Wykonane obserwacje i analizy wykazały, że spękania w podbudowie AC WMS nie miały charakteru spękań odbitych od warstwy dolnej związanej cementem, natomiast były typowymi spękaniami niskotemperaturowymi.

Skład badanego betonu asfaltowego z podbudowy AC WMS w większości przypadków wykazywał zgodność z receptą. W niektórych przypadkach stwierdzono jednak istotne odchylenia, zwłaszcza w miejscach dużych niejednorodności wyglądu nawierzchni. Wartości wskaźnika zagęszczenia mieszanki AC WMS wahały się od 97,3% do 102,3%, średnia wyniosła 100,5%. Zawartości wolnych przestrzeni wahały się w stosunkowo szerokim przedziale tzn. od 2,7% do 6,4%; średnio 4,3%. Wartości te wskazywały, że badana warstwa podbudowy AC WMS jest niejednorodna. Zmienność wskaźnika zagęszczenia i zawartości wolnych przestrzeni stwierdzono w obrębie spoin roboczych, po obu stronach połączenia. Można było zauważyć, że przy spoinie roboczej mieszanka była niedogęszczona. Przeprowadzone badania potwierdziły obserwacje z wizji lokalnej wskazujące na dużą niejednorodność wykonanej warstwy.

Tabela 4. Moduły sztywności i wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek pobranych z nawierzchni

Temperatura, °C	Sekcje niejednorodne		Sekcje jednorodne		Sekcje niejednorodne		Sekcje jednorodne	
	AC WMS 20/30		AC WMS 20/30		AC WMS 20/30		AC WMS 20/30	
	Moduł, MPa	Wsk. zm., %	Moduł, MPa	Wsk. zm., %	Moduł, MPa	Wsk. zm., %	Moduł, MPa	Wsk. zm., %
+10	10 284	9,50	12 357	3,88	3,10	16,31	3,51	7,01
0	15 108	8,66	16 142	3,90	3,67	12,30	4,13	8,63
-10	16 254	9,30	19 054	2,48	3,67	14,35	4,64	6,10
-20	20 788	12,70	24 102	4,09	4,19	22,71	4,97	10,38
-30	20 866	10,60	22 996	2,39	3,61	19,82	4,29	8,66

Wyniki badań modułów sztywności i wytrzymałości na pośrednie rozciąganie przedstawiono w tabeli 4. Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych z odwiertów z podbudowy AC WMS. Odwierty o średnicy 100 mm pocięto na próbki o wysokości  $h = 40-50$  mm. Badania modułów sztywności wykonano w aparacie NAT (*Nottigham Asphalt Tester*), metodą IT-CY według normy PN-EN 12697-26 przy odkształceniu poziomym  $2 \mu\text{m}$  oraz czasie obciążenia 0,12 s. Badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie wykonano według normy PN-EN 12697-23 przy prędkości przesuwu tłoka 12,5 mm/min. Warunki badania w obu przypadkach dostosowano do specyfikacji badań w niskiej temperaturze. W przypadku odcinków jednorodnych dla każdej temperatury przebadano 24 próbki, natomiast w przypadku odcinków niejednorodnych 42 próbki. Ilość przebadanych próbek zależała od ilości wykonanych warstw na danym odcinku. Wartości podane w tablicy 4 są średnią z uzyskanych wyników dla 24 i 42 próbek.

Próbki pobrane z sekcji jednorodnych charakteryzują się wyższymi średnimi wartościami modułów sztywności oraz wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, przy zdecydowanie mniejszym rozrzucie wyników badań niż w przypadku próbek pobranych z sekcji niejednorodnych.

## Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych obserwacji terenowych i badań laboratoryjnych oraz wstępnej analizy, dotyczącej mechanizmu zaobserwowanych spękań poprzecznych, można stwierdzić że:

1. Spękania poprzeczne w podbudowie AC WMS mają charakter niskotemperaturowy; dotyczy to zarówno tych spękań, które pojawiły się w obrębie spoin technologicznych (*JLTC*), jak i zlokalizowanych poza nimi (*LTC*).
2. Spękania występują z różną częstotliwością na odcinkach 1, 2 i 3.
3. Podczas wykonywania odwiertów zaobserwowano, że niektóre spękania poprzeczne widoczne na powierzchni podbudowy sięgały do spodu warstw nawierzchni położonych poniżej warstw asfaltowych, to znaczy do podbudowy z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie

oraz warstwy technologicznej związanej cementem. Niektóre spękania występowały natomiast tylko w górnej warstwie podbudowy AC WMS i nie przechodziły do warstwy dolnej. Drugi przypadek występował również wtedy, gdy pomiędzy dwiema warstwami podbudowy AC WMS nie było pełnej szczepności międzywarstwowej.

4. Na podbudowie asfaltowej, charakteryzującej się większą jednorodnością struktury i tekstury oraz bardziej zamkniętą powierzchnią, obserwowano mniejszą liczbę spękań w stosunku do miejsc niejednorodnych.
5. W trzech miejscach, na dwanaście przebadanych, stwierdzono początek propagacji spękania typu *LTC* (poza spoinami) od góry, co jednoznacznie wskazywało na ich niskotemperaturowy charakter. Spękania w tych trzech miejscach nie sięgały do spodu warstwy AC WMS. W pozostałych miejscach stwierdzono propagację spękania przez całą wbudowaną warstwę.
6. W spękaniach występujących w spoinach technologicznych *JLTC* stwierdzono brak lepiszcza używanego do uszczelnienia połączenia. Świadczy to o tym, że warstwa była dobudowywana bez prawidłowego połączenia z wcześniej wykonaną warstwą asfaltową (fot. 11 i 14).
7. W kilku spękaniach, w spoinach technologicznych *JLTC*, stwierdzono nacięcia warstwy dolnej wykonane piłą, powstałe przy obcinaniu krawędzi warstwy górnej (fot. 13). Nacięcia te mogły inicjować spękanie termiczne tworząc efekt „karbu” i koncentracji naprężeń w strefie nacięcia.

Artykuł opracowano na podstawie referatu pt.: „Investigation of low-temperature cracking in newly constructed high modulus asphalt concrete base course of a motorway pavement” przygotowanego przez zespół w składzie Józef Judycki, Piotr Jaskuła, Bohdan Dołycki, Marek Pszczoła, Mariusz Jaczewski, Dawid Ryś, Marcin Stienss na konferencję European Asphalt Pavement Association w Sztokholmie w 2015 r.

## Bibliografia

- [1] J. Boratyński, *Design of asphalt mixes resistant to deformation and fatigue (presentation)*. PSWNA Seminar, Miedzeszyn, Poland 2012
- [2] J.F. Corté, *Development and Uses of Hard-Grade Asphalt and of High-Modulus Asphalt Mixes in France*. Transportation Research Circular, 503, Transportation Research Board, 2001
- [3] Instytut Badawczy Dróg i Mostów, WT-2 Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych. Warszawa 2008
- [4] J.C. Wielinski & G.A. Huber, *Evaluation of French High Modulus Asphalt (EME) in Pavement Structural Design (MEPDG)*. *Asphalt Paving Technology*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 80: 697–718, 2011