

**INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW**  
**Zakład Diagnostyki Nawierzchni**

**SPRAWOZDANIE**  
z realizacji pracy pt.:  
**„Analiza propagacji spękań nawierzchni z wykorzystaniem  
techniki radarowej”.**

---

**SPRAWOZDANIE CZĘŚCIOWE**  
Etap II – zadania 7 - 9

Zlecniodawca: Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad

Umowa nr 2192/2008 z dnia 11.08.2008 roku

Opracowali:

mgr inż. Jacek SUDYKA

dr Lech KRYSIŃSKI

mgr inż. Przemysław HARASIM

Eugeniusz MAJEWSKI

Jacek KUSIAK

Kierownik Zakładu

Diagnostyki Nawierzchni

mgr inż. Tomasz MECHOWSKI

Warszawa, listopad 2010

## Spis treści

<b>1</b>	<b>Wstęp</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Kontynuacja badań radarowych na wytypowanych odcinkach badawczych. ...</b>	<b>8</b>
<b>2.1</b>	<b>Ogólna charakterystyka georadarowa odcinków</b> .....	<b>10</b>
2.1.1	Odcinek A1_S .....	10
2.1.2	Odcinek A2_S .....	16
2.1.3	Odcinek A3_S .....	19
2.1.4	Odcinek B_S .....	22
2.1.5	Odcinek C_S .....	26
<b>2.2</b>	<b>Odcinek D_S</b> .....	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>Weryfikacja stanu spękań nawierzchni metodami klasycznymi. ....</b>	<b>32</b>
<b>4</b>	<b>Ocena parametrów mających wpływ na jakość uzyskiwanych danych z pomiarów radarowych w warunkach terenowych. ....</b>	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>Analiza porównawcza uzyskanych danych w okresie trzech lat od rozpoczęcia pomiarów</b> .....	<b>39</b>
5.1	Odcinki A1_S, A2_S i A1_S - drogi betonowe DK 22 .....	43
5.2	Odcinek B_S .....	48
5.3	Odcinek C_S .....	52
5.4	Odcinek D_S .....	62
<b>6</b>	<b>Analiza parametrów wejściowych w istniejących modelach degradacji nawierzchni pod kątem spękań i ich porównanie z uzyskanymi wynikami badań. ....</b>	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>Podsumowanie</b> .....	<b>72</b>

## Spis ilustracji

Rysunek 2.1 Lokalizacja odcinków wytypowanych do badań terenowych.....	8
Rysunek 2.2 Typowy wygląd uszczelnionego spoiwem nacięcia w warstwie asfaltowej wykonanego nad dylatacją w leżącym niżej betonie. Obok widoczna powstająca niezgodnie szczelina. ....	10
Rysunek 2.3 Wynik skanowania nawierzchni wzdłuż trzech równoległych profili pokazujący budowę sąsiedztwa odwiertu W1_A1_S (przed jego odwierceniem). ....	11
Rysunek 2.4 Poskładane (do konfiguracji pierwotnej) fragmenty rdzenia W1_A1_S (widoczny fragment deski szalunkowej, fragment łącznikowej rury zbrojeniowej, skorodowane fragmenty cienkich prętów zbrojeniowych jeden pod rurą, a drugi w spągu betonu, rozwierająca się ku dołowi szczelina w dolnych warstwach asfaltowych, rozległe zniszczenia ze zmianami mineralnymi na połączeniu warstw asfaltowych z warstwą betonową, a zachodzące głównie w stropie betonu), zbliżenie fragmentu górnego (z widoczną szczeliną biegnącą w dół od wypełnionego spoiwem nacięcia w warstwie ścieralnej) i widok na otwór tuż po odwierceniu (widoczny fragment deski szalunkowej w betonowym segmencie ściany otworu). ....	12
Rysunek 2.5 Echogram wzdłuż śladu prawego koła z naniesioną interpretacją budowy strefy wykruszeniowej w pobliżu odwiertu W1_A1_S wykonanego na dylatacji. Pozycja osi odwiertu zaznaczona jest pionową fioletową linią, deska szalunkowa pionową linią żółtą, strop betonu linią czarną, horyzonty pomiędzy warstwami asfaltowymi liniami szarymi, łącznikowa rura zbrojeniowa poziomą linią zieloną, pozycje poprzecznych prętów zbrojeniowych zielonymi kropkami. Obok (w niewłaściwych pozycjach) znajdują się: odpowiednio przeskalowany obraz rdzenia oraz fragment echogramu odpowiadający innej wybranej dylatacji na tym samym odcinku badawczym zestawione w celach porównawczych. ....	13
Rysunek 2.6 Lokalny echogram użyty do wstępnej lokalizacji pęknięcia, na którym zaplanowano odwiert kontrolny W2_A1_S.....	14
Rysunek 2.7 Zestawione echogramy wzdłuż trzech równoległych profili (środkowy wzdłuż śladu prawego koła, powyżej profil 50 cm na lewo od śladu, a poniżej profil 50 cm na prawo od śladu) rozpoznające szczegółowo sąsiedztwo zaplanowanego odwiertu W2_A1_S. ....	15
Rysunek 2.8 Sieć zaznaczonych punktów odniesienia użyta przy namierzaniu niewidocznego pęknięcia z precyzją kilkucentymetrową oraz widok otworu i fragmentów rdzenia W2_A1_S zaraz po odwierceniu. Na zdjęciu dolnym widoczne pęknięcie warstwy betonu. ....	16
Rysunek 2.9 Wynik skanowania wzdłuż trzech równoległych profili sąsiedztwa dwóch odwiertów sondujących niekę w stropie betonu w pobliżu dylatacji (dystans 5 metrów w lokalnym pikietażu) i typową strukturę tego odcinka. ....	17
Rysunek 2.10 Rdzenie uzyskane na odcinku badawczym A2_S.....	18
Rysunek 2.11 Zestawienie echogramu z przeskalowanymi fotografiami rdzeni odwierconych na tym samym profilu.....	18
Rysunek 2.12 Typowy obraz georadarowy szczeliny między płytowej (tzw. dylatacji) betonowej drogi DK 22 (Czersk). Widoczna jest pojedyncza hiperbola stropowa, podwójna replika na poziomie pośrednim (typu podwójnej hiperboli) oraz replika w spągu ) zapadnięta powierzchnia spągowa z dwoma pochylonymi skrzydłami, zmieniony typ refleksu spągowego pomiędzy podwójnym dodatnim, a wzmocnionym pojedynczym ujemnym oraz słabe ślady hiperbol o wierzchołkach usytuowanych w spągu). ....	19
Rysunek 2.13 Typowy obraz georadarowy pionowego, poprzecznego pęknięcia betonowej drogi DK 22 (Czersk). Widoczna jest pojedyncza hiperbola stropowa oraz replika w spągu (zapadnięta powierzchnia spągowa z dwoma pochylonymi skrzydłami, zmieniony typ refleksu spągowego z pojedynczego ujemnego	

na podwójny dodatni oraz słabe ślady pół-hiperbol o wierzchołkach usytuowanych w spągu w miejscu połączenia pochylonych skrzydeł zagłębienia).	21
Rysunek 2.14 Echogramy szczelin między-płytowych o większej komplikacji struktury	22
Rysunek 2.15 Echogramy uzyskane w sąsiedztwie spękań poprzecznych na odcinku B_S	23
Rysunek 2.16 Echogramy lokalne uzyskane na trzech równoległych profilach w sąsiedztwie wiercenia W1_B_S wykonanego na szczelinie (nr. 2) na odcinku B_S; górny (po lewej stronie śladu prawego koła w odległości 80 cm od tego śladu), środkowy (wzdłuż śladu prawego koła) i dolny (80 cm na prawo od prawego śladu).	24
Rysunek 2.17 Miejsce wykonania wiercenia W1_B_S (po lewej, trzy kreski oznaczają kierunki i pozycje trzech równoległych profili, a na środkowej w miejscu jej przecięcia z pęknięciem zostało wykonane wiercenie) oraz uzyskany rdzeń (po prawej)	24
Rysunek 2.18 Echogram lokalny uzyskany w sąsiedztwie wiercenia W2_B_S wykonanego w miejscu dalekim od szczelin i pozbawionym znamion defektów między-warstwowych na odcinku B_S. Widoczna jest kratka złożona z dwóch rodzin ukośnych linii będąca sygnałem reprezentującym strukturę ośrodka, zapewne jego granulację o dużej skali. Kratka ta stanowi sygnał maskujący utrudniający poważnie detekcję szczelin.	25
Rysunek 2.19 Rdzeń W2_B_S pobrany w miejscu pozbawionym spękań i nie wskazującym na obecność odspojień lub innych osobliwości budowy nawierzchni na odcinku B_S (DK 7, Cedry Małe). Reprezentuje on typową, zdrową nawierzchnię tego odcinka. Dobrze widoczne nowe warstwy asfaltowe, podbudowa MCE, a pod nią relikty dawnej nawierzchni zaczynający się warstwą ścierną i wiążącą.	26
Rysunek 2.20 Przykłady silnych <i>choinkowych układów refleksów</i> rozproszeniowych o kształcie hiperbolicznym	27
Rysunek 2.21 Przykład silnej grupy pionowej skupionych (o dobrej lokalizacji poziomej) refleksów sugerujących obecność defektów (zaburzeń regularnej, warstwowej struktury ośrodka) położonych jeden nad drugim, czyli niemal pionowo.	29
Rysunek 2.22 Echogramy uzyskane w pobliżu miejsc, gdzie występują spękania na odcinku badawczym D_S (DK 50, koło Kołbieli).	31
Rysunek 3.1 Wielofunkcyjny pojazd pomiarowy MFV	32
Rysunek 3.2 HDI – zasada działania	33
Rysunek 3.3 Fotorejestracja powierzchni nawierzchni	33
Rysunek 3.4 Fotorejestracja pasa drogowego (odcinek C_S)	33
Rysunek 3.5 Przykład identyfikacji spękań nawierzchni (fragment nawierzchni odcinka A3_S)	34
Rysunek 4.1 Krzywe kalibracyjne różnych pomiarów dystansu oparte o spękania obserwowane zarówno na powierzchni jak i zapisie georadarowym na odcinku A1_S drogi DK22, przed korektą (rysunek lewy) oraz po usunięciu błędów identyfikacji (rysunek prawy).	39
Rysunek 5.1 Echogramy uzyskane w latach 2010 (echogram górny) i 2011 (echogram dolny) A1_S	40
Rysunek 5.2 Echogramy uzyskane w latach 2010 (echogram górny) i 2011 (echogram dolny) A2_S	41
Rysunek 5.3 Echogramy uzyskane w latach 2010 (echogram górny) i 2011 (echogram dolny) A3_S	41
Rysunek 5.4 Echogramy uzyskane w latach 2010 (echogram górny) i 2011 (echogram dolny) B_S	42
Rysunek 5.5 Echogramy uzyskane w latach 2010 (echogram górny) i 2011 (echogram dolny) C_S	42
Rysunek 5.6 Echogramy uzyskane w latach 2010 (echogram górny) i 2011 (echogram dolny) D_S	43
Rysunek 5.7 Krzywe kalibracyjne różnych pomiarów dystansu oparte o spękania skorelowane w stopniu wystarczająco poprawnym na trzech odcinkach drogi DK22: A1_S, A2_S oraz A3_S	44



Rysunek 5.8 Histogramy nasileni georadarowych przejawów spękań poprzecznych (wraz z dylatacjami) w nawierzchniach trzech badanych odcinków betonowych. ....	45
Rysunek 5.9 Zbiorczy histogram nasileni georadarowych przejawów spękań poprzecznych (wraz z dylatacjami) w nawierzchniach betonowych. ....	45
Rysunek 5.10 Przykład lokalnego defektu na horyzoncie międzywarstwowym, który choć w roku 2010 odnotowany został jedynie na echogramie (dolny), uległ lokalnemu wzmocnieniu i objawił się także na powierzchni jako spękanie S08e (dystans 738 m) w roku 2011. ....	49
Rysunek 5.11 Przykład spękania S05 (348.7 m) zanotowanego już w roku 2010, któremu towarzyszy na echogramie wyraźny defekt lokalny na horyzoncie odpowiadającym granicy między górnymi warstwami asfaltowymi, a podbudową MCE (około 20 cm głębokości). ....	49
Rysunek 5.12 Przykład lokalnego defektu na horyzoncie międzywarstwowym, który choć odnotowany na echogramie w roku 2010 (dolny) uległ lokalnemu wzmocnieniu i objawił się także na powierzchni jako spękanie S08f (dystans 773 m) w roku 2011. ....	50
Rysunek 5.13 Krzywe kalibracyjne przeliczania wyników pomiaru dystansu na odcinku B_S różnymi metodami: pomiar kółkiem mierniczym w roku 2010 (D2010), pomiar profilografem w roku 2011 (D2011), pomiary dystansomierzem georadaru po wzajemnej synchronizacji (DGPR). ....	51
Rysunek 5.14 Górny: Histogram nasilenia georadarowych przejawów spękań poprzecznych na odcinku B_S widocznych na powierzchni i przechodzących przez ślad prawego koła prawego pasa nawierzchni (ograniczona tablica korelacyjna tj. bez spękań podłużnych). Dolny: Korelacja nasilenia i natężenia spękań poprzecznych; liczby na wykresie oznaczają liczby przypadków, linia czerwona to regresja liniowa, a linia niebieska to dopasowana zależność proporcjonalna. ....	52
Rysunek 5.15 Krzywe kalibracyjne przeliczania wyników pomiaru dystansu na odcinku C_S różnymi metodami: pomiar kółkiem mierniczym w roku 2010 (D2010), pomiar kółkiem mierniczym w roku 2011 (D2011), pomiary dystansomierzem georadaru po wzajemnej synchronizacji (DGPR). ....	54
Rysunek 5.16 Histogram nasilenia georadarowych przejawów spękań poprzecznych na odcinku C_S widocznych na powierzchni i przechodzących przynajmniej częściowo przez skanowaną strefę lewego pasa nawierzchni (ograniczona tablica korelacyjna). ....	54
Rysunek 5.17 Echogram w pobliżu wiercenia W1_C_S i wygląd bocznej powierzchni rdzenia z powiększeniem poszerzonej i wypełnionej materiałem ilastym szczeliny w dolnych warstwach asfaltowych. ....	57
Rysunek 5.18 Echogram w pobliżu wiercenia W2_C_S i wygląd zrekonstruowanego z fragmentów rdzenia oraz fotografia wnętrza otworu. ....	58
Rysunek 5.19 Echogramy wykonane w pobliżu wiercenia W3_C_S i wygląd poskładanego z fragmentów rdzenia (warstwy asfaltowe i fragment podbudowy), powiększenie powierzchni szerokiej szczeliny głównej pęknięcia w dolnych warstwach asfaltowych (pod małym fragmentem rdzenia) wypełnionej materiałem ilastym oraz fotografia wnętrza otworu. ....	59
Rysunek 5.20 Echogramy wykonane w pobliżu wiercenia W4_C_S i wygląd zrekonstruowanego z fragmentów rdzenia oraz fotografia wnętrza otworu. ....	60
Rysunek 5.21 Zestawienie czterech rdzeni ustawionych na swoich powierzchniach górnych. ....	61
Rysunek 5.22 Trzy echogramy (antena 1 GHz) z odcinka C_S w pobliżu odwiertów W1_C_S, W2_C_S, W3_C_S pokazujący lokalne, wzmożone emisje z poziomu granicy pomiędzy nakładką, a dawniejszymi warstwami asfaltowymi (około 10 cm głębokości) odpowiadające rozległym strefom zniszczeniowym spękań S10, S11 i S12. ....	61

Rysunek 5.23 Powiększony fragment środkowego echogramu (profil B; antena 1 GHz) po odwiltorowaniu sygnału płaskiej struktury warstwowej górnego pakietu asfaltowego, z wyraźnie widocznymi, lokalnymi zaburzeniami na głębokości około 12 cm odpowiadającymi spękaniami S10, S11, S12 (odpowiednio odwierty W1_C_S, W2_C_S, W3_C_S).....	62
Rysunek 5.24 Krzywe kalibracyjne przeliczenia wyników pomiaru dystansu na odcinku D_S różnymi metodami: pomiar kółkiem mierniczym w roku 2010 (D2010), pomiar kółkiem mierniczym w roku 2011 (D2011), pomiary dystansomierzem georadaru po wzajemnej synchronizacji (DGPR). .....	63
Rysunek 5.25 Histogram nasilenia georadarowych przejawów widocznych spękań poprzecznych na odcinku D_S.....	63
Rysunek 5.26 Przykłady słabych objawów spękań w obrazie georadarowym na odcinku D_S. ....	64
Rysunek 5.27 Przykłady skupionych stref zaburzonych Zs na odcinku D_S.....	65
Rysunek 5.28 Przykłady rozproszonych stref zaburzonych Zr na odcinku D_S.....	66
Rysunek 5.29 Wygląd stref zaburzonych (dystanse około 720, 760, 785 m) na dłuższym fragmencie echogramu. ....	67
Rysunek 6.1 Porównanie mierzonych i przewidywanych długości pęknięć podłużnych (pęknięcia z góry do dołu) wynikające z procesu globalnej kalibracji. ....	69
Rysunek 6.2 Porównanie zmierzonych i przewidywanych pęknięć poprzecznych z procesu globalnej kalibracji.....	69
Rysunek 6.3 Regresja liniowa dla prognozowanego i obserwowanego czasu do powstania pęknięć na nawierzchniach.....	71
Rysunek 6.4 Regresja liniowa między prognozowanymi i obserwowanymi rocznymi przyrostami powierzchni wszystkich pęknięć dla współczynnika kalibracji 0.86.....	71

## Spis tabel

Tabela 2.1 Wytypowane odcinki dróg.....	8
Tabela 5.1 Tablica korelacyjna spękań, nacięć i dylatacji - odcinek A1_S.....	46
Tabela 5.2 Tablica korelacyjna spękań, nacięć i dylatacji - odcinek A2_S.....	47
Tabela 5.3 Tablica korelacyjna spękań, nacięć i dylatacji - odcinek A3_S.....	48
Tabela 5.4 Tablica korelacyjna spękań - odcinek B_S.....	51
Tabela 5.5 Tablica korelacyjna spękań - odcinek C_S.....	55
Tabela 5.6 Ograniczona tablica korelacyjna spękań odcinka C_S zawierająca wyłącznie spękania, które uwidoczniły się na powierzchni i przechodzą przynajmniej częściowo przez skanowaną strefę nawierzchni na lewym pasie ruchu (śląd prawego koła i środek pasa). ....	56
Tabela 5.7 Ograniczona tablica korelacyjna spękań odcinka D_S zawierająca wyłącznie spękania, które uwidoczniły się na powierzchni i przechodzą przynajmniej częściowo przez skanowaną strefę nawierzchni na lewym pasie ruchu (śląd prawego koła i środek pasa). ....	63

## 1 Wstęp

Jednym z najczęściej występujących uszkodzeń nawierzchni są spękania. Uszkodzenia te są efektem różnych mechanizmów zachodzących w nawierzchni. Z punktu widzenia użytkownika drogi spękania w niewielkim stopniu wpływają na komfort i bezpieczeństwo jazdy. W przypadku zarządzającego drogą pojawienie się na odcinku tego rodzaju uszkodzeń jest sygnałem świadczącym o niewłaściwej pracy nawierzchni, która w dłuższej perspektywie czasu będzie ulegać przyśpieszonej degradacji. Dlatego w metodach projektowania jak i systemach zarządzania wyniki oceny intensywności i natężenia spękań są podstawowymi kryteriami zniszczenia nawierzchni.

Badania tego typu uszkodzeń, metody oceny i sposoby interpretacji uzyskiwanych wyników od lat są przedmiotem wielu publikacji. Ważnym elementem w procesie oceny stanu nawierzchni pod kątem spękań jest prawidłowa, wczesna ich identyfikacja. W ostatnich latach szczególnego tempa rozwoju nabrały metody diagnostyczne oparte na półautomatycznych lub automatycznych metodach identyfikacji. Są to przede wszystkim metody działające w oparciu o techniki wizyjne, w których wykorzystuje się technologie szybkiej obróbki obrazów cyfrowych o wysokiej rozdzielczości. Szybki rozwój technologii cyfrowych pozwala na wdrożenie także innej, nieniszczącej metody pomiarowej. Technika radarowa GPR (Ground Penetrating Radar) daje możliwości identyfikacji uszkodzeń powierzchniowych takich jak rozwarstwienia, ubytki powierzchniowe, spękania, jednorodność zagęszczenia i stopień zawilgocenia.

W trzecim i ostatnim roku prac badawczych kontynuowano badania terenowe mające na celu rozpoznanie możliwości techniki georadarowej w diagnostyce spękań poprzecznych nawierzchni drogowych. W tym celu na wytypowanych wcześniej odcinkach badawczych wykonano szczegółowe skanowania (o podwyższonej gęstości skanów na jednostkę długości) i wizualną inwentaryzację spękań. Wykonano interpretacje echogramów wraz z próbami ich korelacji z katalogiem widocznych spękań. Próby te ujawniły poważne niezgodności pomiędzy różnymi metodami pomiaru położenia wzdłuż drogi. Przeprowadzono także dalsze wiercenia mające na celu rozpoznanie wglębnej budowy wybranych struktur powiązanych z problematyką diagnozy spękań. Pomiary wykonywano zgodnie z metodyką opracowaną po drugim etapie badań.

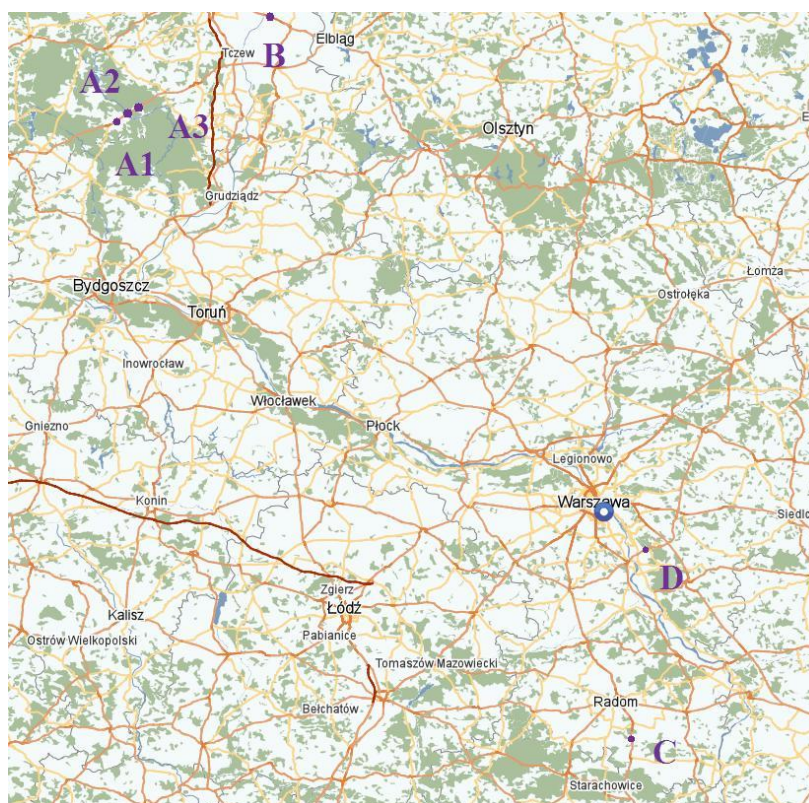
Pomimo złożoności zagadnienia i związanych z tym problemów interpretacyjnych przeprowadzone badania i analizy doprowadziły do określenia kryteriów diagnostycznych opisujących sposób w jaki pęknięcie przejawia się w obrazie georadarowym. Jednocześnie potwierdzono skuteczność metodyki pomiarowej przyjętej we wcześniejszym etapie pracy.

## 2 Kontynuacja badań radarowych na wytypowanych odcinkach badawczych.

Badania terenowe na wytypowanych odcinkach dróg (Tabela 2.1 oraz Rysunek 2.1) prowadzono w latach 2009-2011. Odcinki przewidziane do badań zostały wyselekcjonowane z pośród kilkunastu odcinków zgłoszonych przez Oddziały GDDKiA.

Tabela 2.1 Wytypowane odcinki dróg

Oznaczenie odcinka	Lokalizacja	Pikietaż [km]		uwagi
		początek	koniec	
A1_S	DK 22	271+500	271+000	strona lewa (w śladzie prawego koła)
A2_S	DK 22	269+000	268+500	strona lewa (w śladzie prawego koła)
A3_S	DK 22	278+800	279+000	strona prawa (w śladzie prawego koła)
B_S	DK 7	38+000	39+000	strona prawa (w śladzie prawego koła)
C_S	DK 9	30+000	28+800	strona lewa (w śladzie prawego koła)
D_S	DK 50	193+800	193+000	strona lewa ( w śladzie prawego koła)



Rysunek 2.1 Lokalizacja odcinków wytypowanych do badań terenowych

Większość wytypowanych odcinków w momencie rozpoczęcia pomiarów posiadała nawierzchnię nową, użytą ok. 3-4 lat. Wyjątkiem jest odcinek A3\_S (nawierzchnia betonowa), którego nawierzchnia poddana jest długiemu, kilkudziesięcioletniemu okresowi eksploatacji. Wybrane odcinki charakteryzują się następującą konstrukcją:

- A1\_S i A2\_S – asfaltowa warstwa ścieralna o grubości 4 cm ułożona na istniejącej nawierzchni z betonu cementowego; w miejscach dylatacji warstwy betonowej wykonano nacięcia warstwy ścieralnej; w chwili obecnej nawierzchnia bez widocznych uszkodzeń,
- A3\_S – nawierzchnia betonowa o grubości ok. 22 cm z licznymi spękaniem poprzecznymi i ukośnymi oraz uszkodzeniami w obrębie dylatacji,
- B\_S – pakiet warstw asfaltowych o grubości ok. 21 cm ułożony na warstwie MCE o grubości ok. 16 cm, poniżej istniejąca nawierzchnia (wg. uzyskanych informacji nawierzchnia przed remontem charakteryzowała się licznymi uszkodzeniami, w tym spękaniem poprzecznymi); na odcinku stwierdzono spękania poprzeczne już na etapie badań odbiorczych w 2006 roku; w chwili obecnej nawierzchnia posiada pojedyncze spękania poprzeczne,
- C\_S – nawierzchnia asfaltowa o grubości ok. 10 cm, wykonana jako nakładka istniejącej nawierzchni asfaltowej o grubości ok. 15 cm ułożonej na warstwie chudego betonu; przed remontem odcinek charakteryzował się licznymi spękaniem poprzecznymi; w chwili obecnej nawierzchnia posiada pojedyncze spękania poprzeczne,
- D\_S - nawierzchnia asfaltowa o grubości łącznej ok. 21 cm, wykonana jako nakładka istniejącej nawierzchni asfaltowej o grubości ok. 14 cm ułożonej na warstwie betonu cementowego; przed remontem odcinek charakteryzował się licznymi spękaniem poprzecznymi, szybko odtwarzającymi się po wykonanych wcześniej odnowach; w chwili obecnej nawierzchnia bez widocznych uszkodzeń.

Ostatnia seria badań georadarowych w terenie wykonana została na wszystkich odcinkach testowych według procedury opracowanej na podstawie pomiarów w ramach drugiego etapu pracy. Procedura ta polega ona na wykonaniu skanów o podwyższonej gęstości w co najmniej trzech równoległych, biegnących blisko siebie profilach (w odległości około 50 cm jeden od sąsiedniego). Zestawienie takich echogramów daje potwierdzenie, czy znamiona diagnostyczne występują przy tym samym dystansie na sąsiednich profilach. Takie potwierdzenie poprzecznej rozciągłości bardzo lokalnej struktury jest bardzo dużą pomocą w uzasadnieniu przypuszczenia o pęknięciu, szczególnie w przypadkach o słabej manifestacji.

Pojedyncze skanowania całego odcinka, wzdłuż śladu prawego koła wykonywano w ramach etapu rozpoznawczego, z jednej strony do prawidłowego udokumentowania hiperbol rozproszeniowych, a z drugiej strony w celu redukcji szumów niekoherentnych, które poważnie utrudniają identyfikację hiperbol mających zwykle bardzo małą amplitudę sygnału. Celem takiego wstępnego rozpoznania była obserwacja sygnałów spękań objawiających się w formie hiperbol oraz ich ewentualnej korelacji z pozycjami spękań widocznych na powierzchni. Kluczowe w tym wypadku są miejsca, gdzie nie występują pęknięcia powierzchniowe, natomiast pojawiają się georadarowe sygnały wskazujące na pęknięcia ukryte, które nie pojawiły się jeszcze na powierzchni.

W celu precyzyjnej lokalizacji poszukiwanego elementu struktury i rozpoznania otoczenia miejsca wiercenia skanowania georadarowe były przeprowadzane także na bardzo krótkich, kilkumetrowych odcinkach, z użyciem skrajnie wysokiej gęstości 500 skanów na metr, zwykle w trzech równoległych bliskich sobie profilach i tuż przed wykonaniem wiercenia. Warto tu zaznaczyć, że ta procedura często daje niespodziewane wyniki odsłaniając szczegóły struktury, których interpretator nie stwierdza przy analizie pojedynczego echogramu o mniejszej rozdzielczości.

## 2.1 Ogólna charakterystyka georadarowa odcinków

### 2.1.1 Odcinek A1\_S

Nawierzchnię odcinka A1\_S (w pobliżu Gutowca po wschodniej stronie, 271+500 do 271+000, lewa strona drogi, ślad prawego koła) stanowią warstwy podbudowy istniejącej nawierzchni betonowej oraz warstwa ścieralna o grubości około 3÷4 cm. W miejscach napraw wykonanych przed ułożeniem warstwy ścieralnej zastosowano asfaltową warstwę wyrównującą. Łączna grubość warstw asfaltowych w tych miejscach ma około 5÷7 cm grubości.

Materiał warstw asfaltowych w swej części spągowej stanowi w szczególności wypełnienie niecek na powierzchni betonu, najczęściej w otoczeniu dylatacji i mniejszych rozmiarami ubytków, u szczytu pęknięć wewnątrz-płytowych tam, gdzie pęknięcia te dochodzą do powierzchni płyty betonowej. Na odcinku zostały wykonane liniowe nacięcia poprzeczne o szerokości 1 cm w pobliżu dylatacji płyt istniejącej nawierzchni betonowej i wypełnione lepiszczem (Rysunek 2.2). Technika ta ma za zadanie zapobieganie rozszerzaniu się strefy spękań powstającej w segmencie asfaltowym w pobliżu aktywnej ze swej natury dylatacji.

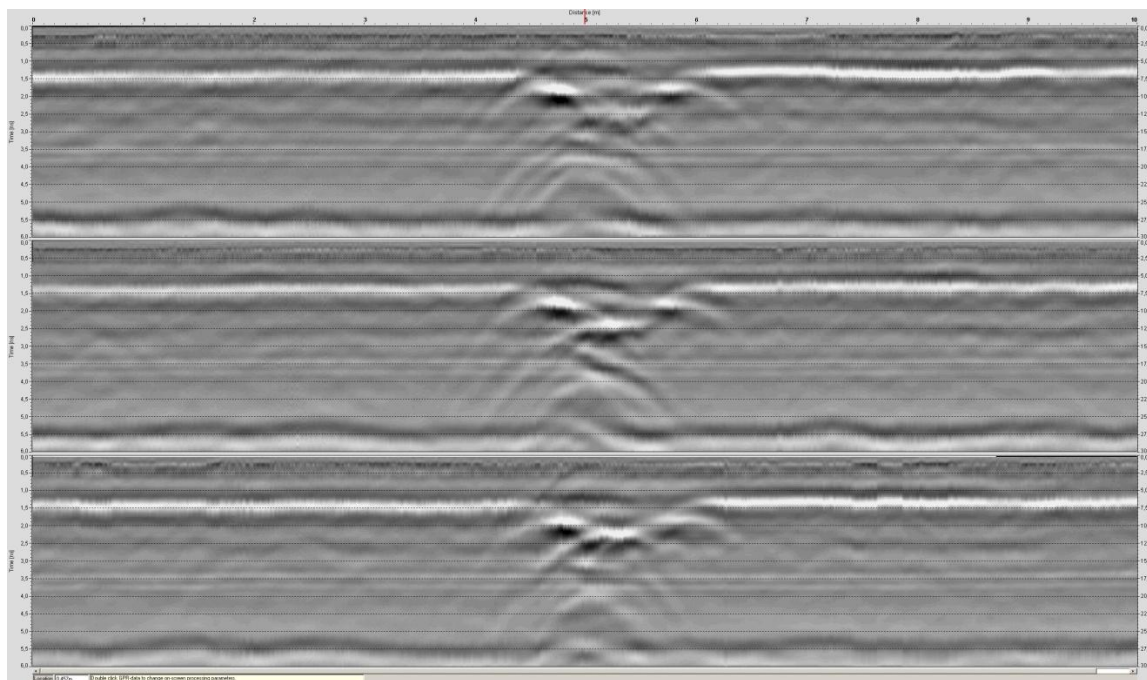


Rysunek 2.2 Typowy wygląd uszczelnionego spoiwem nacięcia w warstwie asfaltowej wykonanego nad dylatacją w leżącym niżej betonie. Obok widoczna powstająca niezgodnie szczelina.

Wykonanie wiercenie W1\_A1\_S zaplanowano w miejscu jednej z dylatacji w celu rozpoznania typowej struktury takiej szczeliny i zjawisk odpowiedzialnych za generację



nadzwyczaj silnych obrazów rozproszeniowych. Miejsce wybrane jako reprezentatywne na podstawie wcześniejszego, wstępnego i poddanego dokładnemu przeglądowi skanowania, zostało przed wierceniem rozpoznane szczegółowo przez wykonanie wysoko-rozdzielczego skanowania. Dzięki odpowiedniej konfiguracji zsynchronizowane echogramy (Rysunek 2.3) odpowiadające trzem profilom pomiarowym dały wgląd w kontynuację badanej struktury w kierunku poprzecznym do osi profili.



Rysunek 2.3 Wynik skanowania nawierzchni wzdłuż trzech równoległych profili pokazujący budowę sąsiedztwa odwiertu W1\_A1\_S (przed jego odwierceniem).

Szczegółowe skanowanie uwidocznilo także w bardziej wyraźny sposób złożoną budowę otoczenia dylatacji. W stropie warstwy betonowej mamy do czynienia z wielowarstwowym układem o szerokości niemal 1.5 metra, wypełnionym mieszanką asfaltową. Echogram ukazuje zarówno powierzchnie kolejnych warstw jak i horyzonty pomiędzy nimi. Widać ponadto, że wierzchołkami hiperbol (lub pół-hyperbol) rozproszeniowych są krawędzie kolejnych warstw. W strefie osiowej szczeliny mamy do czynienia z licznymi centrami rozproszeniowymi, także na głębokościach odpowiadających segmentowi betonowemu.

Wiercenie rozpoznawcze W1\_A1\_S (Rysunek 2.4) wykonane w śladzie prawego koła ukazało nadzwyczajne bogactwo strukturalne i bogatą historię strefy dylatacji, potwierdzając interpretację echogramów i nadając wielu jej elementom realne znaczenia konstrukcyjne. W budowie rdzenia widoczne jest wypełnione lepiszczem nacięcie górnej warstwy ścieralnej oraz rozwierające się ku dołowi pęknięcie tnące dolną warstwę ścieralną i niżej leżące asfaltowe wypełnienie niecki; górny fragment rdzenia nie rozpadł się jednak wzdłuż szczeliny.

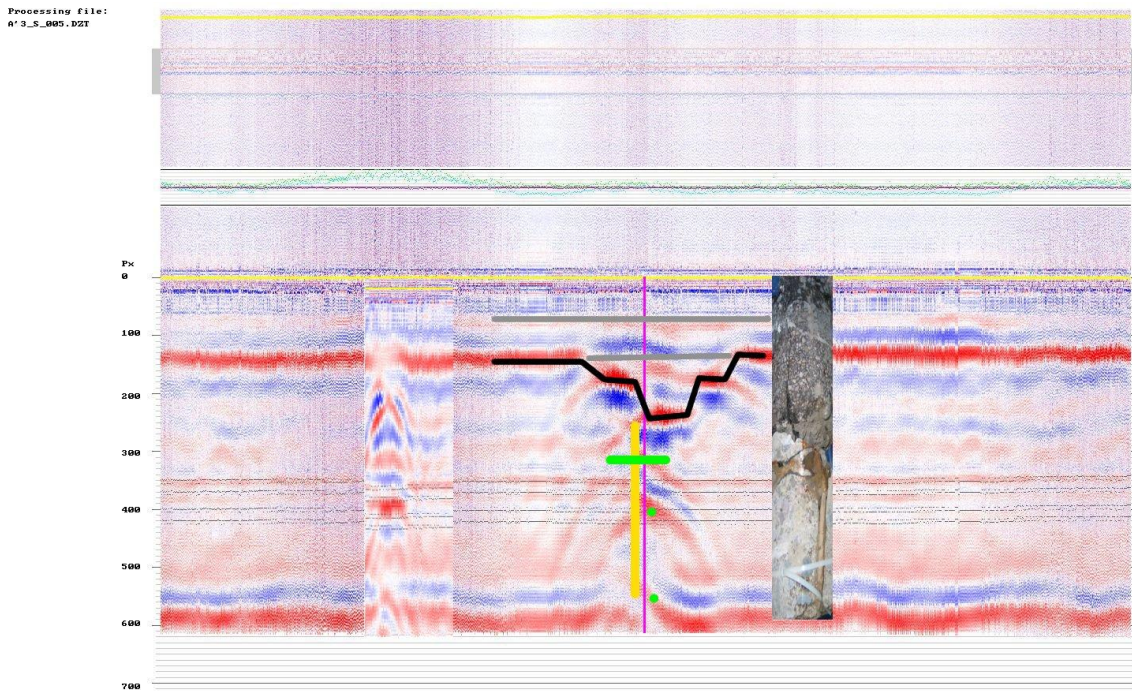


Rysunek 2.4 Poskładane (do konfiguracji pierwotnej) fragmenty rdzenia W1\_A1\_S (widoczny fragment deski szalunkowej, fragment łącznikowej rury zbrojeniowej, skorodowane fragmenty cienkich prętów zbrojeniowych jeden pod rurą, a drugi w spągu betonu, rozwierająca się ku dołowi szczelina w dolnych warstwach asfaltowych, rozległe zniszczenia ze zmianami mineralnymi na połączeniu warstw asfaltowych z warstwą betonową, a zachodzące głównie w stropie betonu), zbliżenie fragmentu górnego (z widoczną szczeliną biegnącą w dół od wypełnionego spoiwem nacięcia w warstwie ścieralnej) i widok na otwór tuż po odwierceni (widoczny fragment deski szalunkowej w betonowym segmencie ściany otworu).

W tym przypadku mamy do czynienia z bardzo silnym sygnałem rozproszeniowym, którego źródłem jest osobliwość struktury usytuowana na granicy betonu i asfaltu. Obiekt ten może być przeoczony, jako że uległ niemal całkowitemu wykruszeniu w trakcie wiercenia. Jest nim duża strefa zniszczeń w stropie betonu rozciągająca się wzdłuż dylatacji. Zniszczeniowa osobliwość tej strefy staje się jeszcze bardziej czytelna przy śledzeniu powierzchni odspojenia poza strefą wykruszenia. Powierzchnia ta przecina zarówno warstwę asfaltową jak i betonową nie sugerując żadnego osłabienia na powierzchni kontaktu warstw.

Zmiany materiałowe w stropie betonu zachodzące w pobliżu dylatacji mogą być także odpowiedzialne za zmianę typu refleksu odpowiadającego granicy pomiędzy betonem i asfaltem. W obszarach między warstwowymi nawierzchni betonowej refleks ten jest pojedynczym refleksem dodatnim, zaś kolejne warstwy asfaltowe stanowiące wypełnienie w obszarze remontowanych dylatacji charakteryzują się wyraźnym refleksem podwójnym dodatnim, co pozostaje w zgodności z przypuszczeniem o istotnej obecności wody (w porach lub wody w minerałach ilastych) na tej granicy. Spostrzeżenia dotyczące budowy otoczenia dylatacji, jakie poczyniono na podstawie echogramów i wiercenia zostały zebrane w formie szkicu na tle echogramu (Rysunek 2.5).



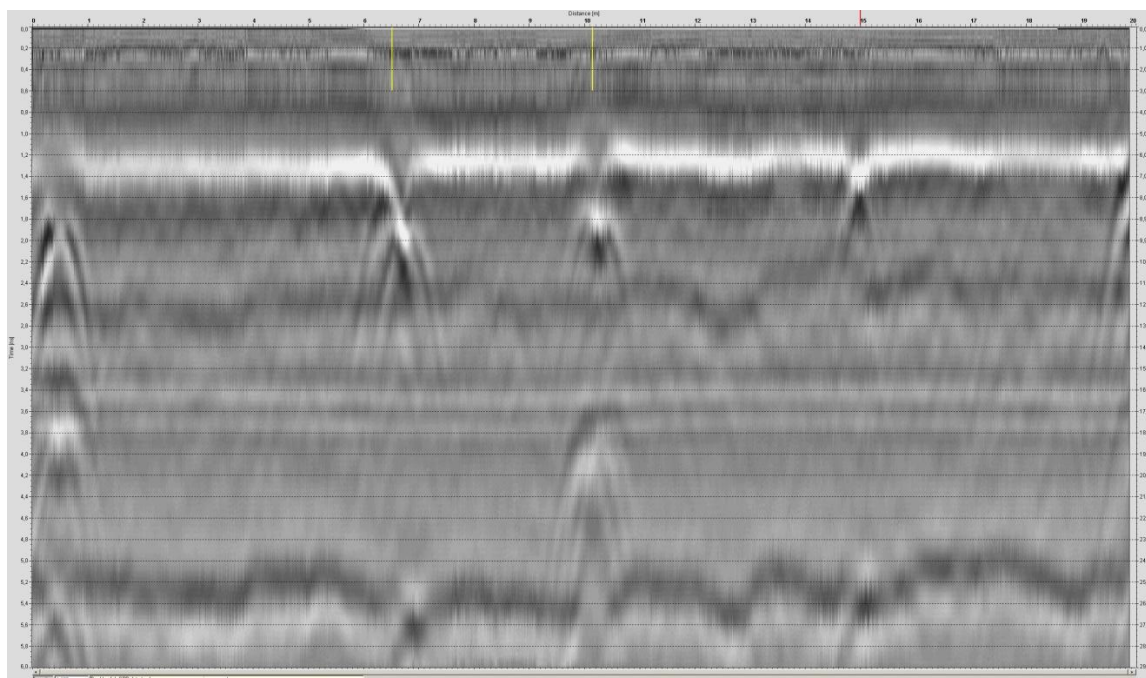


Rysunek 2.5 Echogram wzdłuż śladu prawego koła z naniesioną interpretacją budowy strefy wykruszeniowej w pobliżu odwiertu W1\_A1\_S wykonanego na dylatacji. Pozycja osi odwiertu zaznaczona jest pionową fioletową linią, deska szalunkowa pionową linią żółtą, strop betonu linią czarną, horyzonty pomiędzy warstwami asfaltowymi liniami szarymi, łącznikowa rura zbrojeniowa poziomą linią zieloną, pozycje poprzecznych prętów zbrojeniowych zielonymi kropkami. Obok (w niewłaściwych pozycjach) znajdują się: odpowiednio przeskalowany obraz rdzenia oraz fragment echogramu odpowiadający innej wybranej dylatacji na tym samym odcinku badawczym zestawione w celach porównawczych.

Osobną kategorię zjawisk stanowią deformacje kształtu powierzchni spągowej betonu i osobliwości występujące na tej powierzchni w pobliżu dylatacji, które są odpowiedzialne za generację hiperbol spągowych (o wierzchołku usytuowanym w spągu). Uzyskane echogramy kończą się na refleksie spągowym i hiperbole nie są widoczne w tym wypadku. Widoczna jest jedynie prawie punktowa komplikacja kształtu powierzchni spągowej, która może być jednocześnie wierzchołkiem hiperboli. Rdzeń W1\_A1\_S, który zawiera powierzchnię spągową potwierdza, że w tym przypadku możemy mieć do czynienia z sytuacją najprostszą, gdzie dylatacja kończy się nagle na powierzchni spągowej bez dodatkowych komplikacji struktury w otoczeniu dna szczeliny. Takie proste dno szczeliny jest potencjalnym źródłem jednej słabej hiperboli spągowej.

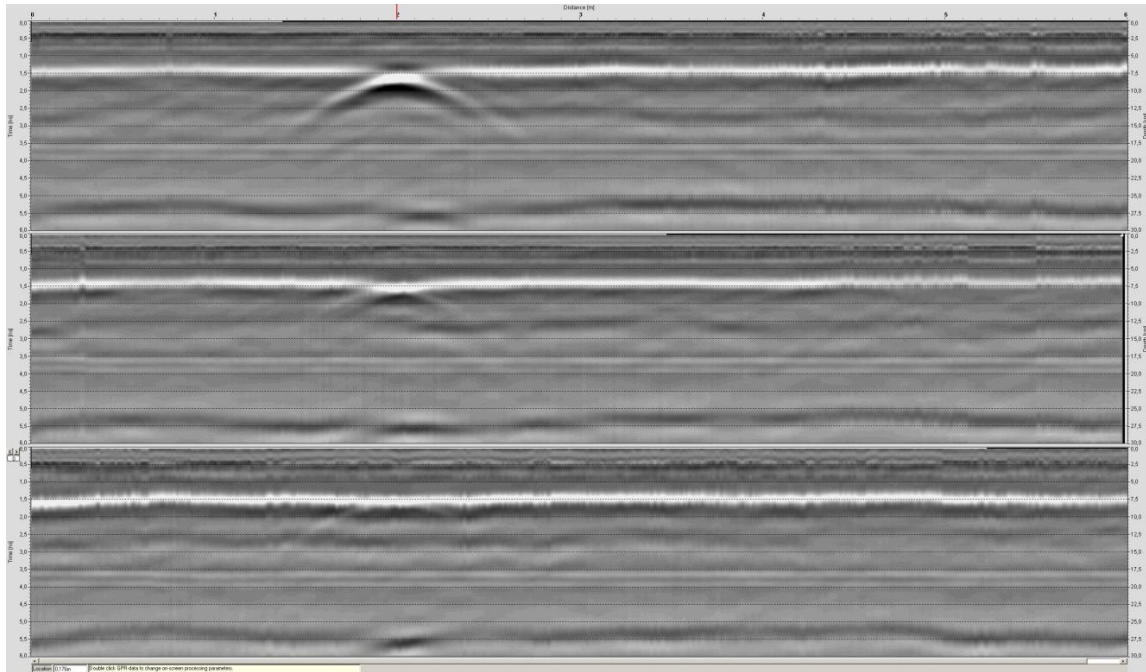
Jednym z założeń, które zrealizowano na tym odcinku było potwierdzenie możliwości przyjętej metodyki pomiarowej w zakresie precyzyjnego wskazywania pęknięć. Niska precyzja i poważne niezgodności pomiędzy różnymi sposobami pomiaru pęknięć, niepewność zaznaczeń wykonywanych w trakcie pomiaru z samochodu (możliwość pomylenia zaznaczeń odpowiadających nacięciom i słupkom) powodują, że zachodzi możliwość popełnienia bardzo dużego błędu, zaś znaczniki, dylatacje i słupki nie dają szans na lokalizację wąskiej szczeliny nawet z precyzją metrową. Wykonano

zatem najpierw skanowanie wstępne dwudziesto metrowego fragmentu w pobliżu końca odcinka badawczego, gdzie znajduje się wybrane pęknięcie (Rysunek 2.6). Echogram porównano pod względem charakterystycznego układu obrazów pięciu szczelin z wcześniejszym echogramem ogólnym. Wybrane pęknięcie jest widoczne jako czwarte od lewej strony około piętnastego metra od początku lokalnego profilu. Jest to o tyle typowe pęknięcie, że nie posiada repliki na głębokości kilkunastu centymetrów. Jego specyficzną własnością jest niemal punktowy rozmiar w płaszczyźnie przekroju sugerowany jedną jedynie hiperbolą o wierzchołku usytuowanym na granicy asfaltu i betonu. Na echogramie ogólnym został zauważony nieznacznie przesunięty w prawo przejaw repliki spągowej (prawdopodobnie wierzchołka hiperboli spągowej), który oznaczałby, że przypuszczalne pęknięcie którego szczytem jest wierzchołek hiperboli stropowej tnie warstwę betonu na wskroś, aż do repliki spągowej. Z tych powodów był to interesujący przykład, bo możliwy do uchwycenia za pomocą wiercenia.



Rysunek 2.6 Lokalny echogram użyty do wstępnej lokalizacji pęknięcia, na którym zaplanowano odwiert kontrolny W2\_A1\_S

Po identyfikacji miejsca wykonano precyzyjne namierzenie wraz ze szczegółowym rozpoznaniem najbliższego otoczenia wiercenia, za pomocą wysokorozdzielczego skanowania (500 skanów na metr) w trzech równoległych profilach o długości 6 metrów każdy, z których boczne (flankowe) były oddalone o 50 cm od centralnego biegnącego wzdłuż śladu prawego koła (Rysunek 2.7).



Rysunek 2.7 Zestawione echogramy wzdłuż trzech równoległych profili (środkowy wzdłuż śladu prawego koła, powyżej profil 50 cm na lewo od śladu, a poniżej profil 50 cm na prawo od śladu) rozpoznające szczegółowo sąsiedztwo zaplanowanego odwiertu W2\_A1\_S.

Skanowanie potwierdziło poprzeczną kontynuację badanej struktury. Hiperbole stropowe występują na wszystkich profilach w tych samych pozycjach. Podobnie na każdym profilu występuje replika spągowa, przy czym odsuwa się ona nieznacznie od osi hiperboli stropowej, gdy przesuwamy się w stronę osi jezdni (przechodząc z profilu na profil). Choć tożsamość struktury jest łatwa do śledzenia przy przechodzeniu z profilu na profil widać, że kondycja amplitudowa znacząco rośnie w kierunku osi jezdni. Zastosowana technika umożliwia lokalizację wierzchołka hiperboli z precyzją kilkucentymetrową wystarczającą do ustawienia miejsca odwiertu. Na podstawie tych szczegółowych pomiarów wykonano odwiert (Rysunek 2.8) we wskazanym miejscu. Pod warstwą asfaltu natrafił on na przewidywaną szczelinę w betonie.





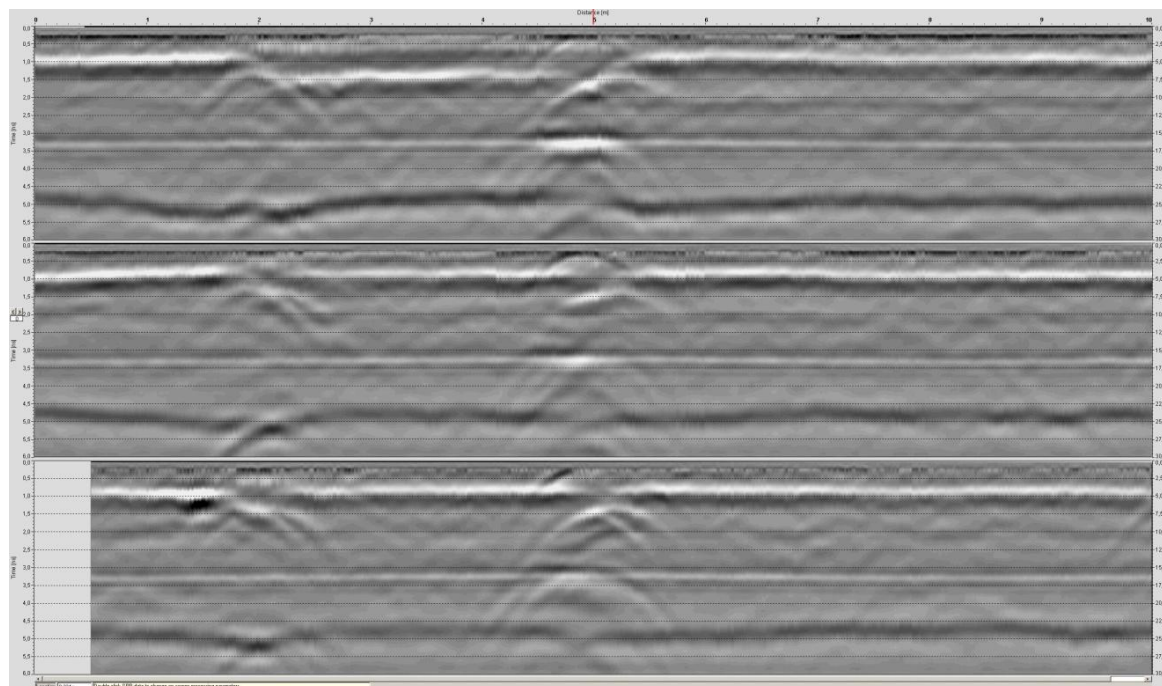
Rysunek 2.8 Sieć zaznaczonych punktów odniesienia użyta przy namierzaniu niewidocznego pęknięcia z precyzją kilkucentymetrową oraz widok otworu i fragmentów rdzenia W2\_A1\_S zaraz po odwierceniu. Na zdjęciu dolnym widoczne pęknięcie warstwy betonu.

Podobnie jak w poprzednim przykładzie (rdzeń W1\_A1\_S) pojawia się i tutaj przypuszczenie, że źródłem wyraźnego sygnału rozproszeniowego w formie hiperboli jest liniowa strefa poważnych zmian w materiale ośrodka, występujących wzdłuż linii przecięcia powierzchni granicznej warstw przez szczelinę.

### 2.1.2 Odcinek A2\_S

Odcinek A2\_S (w pobliżu Gutowca po zachodniej stronie, 269+000 do 268+500, lewa strona drogi, ślad prawego koła) charakteryzuje się analogicznym układem warstw z tą różnicą, że beton został przykryty na całej długości jedną warstwą ścieralną, ponacinaną poprzecznie wyłącznie w pobliżu dylatacji. Na odcinku A1\_S nacięcia wykonano jak się wydaje nie tylko w miejscach dylatacji, ale także tam, gdzie znajdują się czynne pęknięcia wewnątrz-płytowe. Być może jest to powodem istotnej różnicy w stanie nawierzchni obserwowanym wizualnie na jej powierzchni. Na odcinku A2\_S powstały liczne spękania poza nacięciami, podczas gdy odcinek A1\_S jest niemal pozbawiony dodatkowych spękań. Zasadniczo jednak odcinki te są podobne, co do konstrukcji nawierzchni, a ponieważ struktury osobliwe zostały skutecznie opróbowane na odcinku A1\_S, wiercenia na odcinku A2\_S dedykowano badaniu nawierzchni typowej, udokumentowaniu struktury niecki i badaniu efektów rozproszeniowych powstających w pobliżu krawędzi zagłębień widocznych w strefie dylatacji.

Jako przedmiot badania wybrano jedno z dwóch szczególnie długich zagłębień na tym odcinku. Otoczenie tej struktury zostało rozpoznane opisaną wcześniej techniką trzech skanów na profilach równoległych o długości 10 m (Rysunek 2.10).



Rysunek 2.9 Wynik skanowania wzdłuż trzech równoległych profili sąsiedztwa dwóch odwiertów sondujących nieckę w stopie betonu w pobliżu dylatacji (dystans 5 metrów w lokalnym pikietażu) i typową strukturę tego odcinka.

Osobliwością tej struktury we wcześniejszym skanowaniu ogólnym było to, że chociaż krawędzie zagłębienia manifestowały się poprzez hiperbole to jego dno było całkowicie niewidoczne, podczas gdy należy oczekiwać jego przejawu w formie silnego refleksu dodatniego. Trzy skany równoległe pokazują, że prawy profil flankowy (na dole rysunku) biegnie poza zagłębieniem, chociaż obie szczeliny (lewa, wewnątrz-płytowa i prawa, dylatacyjna, odległe od siebie o 3 metry) są na nim dobrze widoczne. Lewy profil flankowy (na górze rysunku) przebiega ponad zagłębieniem (obniżony refleks asfalt-beton; dno niecki). Natomiast profil centralny (środkowy na rysunku) przebiega wzdłuż prawej krawędzi zagłębienia, w pobliżu tejże krawędzi, która biegnie tutaj mniej więcej wzdłuż osi drogi. Refleks odpowiadający nieobniżonej powierzchni betonu jest na tym centralnym profilu osłabiony szczególnie od strony przejazdu przy pierwszej szczelinie (lokalny pikietaż 2m, po lewej stronie rysunku), a dalej odzyskuje swoją kondycję, co oznacza, że profil oddala się od krawędzi niecki. Wynika stąd, że efekt maskowania refleksu jest tutaj wynikiem przejazdu w pobliżu bliskiej krawędzi biegnącej wzdłuż profilu.

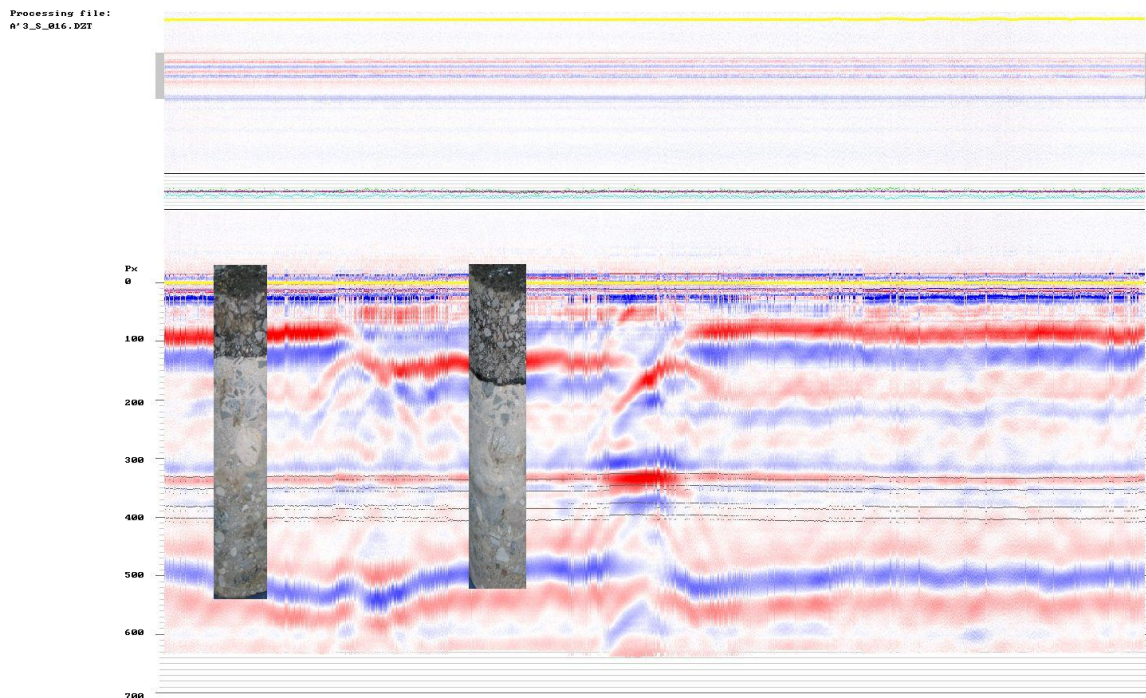
Dwa rdzenie pobrano w miejscach o niezaburzonej strukturze (lokalny pikietaż 0.5 m i 3.5 m) w celu udokumentowania zagłębienia oraz typowej stratygrafii odcinka badawczego (Rysunek 2.11).





Rysunek 2.10 Rdzenie uzyskane na odcinku badawczym A2\_S

Rdzenie te znakomicie potwierdzają obecność zagłębienia. Rdzeń W2\_A2\_S pod warstwą ścierną zawiera także asfaltowe wypełnienie zagłębienia.



Rysunek 2.11 Zestawienie echogramu z przeskalowanymi fotografiami rdzeni odwierconych na tym samym profilu.

Warto zauważyć, że lokalne skanowanie z dużą gęstością skanów w pobliżu miejsca odwierćń sprawiło (Rysunek 2.12), że ujawniła się tutaj słaba hiperbola powierzchniowa (o wierzchołku zlokalizowanym na powierzchni, lokalny pikietaż 5 m, widoczna w przedziale czasu do 1.5 ns), związana z nacięciem w warstwie ścierną. Jest to jedyny przypadek takiej rejestracji na odcinkach należących do drogi DK 22. Pokazuje on duże możliwości gęstego skanowania, które dzięki post-stackingowi<sup>1</sup> umożliwia redukcję

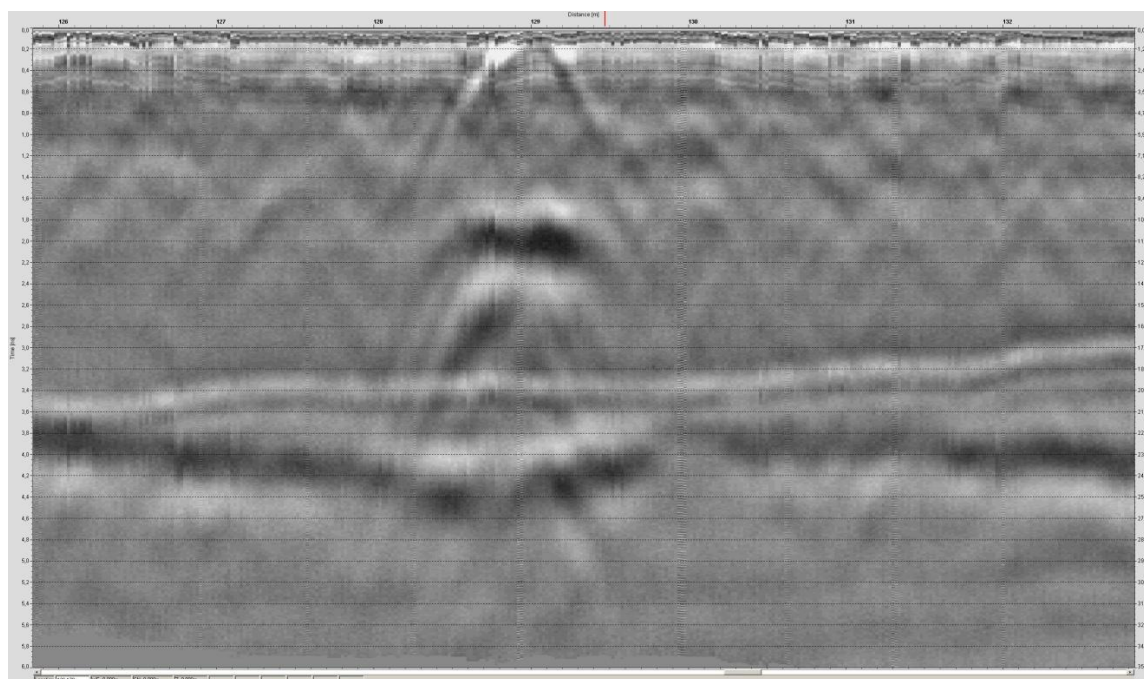
<sup>1</sup> uśrednianie pewnej zakładanej liczby pojedynczych skanów na etapie obróbki danych pozwalające zredukować zakłócenia i zniekształcenia rejestrowane podczas pomiaru

poziomu szumów niekoherentnych. Pokazuje on też granice możliwości detekcyjnych w warunkach terenowych, gdyż ta słaba hiperbola odpowiada bardzo szerokiej szczelinie (1 cm) wypełnionej ośrodkiem o dosyć dużym kontraście względem mieszanki warstwy ścierealnej. Stąd należy wnosić, że manifestacje szczelin o mikroskopowych rozmiarach i często zablźnionych, będą zazwyczaj niemożliwe do zaobserwowania, już choćby z powodu obecności strukturalnego tła maskującego.

### 2.1.3 Odcinek A3\_S

Echogram odcinka A3\_S został poddany gruntownym oględzinom. Defekty struktury widoczne na echogramie zostały sklasyfikowane i wykonano ich szczegółową listę. Lista ta, jak się okazuje, pozostaje w ścisłej zgodności z inwentaryzacją spękań widocznych na powierzchni.

Defekty widoczne na echogramie to zasadniczo dwa typy obrazów. Pierwszy typ obrazu zawiera pojedynczą lub wielokrotną hiperbolę rozproszeniową w stropie nawierzchni, wielokrotną replikę (zwykle para hiperbol) na poziomie pośrednim warstwy betonu (głębokość kilkunastu centymetrów) oraz zespół strukturalny w spągu betonu (głębokość dwudziestu kilku centymetrów) (Rysunek 2.13).



Rysunek 2.12 Typowy obraz georadarowy szczeliny między płytowej (tzw. dylatacji) betonowej drogi DK 22 (Czersk). Widoczna jest pojedyncza hiperbola stropowa, podwójna replika na poziomie pośrednim (typu podwójnej hiperboli) oraz replika w spągu) zapadnięta powierzchnia spągowa z dwoma pochylonymi skrzydłami, zmieniony typ refleksu spągowego pomiędzy podwójnym dodatnim, a wzmocnionym pojedynczym ujemnym oraz słabe ślady hiperbol o wierzchołkach usytuowanych w spągu).

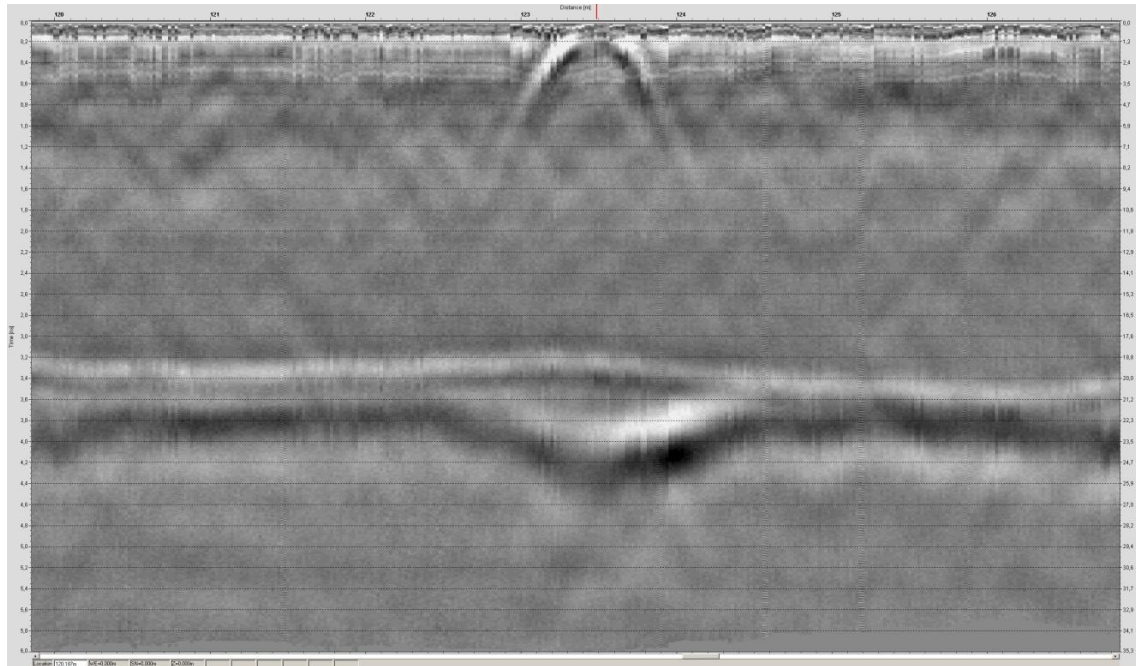
Interpretacja strukturalna takiego obrazu, czyli przetłumaczenie go na opis lokalnej budowy ośrodka, nie jest sprawą prostą. Przypisanie znaczenia tektonicznego poszczególnym elementom obrazu wymaga wykonania wierceń, dysponowania

laboratoryjnymi modelami prostych układów tektonicznych z ich obrazami georadarowymi oraz informacjami o prawdopodobnym typowym stylu budowy danej drogi. Warto tutaj zwrócić uwagę na znaczne rozmiary poprzeczne opisywanej struktury. Odległość wierzchołków pary hiperbol tworzących replikę centralną (głębokość kilkunastu centymetrów) wynosi zwykle kilkadziesiąt centymetrów. Wiadomo, że para hiperbol o wierzchołkach usytuowanych na tej samej głębokości staje się rozróżnialna (jak to pokazują modele laboratoryjne, antena 2 GHz) przy odległości wierzchołków przekraczającej 10 cm. Z kolei zagłębienie widoczne w kształcie powierzchni spągowej betonu ma szerokość rzędu metra. Jej dwa pochylone skrzydła schodzą się ku osi pionowej obrazu szczeliny. Taki ich układ sugeruje potencjalną obecność dwóch pionowych poprzecznych pęknięć stowarzyszonych po obu stronach szczeliny, ale nie jest dowodem ich obecności. Zmiana typu refleksu spągowego może być skutkiem poważnych zmian na powierzchni stuku betonu z podłożem w pobliżu szczeliny.

Drugi typ obrazu pionowego defektu struktury warstwowej z jakim mamy do czynienia na tym odcinku odpowiada poprzecznemu pionowemu pęknięciu (Rysunek 2.14). Zasadniczą różnicą jest w tym przypadku, w porównaniu z typem pierwszym, brak repliki centralnej. W najprostszym przypadku mamy do czynienia z pojedynczą hiperbolą stropową i odpowiedzią (repliką) w spągu. Termin „odpowieź” lub „replika” jest tutaj używany w sensie strukturalnym podkreślając wzajemny pionowy związek geometryczny taki, że elementy układu leżą niemal dokładnie jedno nad drugimi, przez co mamy powody wiązać je bezpośrednio jako elementy struktury i możemy przypuszczać ich wspólną genezę.

Występowanie hiperboli stropowej wraz z repliką spągową w praktyce oznacza, że pęknięcie przecina na wskroś całą płytę, aczkolwiek poznanie natury zniszczeń w spągu wymaga dodatkowych badań. Podobnie jak w pierwszym przypadku mamy i tutaj do czynienia z zapadnięciami spągu z dwoma pochylającymi się ku sobie skrzydłami oraz ze zmienionym typem refleksu spągowego. Jednak pęknięcia te występują w wewnętrznych obszarach płyt, które mają zwykle regularny (płaski) przebieg powierzchni spągowej i trudno przypuszczać, że zagłębienia powstały w skutek wylewania płyty, a spąg został szczególnie obficie wyposażony w pręty zbrojeniowe właśnie w tych miejscach na długo przed powstaniem pęknięć. Tym samym możliwość występowania dodatkowych pęknięć w miejscach zagięcia powierzchni spągowej jest w tym przypadku bardzo prawdopodobna.





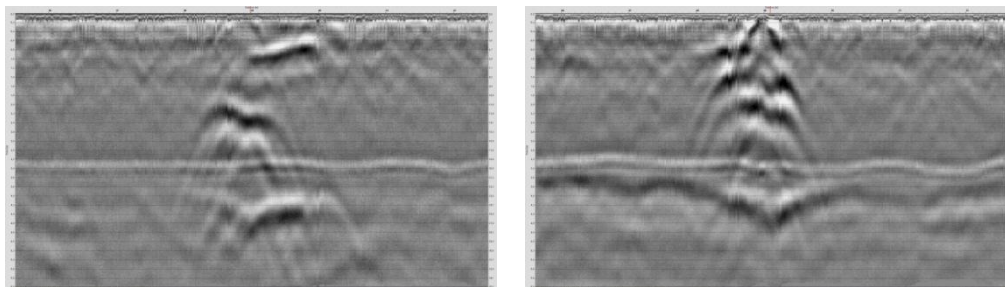
Rysunek 2.13 Typowy obraz georadarowy pionowego, poprzecznego pęknięcia betonowej drogi DK 22 (Czersk). Widoczna jest pojedyncza hiperbola stropowa oraz replika w spągu (zapadnięta powierzchnia spągowa z dwoma pochyłymi skrzydłami, zmieniony typ refleksu spągowego z pojedynczego ujemnego na podwójny dodatni oraz słabe ślady pół-hyperbol o wierzchołkach usytuowanych w spągu w miejscu połączenia pochyłonych skrzydeł zagłębienia).

Występowanie wyraźnych hiperbol stropowych jest w przypadku spękań zjawiskiem wyjątkowym. Znakomita kondycja tych hiperbol bierze się w tym przypadku stąd, że jak to ujawniły wiercenia, dylatacje są szerokie (rzędu centymetra) i tworzy je deska przegrody szalunkowej lub materiał obcy naniesiony po jej zniszczeniu. Podobnie pęknięcia są szerokie i wypełnia je zmielony (zmylonityzowany) materiał powstały z betonu w trakcie pracy szczeliny. Jak pokazują eksperymenty laboratoryjne z pionowymi płytami będącymi analogowymi modelami pionowych szczelin w procesie generacji obrazu dyfrakcyjnego, górna krawędź szczeliny (lub płyty) jest miejscem odpowiadającym w przybliżeniu wierzchołkowi powstającej hiperboli dyfrakcyjnej. Podobnie dolnej krawędzi odpowiada druga, niżej położona hiperbola, zaś sama powierzchnia pionowej szczeliny (lub płyty) nie manifestuje się jawnie jako wyraźny element obrazu falowego, a jedynie przyczynia się do specyficznego uformowania kształtu pakietów czołowych tworzących hiperbole.

Spostrzeżenia te są zgodne z obrazami uzyskiwanymi w badaniach terenowych z tą różnicą, że hiperbola dolna jest bardzo słaba, jeśli w ogóle można ją zaobserwować. Tym bardziej zadziwia bardzo wysoka amplituda hiperboli górnej. Nasuwa się zatem przypuszczenie, że jest ona skutkiem nie tyle obecności samego pęknięcia, ale występowania specyficznych zniszczeń w formie wykruszeń w pobliżu górnej krawędzi szczeliny. Ubytki te mają formę rowka o znacznych rozmiarach rzędu kilku centymetrów szerokości i głębokości wypełnionego materiałem obcym o dużym kontraście prędkości

falowej względem materiału nawierzchni, a w procesie generacji obrazu falowego obiekt ten odpowiada prętowi wcielonemu w górną powierzchnię nawierzchni.

Pokazane powyżej przykłady zostały wybrane jako przypadki najprostsze, czyli elementarne. Jednak szczeliny tej betonowej drogi dostarczają mnogości przykładów bardziej złożonych.

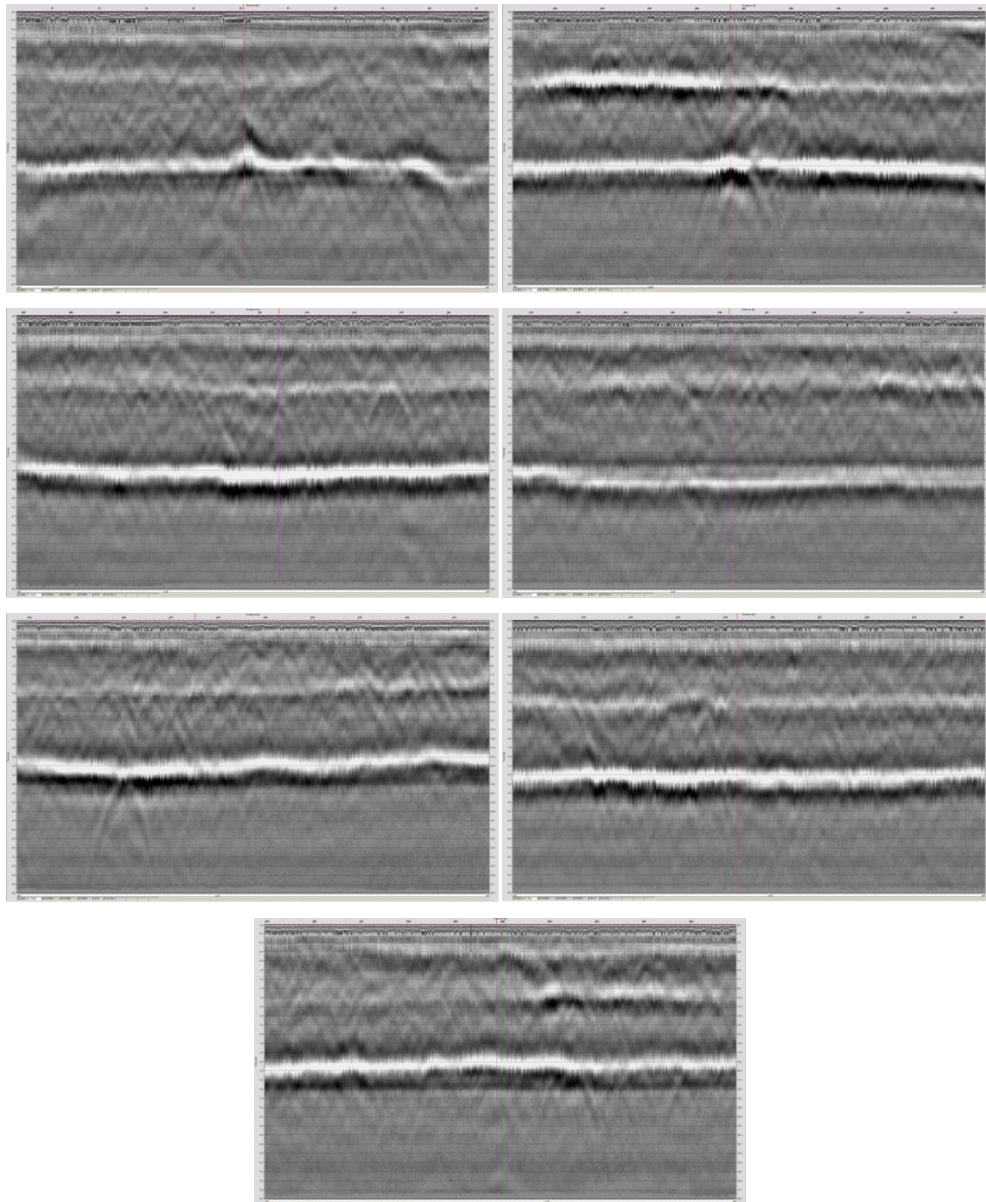


Rysunek 2.14 Echogramy szczelin między-płytowych o większej komplikacji struktury

Dwa przykłady pokazane na Rysunku 2.15 odpowiadają miejscom gdzie nastąpiły rozległe zniszczenia powierzchniowe, które wymagały naprawy w formie łąty. W przykładzie po lewej stronie dylatacja występuje na 39 metrze profilu. Tam też zaczyna się łąta, która ciągnie się do 40 metra profilu, a jej spąg jest widoczny na echogramie w postaci połogi ego (rozpościerającego się szeroko, rozległego) refleksu na głębokości około 5 cm. Na uwagę zasługuje replika spągowa, która pod krawędzią łąty (na 40 metrze) ma wierzchołek niezbyt silnej dodatkowej hiperboli, która sugeruje, że występuje tam pęknięcie.

#### 2.1.4 Odcinek B\_S

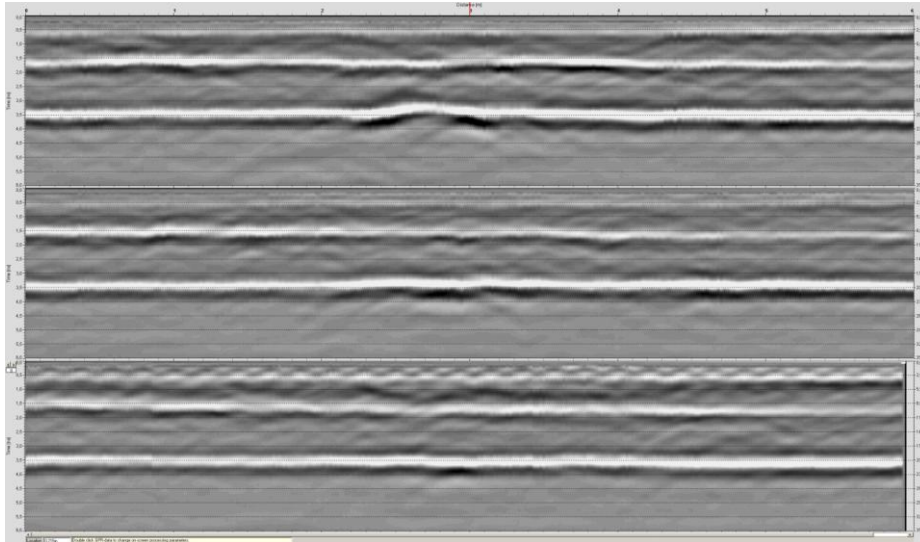
Wstępne ogólne skanowanie odcinka B\_S (38+000 do 39+000; prawa strona, prawy ślad), należącego do drogi DK (Rysunek 2.16), nie ujawniło żadnych wyraźnych objawów, które mogłyby wskazywać na pęknięcia w konkretnych miejscach. Niezależnie od braku silnych objawów diagnostycznych, wygląd echogramów bynajmniej nie wyklucza obecności pęknięć. Obserwacja wizualna wskazała siedem pęknięć na powierzchni przechodzących przez ślad prawego koła. Fragmenty echogramów odpowiadające sąsiedztwu tych siedmiu lokalizacji zostały poddane wnikliwemu oglądowi. Powtarzającym się cechę jest obecność odspojień w sąsiedztwie tych spękań. Najbardziej typowe jest odspojenie pomiędzy podbudową asfaltową, a podbudową MCE (głębokość około 20 cm), manifestujące się jako dodatni refleks podwójny zamiast refleksu dodatniego pojedynczego. W dwóch wypadkach mamy do czynienia także z odspojeniem pomiędzy warstwą wiążącą, a podbudową asfaltową. Inne defekty występujące na granicach między-warstwowych mają charakter bardzo lokalny.



Rysunek 2.15 Echogramy uzyskane w sąsiedztwie spękań poprzecznych na odcinku B\_S

Pierwszy rdzeń (Rysunek 2.18) został pobrany na spękaniu numer 2, występującym ponad przypuszczalnym odspojeniem pomiędzy warstwą wiążącą, a podbudową asfaltową i ponad przypuszczalnym odspojeniem pomiędzy podbudową asfaltową, a podbudową MCE, gdzie występuje także komplikacja kształtu tej powierzchni granicznej, w celu zbadania stanu połączeń międzywarstwowych, propagacji wglębnej pęknięcia i jego rzeczywistej kondycji. Sąsiedztwo miejsca odwiertu zostało wcześniej rozpoznane za pomocą trzech skanów równoległych (Rysunek 2.17), które zasugerowały jedynie, że odspojenia mają złożony rozkład powierzchniowy i miejscami ulegają zanikowi.





Rysunek 2.16 Echogramy lokalne uzyskane na trzech równoległych profilach w sąsiedztwie wiercenia W1\_B\_S wykonanego na szczelinie (nr. 2) na odcinku B\_S; górny (po lewej stronie śladu prawego koła w odległości 80 cm od tego śladu), środkowy (wzdłuż śladu prawego koła) i dolny (80 cm na prawo od prawego śladu).

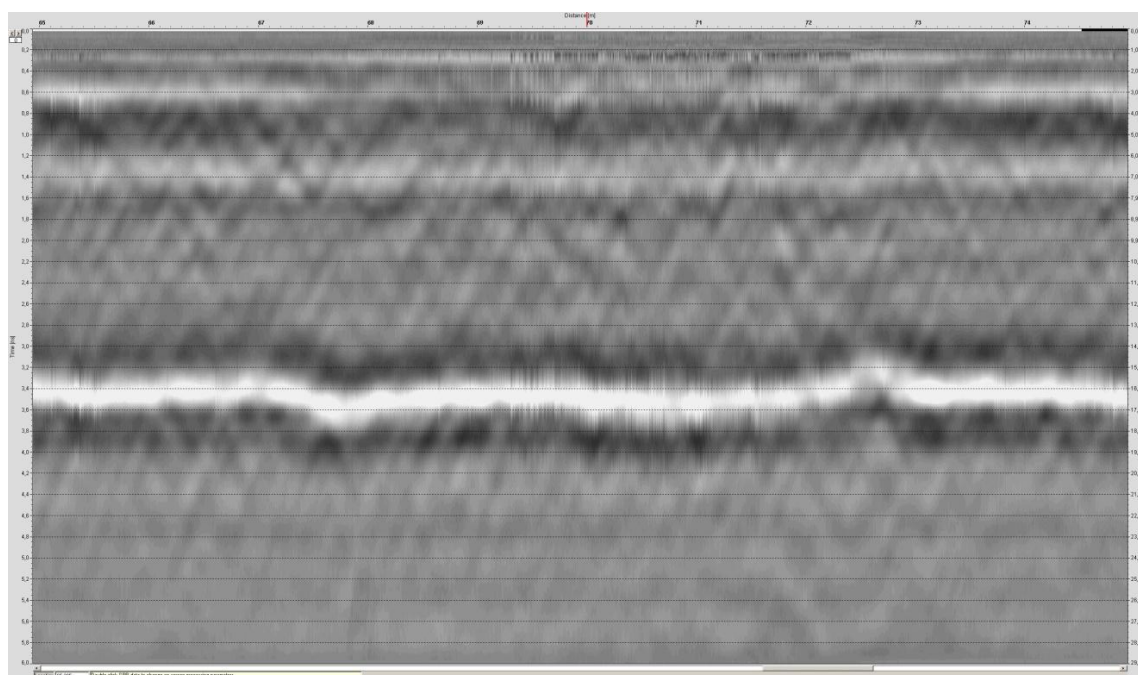
Uzyskany rdzeń (W1\_B\_S) był odspojony na kontakcie warstwy wiążącej z podbudową asfaltową. Kontakt podbudowy asfaltowej z podbudową MCE nie był odspojony w sposób jawny, ale w pobliżu tego kontaktu nastąpiły poważne ubytki materiałowe, wskazujące na niezbyt dobry stan tego kontaktu. Podwójny refleks dodatni obserwowany miejscami na echogramach wskazywałby na to, że domniemane lokalne odspojenia są zawilgocone. Refleks ten nie jest wyraźnie poszerzony, a materiał podbudowy MCE ma postać bardzo zwięzłą, zaś powierzchnia kontaktu nie wydaje się być bardzo pofalowana. Wszystko to nie wskazuje na ewentualną obecność refleksu typu zerowego (często towarzyszącego spągowi pakietu asfaltowego bardziej typowych nawierzchni), który może być pomyłony z refleksem podwójnym. Lokalne występowanie odspojenia w spągu pakietu asfaltowego jest tu zatem bardzo prawdopodobne.



Rysunek 2.17 Miejsce wykonania wiercenia W1\_B\_S (po lewej, trzy kreski oznaczają kierunki i pozycje trzech równoległych profili, a na środkowej w miejscu jej przecięcia z pęknięciem zostało wykonane wiercenie) oraz uzyskany rdzeń (po prawej)

Szczelina pęknięcia jest zwarta, gdyż górny fragment rdzenia nie uległ rozpadowi na tej szczelinie. Może ona być śladowa na powierzchni bocznej rdzenia, aż do powierzchni odspojenia, ale na górnej powierzchni odspojenia jest ona identyfikowalna z dużym trudem. Poniżej odspojenia nie zauważono żadnych śladów kontynuacji spękania w głąb nawierzchni. Pęknięcie to jest zatem ograniczone jedynie do górnych warstw asfaltowych. Przez swoje mikroskopijne rozmiary nie powinno być wykrywalne w obrazie georadarowym.

W przypadku odcinka B\_S występuje dodatkowo szczególna, konieczna do odnotowania okoliczność wybitnie utrudniająca zaobserwowanie ewentualnych przejawów obecności pęknięcia. Poniższy rysunek pokazuje fragment echogramu, na którym nie widać żadnych wyraźnych objawów odspojień, a miejsce to jest dalekie od obserwowanych na powierzchni pęknięć. Mimo to fragment ten charakteryzuje się nadzwyczaj silnym tłem strukturalnym w formie kratki złożonej z dwóch rodzin ukośnych, wzajemnie się przecinających linii. Tło to ma charakter strukturalny w tym rozumieniu, że jest to sygnał generowany przez strukturę ośrodka, a bynajmniej nie zakłócenie zewnętrzne, czy artefakt aparaturowy. Użycie stackingu, czy powtarzanie pomiaru prowadzi do zasadniczo identycznego wyniku. Sygnał ten w sposób nadzwyczaj skuteczny maskuje słabe przejawy pęknięć w obrazie georadarowym.



Rysunek 2.18 Echogram lokalny uzyskany w sąsiedztwie wiercenia W2\_B\_S wykonanego w miejscu dalekim od szczelin i pozbawionym znamion defektów międzywarstwowych na odcinku B\_S. Widoczna jest kratka złożona z dwóch rodzin ukośnych linii będąca sygnałem reprezentującym strukturę ośrodka, zapewne jego granulację o dużej skali. Kratka ta stanowi sygnał maskujący utrudniający poważnie detekcją szczelin.



Rysunek 2.19 Rdzeń W2\_B\_S pobrany w miejscu pozbawionym spękań i nie wskazującym na obecność odspojień lub innych osobliwości budowy nawierzchni na odcinku B\_S (DK 7, Cedry Małe). Reprezentuje on typową, zdrową nawierzchnię tego odcinka. Dobrze widoczne nowe warstwy asfaltowe, podbudowa MCE, a pod nią relikty dawnej nawierzchni zaczynający się warstwą ścierną i wiążącą.

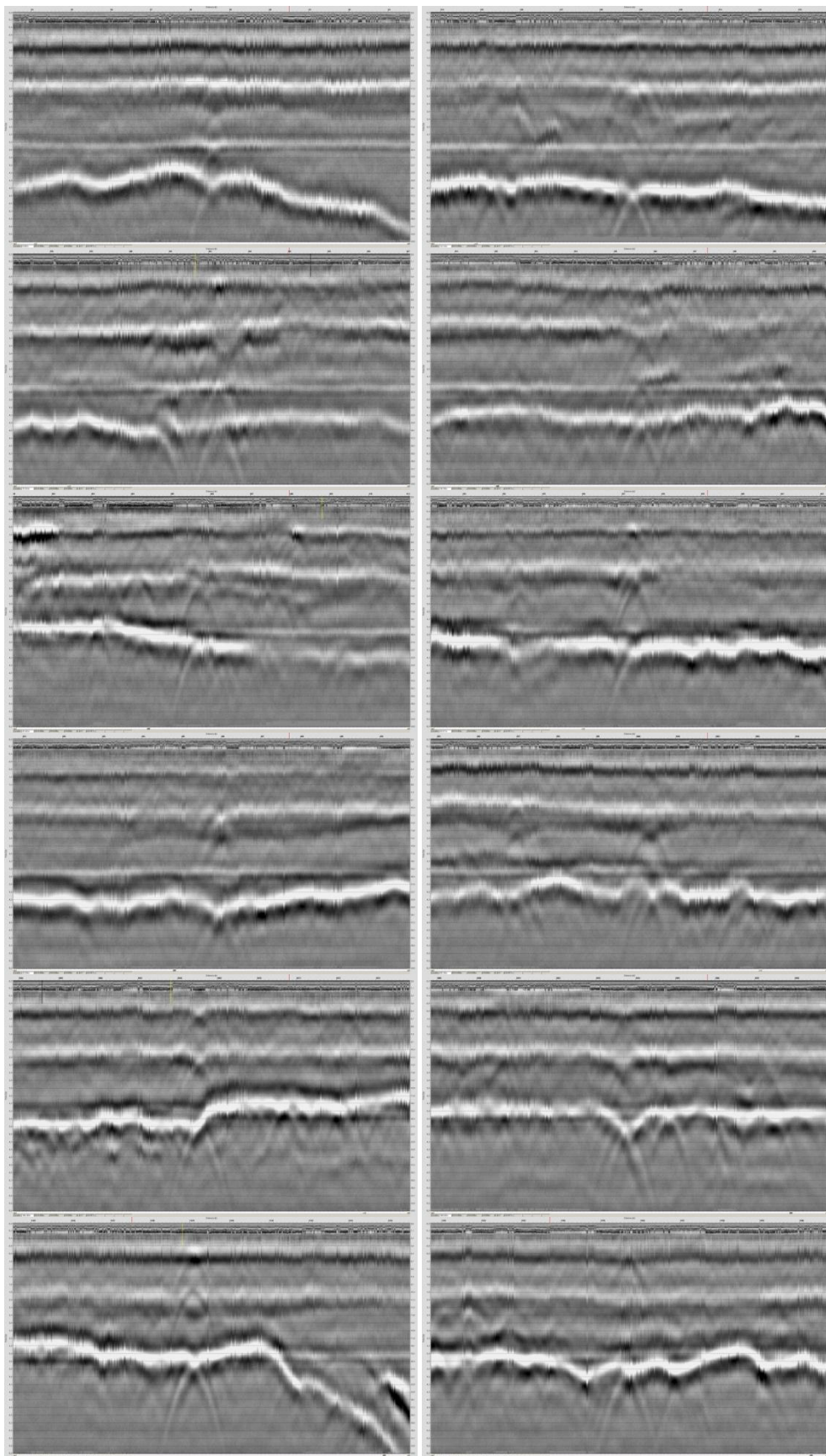
Miejsce odpowiadające środkowi odcinka pokazanego na tym echogramie zostało wybrane do wykonania odwiertu referencyjnego (Rysunek 2.21). Odwiert miał udokumentować typową, niezaburzoną strukturę nawierzchni na tym odcinku badawczym i jednocześnie sprawdzić, czy obecność specyficznego sygnału maskującego może być kojarzona z własnościami materiałowymi, bądź strukturą tamtejszego ośrodka. Wspólną właściwością obu rdzeni jest gruboziarniste kruszywo warstwy wiążącej (grubość 5cm), i podbudowy asfaltowej, przy czym kruszywo należałoby określić jako skrajnie gruboziarniste (największy wymiar kruszywa w warstwie wiążącej 3,2cm!), gdzie rozmiary największych ziaren stają się porównywalne z długością ćwierćfalową fali 2 GHz w ośrodku. Budowa ta ma odpowiedniość we własnościach kratki maskującej, która pojawia się poniżej warstwy ścierną, a szczególnie nasila poniżej warstwy wiążącej. Mamy zatem podstawy do wiązania tego silnego sygnału maskującego z pseudo-okresową budową ośrodka i wysoką efektywnością rozpraszania fali na ziarnach w związku z ich dużym rozmiarem.

### 2.1.5 Odcinek C\_S

Odcinek C\_S (30+000 do 28+800, w pobliżu Iłży; lewa strona, ślad prawego koła) należy do drogi DK 9. Odcinek ten dostarczył wspaniałej galerii przykładów sygnałów georadarowych znamionujących obecność pojedynczych spękań, a analiza statyczna ich korelacji ze spękaniem obserwowanymi na powierzchni pozwoliła na sformułowanie odpowiedniego kryterium diagnostycznego.

Podobnie jak w przypadku innych odcinków także echogram ogólny odcinka C\_S został poddany szczegółowemu przeglądowi w poszukiwaniu elementów obrazu georadarowego, które mogą znamionować spękania (wybrane fragmenty na Rysunku 2.2).





Rysunek 2.20 Przykłady silnych *choinkowych układów refleksów* rozproszeniowych o kształcie hiperbolicznym

Przeгляд wstępny był przeprowadzany w dwóch trybach. Sposób pierwszy polegał na próbie odnalezienia na echogramie miejsc, które odpowiadają lokalizacjom widocznych na powierzchni spękań i na próbie znalezienia znamion lokalnych defektów. Znamiona te to przede wszystkim hiperbole rozproszeniowe generowane przez osobliwości struktury ośrodka mające postać obiektów prawie punktowych, liniowych, czy poziomych krawędzi ustawionych pionowo płaszczyzn (ten ostatni przypadek jest analogiem spękania). W dalszej kolejności należy mieć na uwadze lokalne, dobrze zlokalizowane w poziomie odspojenia oraz szczególne, lokalne osobliwości kształtu powierzchni międzywarstwowych (najczęściej spotyka się zapadnięcia i zagięcia powierzchni spągowej pakietu warstw asfaltowych).

Sposób drugi polega na przeglądaniu całego echogramu bez jakichkolwiek wstępnych uprzedzeń, co do przewidywanego położenia spękań, w poszukiwaniu wymienionych wyżej znamion zlokalizowanych osobliwości strukturalnych, ale nie pojedynczych lecz występujących w grupach pionowych. Przez grupę pionową należy rozumieć układ przynajmniej dwóch lub lepiej więcej niż dwóch znamion lokalnego defektu występujących jeden nad drugim w nieznacznej odległości poziomej od siebie, nie większej niż połowa grubości nawierzchni. Taka bliskość pozioma defektów występujących na różnych głębokościach daje podstawy do przypuszczenia, że defekty te są przejawami jednej struktury (w domyśle szczeliny spękaniowej) i zapewne mają wspólną genezę. W praktyce diagnostycznej wstępnej analizy echogramu w przypadku hiperbol za miejsce lokalizacji lokalnego defektu przyjmujemy jej wierzchołek nie rozstrzygając z góry o typie geometrycznym i naturze obiektu, który odpowiada za jej generację (jest to odrębny problem badawczy). Przy identyfikacji hiperbol bardzo pomocne jest dopasowywanie hiperboli o kształcie przewidywanym przy użytej odległości anteny od nawierzchni (pewien wpływ na ten kształt ma także stała dielektryczna ośrodka). Metoda ta pozwala podejmować rozstrzygnięcia, co do liczby i typu centrów dyfrakcyjnych, a w przypadku hiperbol słaby pozwala je odróżnić od artefaktów interferencyjnych.

Jak się okazało już przy pierwszych przeglądach, na echogramach praktycznie nie występują hiperbole powierzchniowe, czyli takie, które mają wierzchołek usytuowany na powierzchni. Na odcinku C\_S znaleziono jedną taką hiperbolę i to w miejscu gdzie nie odnotowano spękania na powierzchni. Hiperbole powierzchniowe znane są z nawierzchni betonowych (szerokie dylatacje i poważne ubytki u szczytu pęknięć), a jedną udało się zarejestrować na asfaltowej nakładce nawierzchni betonowej w miejscu nacięcia o szerokości 1 cm. Poza sześcioma odcinkami badawczymi w trackie pomiarów pomocniczych udało się zaobserwować hiperbole powierzchniowe w nawierzchni asfaltowej tylko w przypadku rozstępów o szerokości kilku centymetrów, zaś typowe nierozwinięte spękania pozostawały niewidoczne w obrazie georadarowym anteny 2 GHz. We wszystkich znanych przypadkach szczeliny odpowiedzialne za generację hiperbol powierzchniowych są bardzo szerokie (rzędu centymetrów).

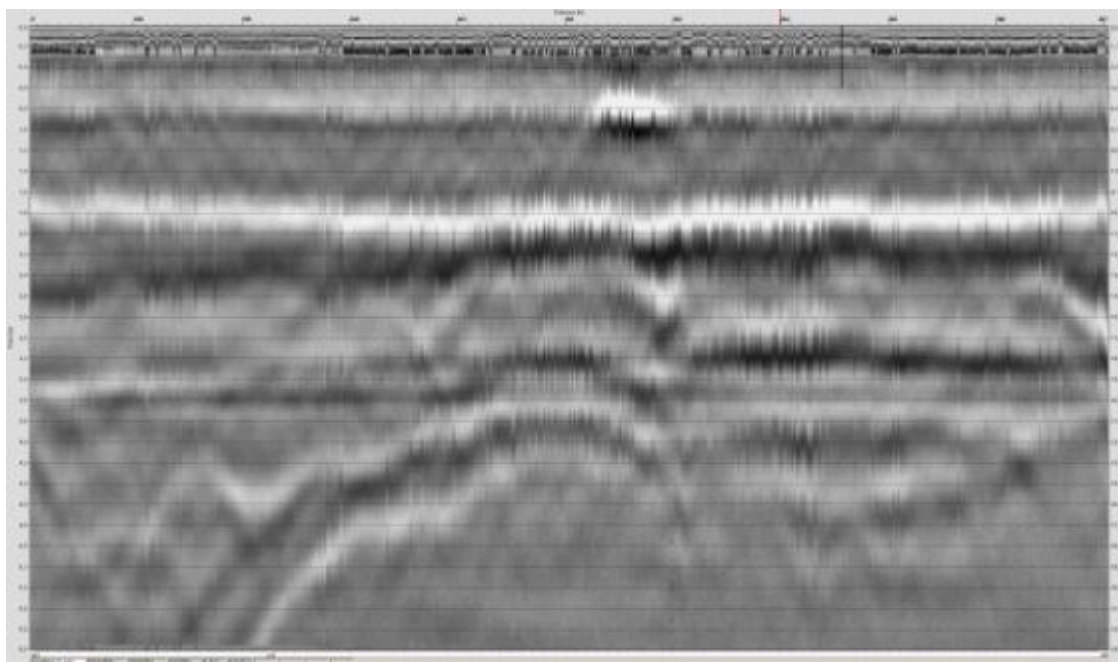
Pojawiają się tutaj dwa ważne wnioski: detekcja szczelin o szerokości mikroskopowej może być zadaniem nadzwyczaj trudnym, bądź niewykonalnym w warunkach



terenowych, natomiast zauważalne hiperbole odpowiadają osobliwościom struktury o znacznych, wielocentymetrowych rozmiarach, czyli zaawansowanym uszkodzeniom. To ostatnie spostrzeżenie wydaje się być potwierdzane przez pierwsze wiercenia na szczelinach w nawierzchniach betonowych. Chociaż spękania zwykle nie obfitują w hiperbole powierzchniowe przeglądy wstępne pokazały, że spękania obserwowane na powierzchni mają wybitną korelację ze spektakularnymi układami hiperbol, których centra występują jedno nad drugim niemal dokładnie w pionie. Ze względu na dobitną wymowę obraz taki został nazwany układem choinkowym.

Silna, dobrze rozwinięta choinka powinna zawierać przynajmniej trzy dobrze odróżnialne od tła hiperbole, o wierzchołkach wyraźnie układających się wzdłuż pionowej linii. Hiperbole te powinny być potwierdzone dopasowaniem przewidywanego kształtu wraz z dyskusją pozycji wierzchołka, który powinien się wyróżniać wysoką amplitudą, co pozwala odróżnić hiperbole od bardzo częstych artefaktów interferencyjnych, do których nie można skutecznie dopasować przewidywanego kształtu. Szczególnym akceptowalnym przypadkiem jest „struktura chi”, złożona z dwóch przecinających się pół-hiperbol z wyraźnymi wierzchołkami. Poniższa galeria choinek prezentuje ich najbardziej wymowne przykłady znalezione na odcinku C\_S

Defekty odpowiedzialne za generacją hiperbol występują najczęściej na powierzchniach między-warstwowych. W szczególnych przypadkach zamiast hiperboli obserwujemy wyróżniający się, lokalny defekt o znamionach odspojenia w miejscu oczekiwanego wierzchołka hiperboli. W skrajnym przypadku możemy mieć do czynienia z samymi, ułożonymi jeden nad drugim, defektami lokalnymi przy braku wyraźnych hiperbol. Obraz taki został nazwany grupą pionową defektów.



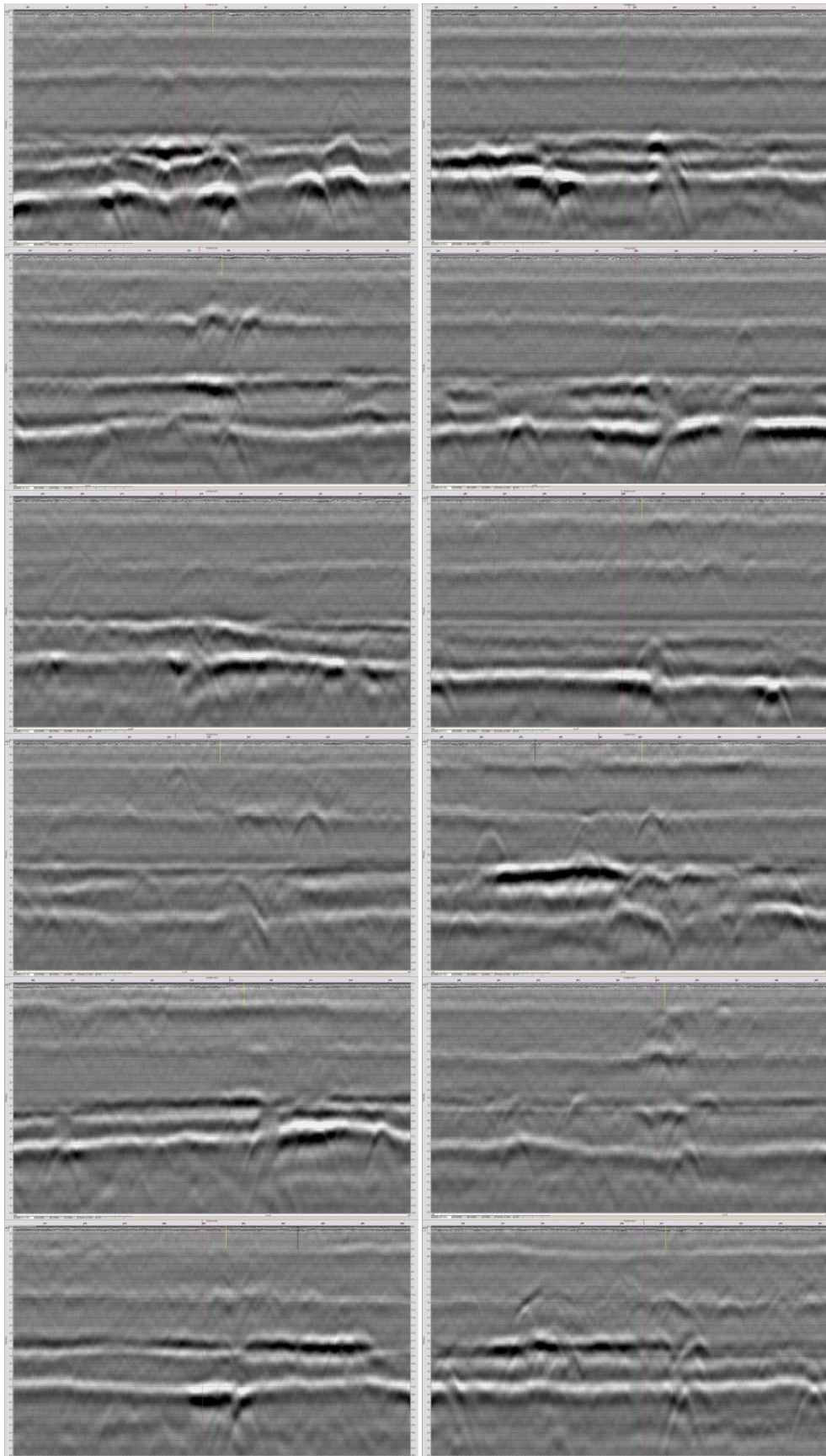
Rysunek 2.21 Przykład silnej grupy pionowej skupionych (o dobrej lokalizacji poziomej) refleksów sugerujących obecność defektów (zaburzeń regularnej, warstwowej struktury ośrodka) położonych jeden nad drugim, czyli niemal pionowo.

Być może grupa pionowa jest szczególnym przykładem układu choinkowego wynikającym z odmiennego stylu przebiegu linearnych defektów które są źródłem znamienych sygnałów. Częste są także przypadki, w których zamiast oczekiwanej hiperboli albo zlokalizowanego defektu mamy do czynienia z rozległym odspojeniem. Rozległe odspojenie jest okolicznością nakłaniającą do rozważania obecności spękania, gdyż współwystępowanie spękań i odspojień jest wyraźną cechą badanych odcinków nawierzchni asfaltowych. Jednak rozległe odspojenie bez wyróżniającego się, dobrze zlokalizowanego centrum nie jest traktowane jako cecha diagnostyczne spękania.

## 2.2 Odcinek D\_S

Odcinek D\_S (193+800 do 193+000, w pobliżu Kołbieli; lewa strona, ślad prawego koła) należy do drogi DK 9. Pośród 12 spękań odnotowanych na powierzchni tego odcinka, jedynie w dwóch przypadkach można się dopatrzeć wyraźnych grup pionowych.

W większości tych przypadków identyfikacja spękania lub nawet zasugerowanie jego pozycji na podstawie echogramu nie jest możliwe. Przybliżona pozycja została zaznaczona żółtą kreską (dokładność rzędu pół metra), jeśli spękanie było zauważone w trakcie pomiaru przez obserwatora w samochodzie, zaś przybliżona pozycja określona na podstawie pomiaru kółkiem mierniczym (dokładność rzędu metra) została zaznaczona fioletową linią. Sytuację komplikuje tutaj złożony obraz segmentu spągowego, odpowiadającego pozostałościom dawnej nawierzchni na jakich leży nowa nakładka. Segment ten jest (podobnie jak w przypadku C\_S) nadzwyczaj bogaty w rozległe odspojenia, bardziej lokalne defekty i deformacje powierzchni między-warstwowych. To bogactwo komplikacji strukturalnych segmentu spągowego nie jest jednak równie powszechne na całej długości odcinka. Przegląd fragmentów echogramu ogólnego, które odpowiadają miejscom zaobserwowanych spękań pokazuje wyraźnie, że miejscach tych występują silne refleksy odspojeniowe w segmencie dolnym. Sugerując się zaznaczeniami w trakcie pozycjami spękań i skorygowanymi pomiarami ich pikietażu nie trudno zauważyć, że w miejscach tych systematycznie występują zaburzenia przebiegu horyzontów segmentu dolnego. Liczne są też przypadki przebijania się tych zaburzeń do warstwy górnej, gdzie można zauważyć zlokalizowane defekty. W ten sposób można się dopatrzeć grup pionowych w większości tych przypadków, jednak nie są to grupy, które by spełniały warunki kryterium diagnostycznego, a analogiczne układy występują licznie na tym odcinku także w miejscach, gdzie spękań nie odnotowano. Możliwe jest jednak także że układy te odpowiadają spękanom, które nie dotarły jeszcze do powierzchni.



Rysunek 2.22 Echogramy uzyskane w pobliżu miejsc, gdzie występują spękania na odcinku badawczym D\_S (DK 50, koło Kołbieli).



### 3 Weryfikacja stanu spękań nawierzchni metodami klasycznymi.

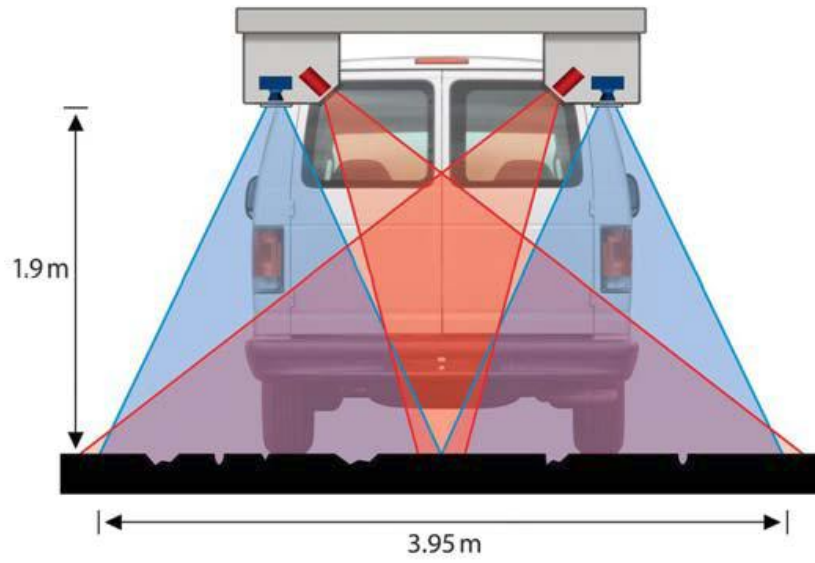
Inwentaryzację spękań przeprowadzono przy użyciu wielofunkcyjnego pojazdu pomiarowego MFV (Multi Function Vehicle), który umożliwia jednocześnie zbieranie danych o równości podłużnej drogi, zdjęć powierzchni nawierzchni oraz otoczenia badanej drogi (Rysunek 3.1).



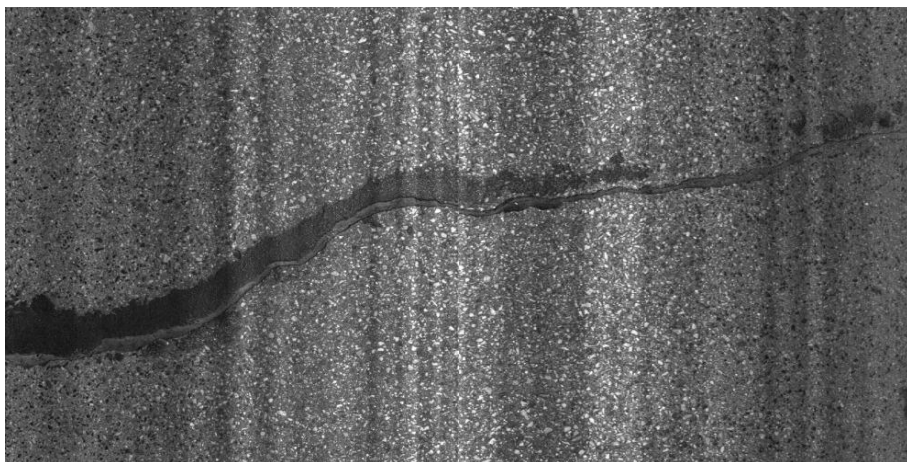
Rysunek 3.1 Wielofunkcyjny pojazd pomiarowy MFV

Urządzenie zbudowane jest w oparciu o trzy podsystemy pomiarowe: HDI, ROW i RSP-III, zarządzane wspólną jednostką sterującą. System obrazowania w wysokiej rozdzielczości HDI (High Definition Imaging) służy do rejestrowania obrazów powierzchni nawierzchni w celu identyfikacji jej uszkodzeń. Urządzenie umożliwia zbieranie danych w postaci zdjęć nawierzchni o rozdzielczości 1x1 mm na szerokości niemal 4 m i z prędkością pomiarową do 100 km/h. Unikatowe rozwiązanie konstrukcyjne sprawia, że spękania konstrukcji widoczne są w każdym kierunku oświetleniowym zarówno w kierunku poprzecznym jak i podłużnym. Zasada działania systemu opiera się na zastosowaniu dwóch par urządzeń: lasera oświetlającego (Rysunek 3.2 – kolor czerwony) oraz kamery liniowej (Rysunek 3.2 – kolor niebieski). Podczas pomiaru urządzenie skanuje nawierzchnię co 1 mm, a wynikiem końcowym jest para zdjęć lewe i prawe o zadanej długości np. 2m. Przykład złożenia pary zdjęć przedstawiono na Rysunku 3.3.

System Right of Way (ROW) jest uzupełnieniem systemu HDI i służy do zbierania zdjęć nawierzchni i pasa drogowego (Rysunek 3.4). Głównym elementem systemu są kamery umieszczone przy przedniej szybie pojazdu, z których obraz przekazywany jest bezpośrednio do centralnej jednostki sterującej a tam kojarzony z odpowiednimi plikami pomiarowymi. Dzięki zarejestrowanym zdjęciom możliwe jest łatwe lokalizowanie uszkodzeń nawierzchni i powiązanie ich np. z istniejącą infrastrukturą drogową



Rysunek 3.2 HDI – zasada działania



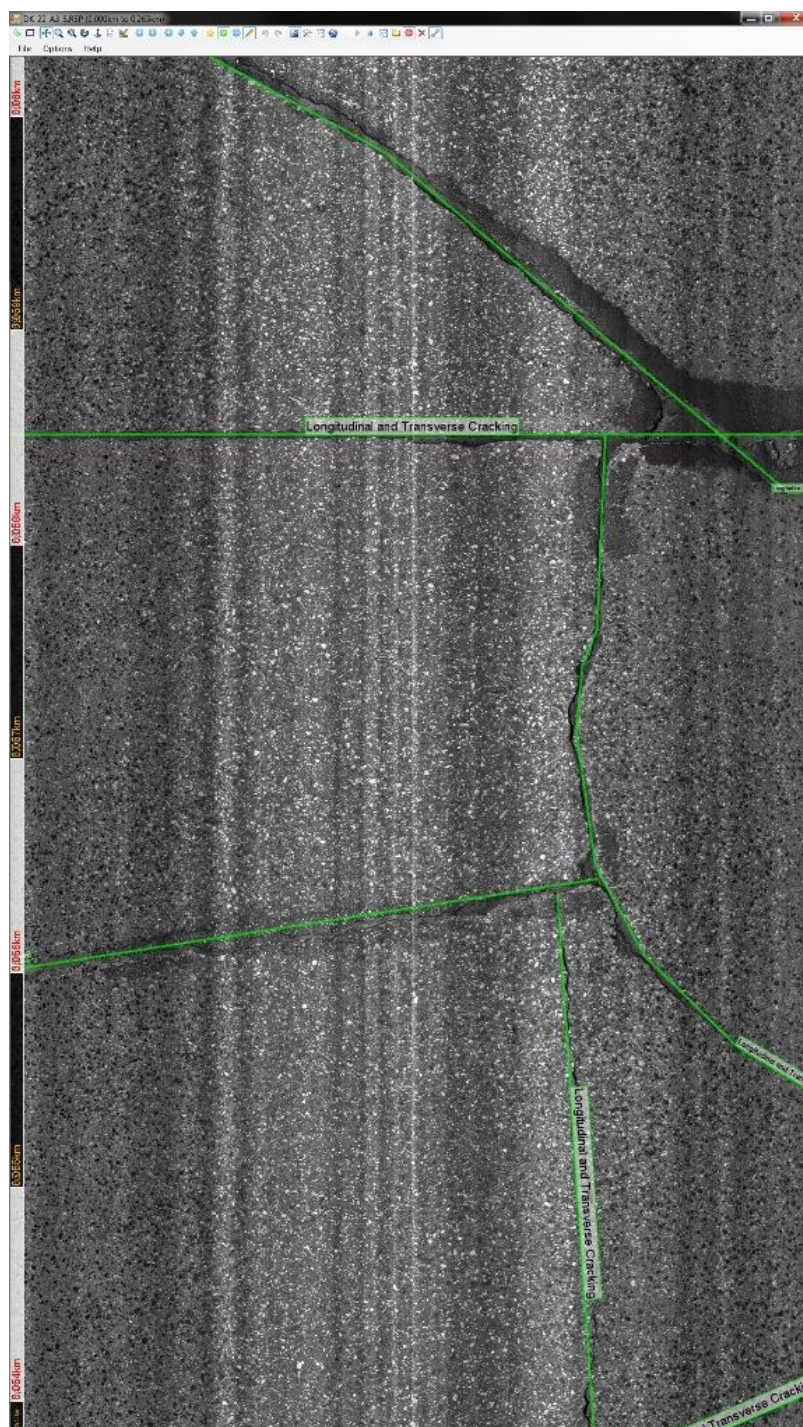
Rysunek 3.3 Fotorejestracja powierzchni nawierzchni



Rysunek 3.4 Fotorejestracja pasa drogowego (odcinek C\_S)



Identyfikację uszkodzeń wykonano za pomocą oprogramowania interpretacyjnego. Inwentaryzację spękań przeprowadzono poprzez wskazanie przebiegu uszkodzenia na powierzchni nawierzchni. W efekcie uzyskano informację o: lokalizacji i przebiegu spękania (pikietaż i współrzędne GPS), długości spękania, rodzaju uszkodzenia (naprawione lub nowe). Przykład identyfikacji spękań nawierzchni przedstawiono na Rysunku 3.5.



Rysunek 3.5 Przykład identyfikacji spękań nawierzchni (fragment nawierzchni odcinka A3\_S)

Intensywność spękań oceniono obliczając wskaźnik IS zgodnie z zaleceniami Katalogu<sup>2</sup>, w którym podano kryteria oceny tj.  $IS \leq 1$  oznacza nawierzchnie niespękane,  $1 < IS \leq 3$  oznacza nawierzchnie średnio spękane, a  $IS > 3$  oznacza nawierzchnie bardzo spękane. Klasyfikacja odcinków pod względem intensywności spękań przedstawia się następująco:

Rok 2009	Rok 2010	Rok 2011
odcinek A1_S – IS=0 (odcinek niespękany)	odcinek A1_S – IS=0 (odcinek niespękany)	odcinek A1_S – IS=0 (odcinek niespękany)
odcinek A2_S – IS=0 (odcinek niespękany)	odcinek A2_S – IS=3 (odcinek średnio spękany)	odcinek A2_S – IS=3 (odcinek średnio spękany)
odcinek A3_S – IS=10 (odcinek bardzo spękany)	odcinek A3_S – IS $\geq$ 10 (odcinek bardzo spękany)	odcinek A3_S – IS $\geq$ 10 (odcinek bardzo spękany)
odcinek B_S – IS=1 (odcinek niespękany)	odcinek B_S – IS=3 (odcinek średnio spękany)	odcinek B_S – IS=3,5 (odcinek średnio spękany)
odcinek C_S – IS=1 (odcinek niespękany)	odcinek C_S – IS $\geq$ 10 (odcinek bardzo spękany)	odcinek C_S – IS $\geq$ 10 (odcinek bardzo spękany)
odcinek D_S – IS=0 (odcinek niespękany)	odcinek D_S – IS $\geq$ 10 (odcinek bardzo spękany)	odcinek D_S – IS $\geq$ 10 (odcinek bardzo spękany)

Jak widać na większości odcinków przyrost liczby pęknięć jest bardzo duży. Szczególnie na odcinkach C\_S i D\_S, które ze względu na rodzaj prowadzonych badań okazały się być najciekawszymi z wybranych odcinków. Należy pamiętać, że do badań wytypowano tak zwane „trudne przypadki”, gdzie oczekiwano znacznej intensywności przyrostu liczby pęknięć w krótkim okresie czasu. Trzeba też podkreślić, że o ile w pierwszym roku obserwacji przyrost pęknięć był znaczny o tyle w kolejnym liczba pęknięć już nie zwiększała się tak znacząco.

Przedstawiona w niniejszym rozdziale informacja o ogólnym stanie odcinków jest niejako podsumowaniem prowadzonych zgodnie z Katalogiem badań. Szczegółowa inwentaryzacja pęknięć wykorzystana została w analizie porównawczej danych uzyskanych na przestrzeni trzech lat. Dane te posłużyły również do określenia parametrów mających wpływ na jakość uzyskiwanych danych z pomiarów radarowych, co przedstawiono w kolejnych rozdziałach.

<sup>2</sup> Katalog Wzmocnień i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych

## 4 Ocena parametrów mających wpływ na jakość uzyskiwanych danych z pomiarów radarowych w warunkach terenowych.

Jak pokazują wyniki badań w rozpoznawaniu spękań znakomite rezultaty dają anteny wysokoczęstotliwościowe, a przede wszystkim antena o częstotliwości centralnej 2.2 GHz. Za pomocą tej wysokorozdzielczej anteny wykonano niemal wszystkie pomiary opisywanego przedsięwzięcia badawczego. W przypadku rozległych zniszczeń ośrodka paradoksalnie sprawdza się także mniej precyzyjna antena 1 GHz, dostarczając uzupełniających sugestii, co do obecności takich defektów, które, o ile mają rozmyte granice, mogą być niedostatecznie odzwierciedlone w echogramach anten o wyższej częstotliwości. Badanie spękań wymaga zastosowania podwyższonej rozdzielczości poziomej co najmniej 50 skanów na metr, która jest potrzebna z jednej strony do prawidłowego udokumentowania hiperbol rozproszonych, a z drugiej strony umożliwia redukcję szumów niekoherentnych, które poważnie utrudniają identyfikację hiperbol mających zwykle bardzo małą amplitudę sygnału.

Jednym z najważniejszych wniosków z badań jest kluczowe znaczenie metody skanów w równoległych profilach. Pomysł zastosowania tej metody pojawił się w trakcie drugiego etapu badań i został szerzej przetestowany w etapie trzecim. Poprzeczne korelowanie echogramów uzyskiwanych na sąsiednich profilach dostarcza przekonujących argumentów, co do poprzecznej rozciągłości osobliwych struktur powierzchni i pozwala odróżnić lokalne defekty w pobliżu pojedynczego profilu od obiektów mających liniowy kształt rozciągający się w poprzek kierunku skanowania. Metoda ta powinna być obligatoryjnie stosowana przy georadarowym badaniu spękań szczególnie w przypadku nawierzchni asfaltowych.

Kolejnym ważnym spostrzeżeniem metodologicznym jest znaczenie prowadzenia systematycznego monitoringu nawierzchni w relatywnie długim okresie czasu (2-3 lat) poprzez obserwację zmian obrazu georadarowego z równoczesną identyfikacją pęknięć powierzchniowych, prowadzoną przy zastosowaniu technik wizyjnych. Wnioski płynące z korelacji obu tych obserwacji poparte dokumentacją budowy nawierzchni oraz ewentualnie odkrywkami i wierceniami mają konsekwencje daleko przekraczające ustalenia jakie może dać pojedynczy, wyrwany z kontekstu pomiar. Szczególne znaczenie może tutaj mieć georadarowe udokumentowanie pierwotnego stanu drogi oraz wczesnej fazy jej użytkowania.

Kluczowym osiągnięciem badań jest uzyskanie typologii georadarowych przejawów obecności spękania poprzecznego. Określenie „poprzeczne” oznacza w odniesieniu do pomiaru GPR, że spękanie jest poprzeczne do kierunku profilu skanowania, a antena powinna mieć polaryzację pola elektrycznego również poprzeczną do kierunku profilu. Ustawienie takie ma najwyższą skuteczność przy identyfikacji spękań. Przejawami spękań są wtedy przede wszystkim hiperbole rozproszeniowe  $H$ , które mogą odpowiadać liniowym obiektom osobliwym, czy liniowym krawędziom szczelin, ale także skupionym (punktowym) obiektom rozpraszającym. Odróżnienie obiektu punktowego od obiektu liniowego nie jest możliwe przy skanowaniu wzdłuż pojedynczego profilu. Problem ten praktycznie rozwiązuje zastosowanie skanowania wzdłuż kilku równoległych profili,



które poprzez korelację sąsiednich echogramów najczęściej rozstrzyga o poprzecznej kontynuacji obiektu rozpraszającego.

Hiperbole rozproszeniowe są wyidealizowanym przypadkiem modelowym. W praktyce spotyka się dużą różnorodność wariantów zmodyfikowanych, mających jednak często znaczenie diagnostyczne. Słabe hiperbole mogą być na przykład widoczne jedynie we fragmencie swych wierzchołków. Takie punktowe zaburzenie na echogramie jest nazywane **defektem lokalnym D** (*Dg* w górnych partiach nawierzchni, a *Dd* w dolnych). Liczne, wzajemnie blisko położone hiperbole mogą interferować formując ze swych wierzchołków wspólny horyzont refleksyjny, zaś ujawniając jedynie soje ramiona. Zagadkową figurą jest rzadko spotykana pół-hyperbola złożona z jednego jedynie ramienia oraz **układ  $\chi$  (*chi*)** złożony z dwóch pół-hyperbol nie mających jednak wspólnego wierzchołka. Układ *chi* ma zdecydowane pokrewieństwo wyrażone współwystępowaniem z **v-kształtnym zapadnięciem spągu V** pakietu asfaltowego, jednak brak odkrywek i dostatecznego opróbowania wierceniami utrudnia budowanie poglądów na temat geometrii struktur odpowiedzialnych za to zjawisko rozproszeniowe.

Ważnym znamieniem spękań jest także skorelowane pionowo współwystępowanie na echogramie zaburzeń rozproszeniowych. Najbardziej spektakularnym przykładem jest wystąpienie kilku hiperbol położonych jedna nad drugą nazwane **układem choinkowym Ch**. Jeśli hiperbole mają formę zredukowaną do samego jedynie wierzchołka, to figurę taką nazywa się **grupą pionową Gp**. O ile pojedyncza hiperbola nie jest silną przesłanką diagnostyczną spękania, to układ choinkowy i grupa pionowa same w sobie obecność spękania sugerują. Układ *chi* i zapadnięcie v-kształtne mają natomiast podobne znaczenie co pojedyncza hiperbola, które kumuluje się, jeśli współwystępuje w bezpośrednim sąsiedztwie (pionowym lub poprzecznym) z innymi przejawami tych typów. Podstawowa lista typologiczna georadarowych przejawów spękań jest następująca:

- **układ choinkowy (*Ch*)**
- **grupa pionowa (*Gp*)**
- **układ *chi* (*Chi*,  $\chi$ )**
- **zapadnięcie v-kształtne (*V*) spągu lub horyzontu międzywarstwowego**
- **zmiany litologiczne w podbudowie (*zm.p.*) towarzyszące spękanom i dylatacjom**
- **strefa zaburzona (*Z*)**
  - **skupiona (*Z<sub>s</sub>*)**
  - **rozproszona (*Z<sub>r</sub>*)**

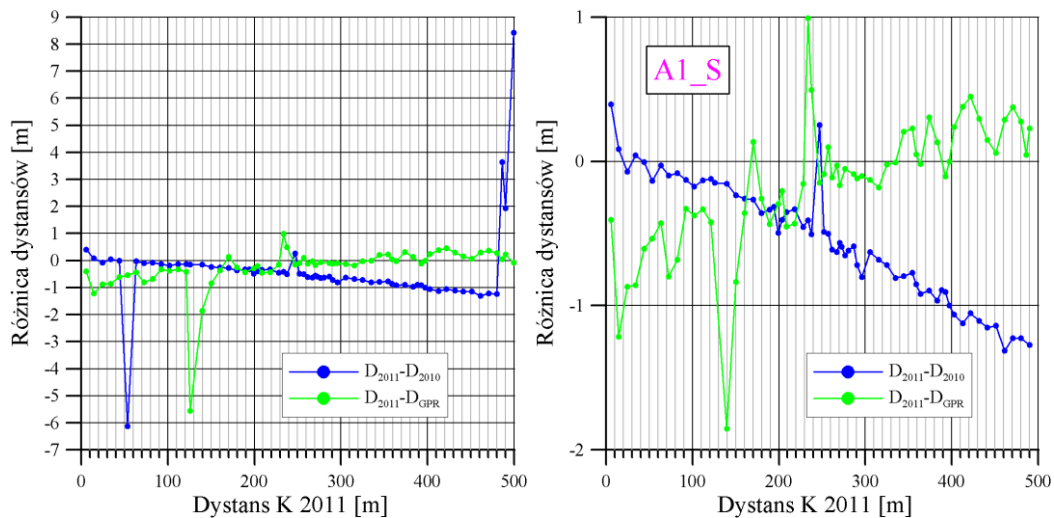
Lista ta ma charakter roboczy i zapewne nie jest zamknięta. Wyróżnione typy nie są bynajmniej kategoriami rozdzielnymi i w praktyce dochodzi do niejednoznaczności przypisania typu. Zadaniem tej listy jest raczej zdefiniowanie języka służącego do opisu istotnych przejawów spękań, jakie widoczne są na echogramach. W skróconej notacji preferuje się użycie dużej litery jeśli przejaw jest wyraźny, a małej jeśli jest uważany za słaby.

Osobną i trudniejszą do zdefiniowania kategorią są strefy zaburzone. Ich naczelnym elementem jest obecność licznych hiperbol lub zaburzeń mogących być interpretowanymi jako fragmenty hiperbol, które jednak nie mają na tyle wyraźnej korelacji pionowej i poprzecznej, aby można było wskazać pozycję spękania z dokładnością do pojedynczych decymetrów. Strefy te są jednak czasem na tyle spektakularne, że ewokują przypuszczenie, że pewne inicjalne zniszczenia spękania są obecne na odcinku o długości kilku metrów ( $Z_s$ ) lub ewentualnie dłuższym ( $Z_r$ ). Strefy te należy odróżniać od szczególnego rodzaju zaburzenia jakim są kratki maskujące występujące generalnie na całym długim odcinku z mniej więcej jednolitym nasileniem, a ich obecność jest wiązana z użyciem gruboziarnistego kruszywa w górnych warstwach asfaltowych. Kratki te mają stałe i nietypowe jak dla ramion hiperbol nachylenie linii. Specyficzny zespół przejawów charakterystyczny dla dylatacji w nawierzchniach betonowych ma oznaczenie *Dyl*, zaś zespół znamionujący spękania międzywarstwowe jest oznaczany *Sw*.

W trakcie badań pojawiła się konieczność wprowadzenia próby ilościowej klasyfikacji nasilenia georadarowych przejawów obecności spękania. Przy konstruowaniu tej wielkości należy wziąć pod uwagę, czy przejawy (układy choinkowe, grupy pionowe, układy chi, zapadnięcia v-kształtne, strefy zaburzeń) występują na wszystkich trzech profilach, mają korelowalne przestrzennie potwierdzenia na przynajmniej dwóch z trzech sąsiednich profili oraz czy przejawy te mają wyraźną tendencję do wkraczania w górne warstwy asfaltowe. Tylko przy powyższych warunkach można uznać, że przejawy mają silne (istotne) konsekwencje diagnostyczne, upoważniające do przypuszczenia, że mamy do czynienia ze spękaniami postępującym od dołu. Ta wersja skali mierzącej nasilenie przejawów georadarowych nastawiona jest oczywiście na spękania potencjalnie obserwowalne zewnętrznie, gdyż powstała w celu testowania korelacyjnego metody. Nasilenia objawów opisuje następująca skala:

- 5 ewidentne; zauważalne bez trudności
- 4 wyraźne; wymagające uwagi, ale nie budzące wątpliwości
- 3 zauważalne; wymagające dyskusji, a czasem wcześniejszego wskazania
- 2 wątpliwe
- 1 mało prawdopodobne
- 0 niewidoczne

Nasilenia od 3 do 5 to kategoria istotna diagnostycznie w tym sensie, że można przypuszczać o obecności spękania na podstawie echogramu. Stopnie 1 i 2 służą raczej do odnotowania, że widoczne wizualnie spękanie ma słabe, niepewne przejawy na echogramie, które pozwalają na przykład podać jego warunkową lokalizację na echogramie.



Rysunek 4.1 Krzywe kalibracyjne różnych pomiarów dystansu oparte o spękania obserwowane zarówno na powierzchni jak i zapisie georadarowym na odcinku A1\_S drogi DK22, przed korektą (rysunek lewy) oraz po usunięciu błędów identyfikacji (rysunek prawy)

Spękania widoczne zarówno na powierzchni jak i na echogramach pozwalają na skonstruowanie krzywej kalibracyjnej (przykład na Rysunku 4.1) przeliczającej dystans mierzony kółkiem pomiarowym przy obserwacji powierzchni na dystans pomiaru GPR. W ten sposób spękanom widocznym na powierzchni można przypisać pozycję na echogramie i sprawdzić czy mają one manifestację georadarową i jakie jest jej nasilenie. Procedura korelacyjna pozwala wykluczyć także w znacznym stopniu błędne przypisanie spękań obserwowanych wizualnie. Chociaż jest to zadanie żmudne trzeba je podejmować zawsze, gdy porównujemy dwa niezależne pomiary dystansu, a zależy nam na prawidłowej identyfikacji obiektów lub wysokiej precyzji. Precyzyjna korelacja dystansu jest w tych badaniach niezbędna, ponieważ w przypadku każdego pojedynczego spękania trzeba ustalić czy ma on przejawy na echogramie, czy też nie. Dlatego zadanie to zostało otoczone szczególną troską.

## 5 Analiza porównawcza uzyskanych danych w okresie trzech lat od rozpoczęcia pomiarów.

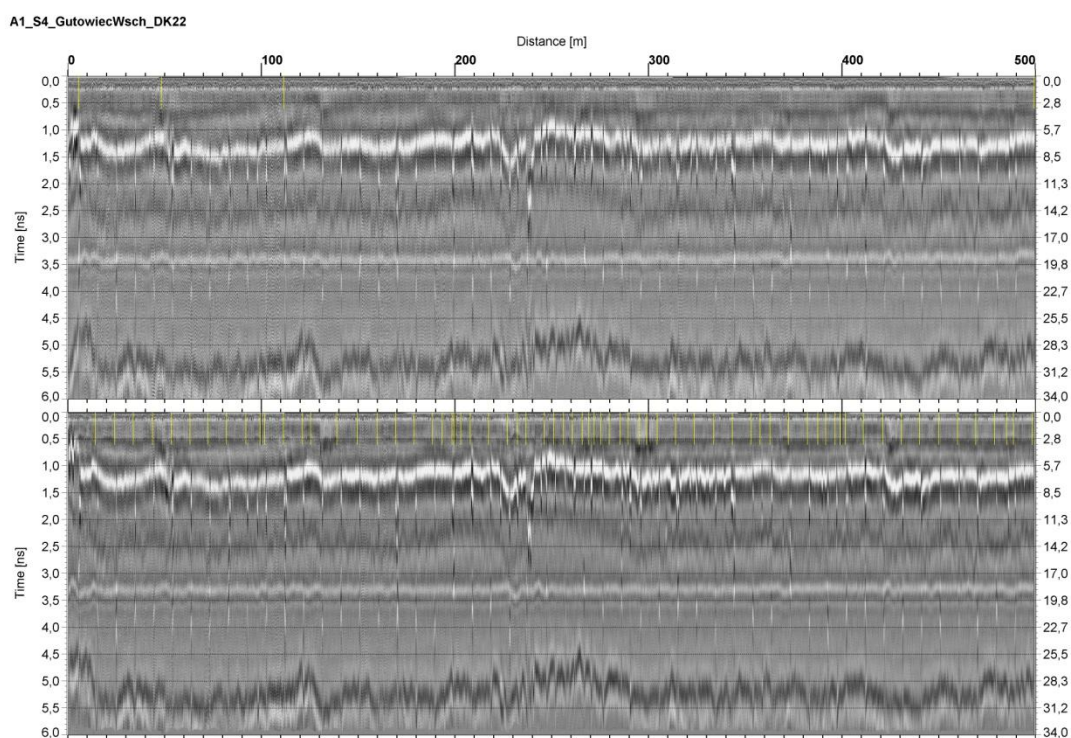
Kolejny rok obserwacji ewolucji spękań i ich obrazu georadarowego pokazał, że zmiany na echogramach są na tyle nieduże, że trudno mówić o obserwacji rozwoju spękań za pomocą georadaru w skali czasu jednego roku. Wprawdzie można odnotować przypadki wyraźnego nasilenia się wcześniej obserwowanych osobliwości, ale można ten efekt wiązać z niedokładnością powtórzenia trasy przejazdu, odmiennym stanem nie usuniętego do końca tła maskującego, czy też innym stopniem zawilgocenia szczelin. O tym ostatnim efekcie można mówić szczególnie w przypadku odcinka B\_S, gdzie przypadki nasilenia się osobliwości (szczególnie na horyzontach międzywarstwowych) są liczne, a pomiar w 2011 roku został wykonany po deszczowej nocy.

Dzięki użyciu metody skanów równoległych, kontynuowane obserwacje potwierdziły użyteczność sformułowanych wcześniej kryteriów diagnostycznych identyfikacji spękań,

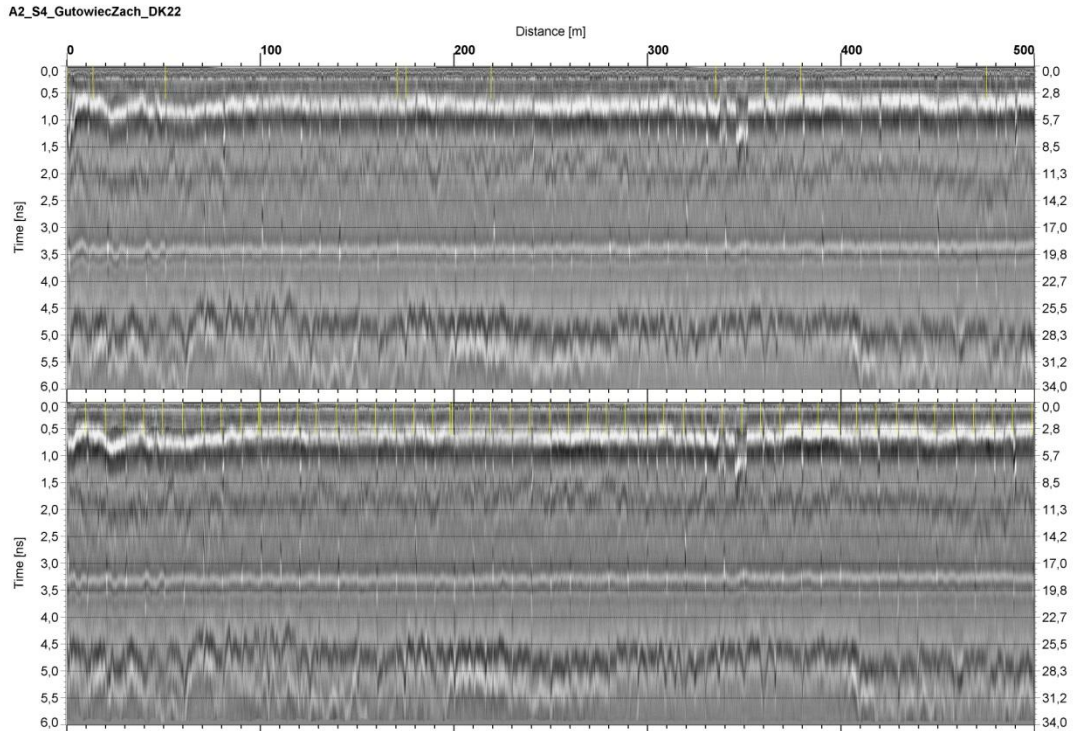
które znajdują wyraz w pojęciach układu choinkowego, grupy pionowej i układu chi (oraz w kształtnego zapadnięcia spągowego). Ponadto pojawiła się motywacja do doprecyzowania, czy też szerszego opisanie pojęcia strefy zaburzonej echogramu w sensie jaki może ona mieć znaczenie dla identyfikacji spękań poprzecznych.

Pomimo braku spektakularnej ewolucji georadarowego obrazu defektów, zostało zaobserwowane zjawisko kierujące wnioski w odmienną stronę. Nowo ujawnione na powierzchni spękania (szczególnie liczne na odcinku B\_S) pojawiły się w miejscach, gdzie już rok wcześniej odnotowano osobliwości (typu odspojeniowego) na horyzontach międzywarstwowych. Efekt ten sugeruje, że inicjalne defekty procesu pęknięcia mogą mieć istotnie wcześniejszą genezę od pojawienia się spękań.

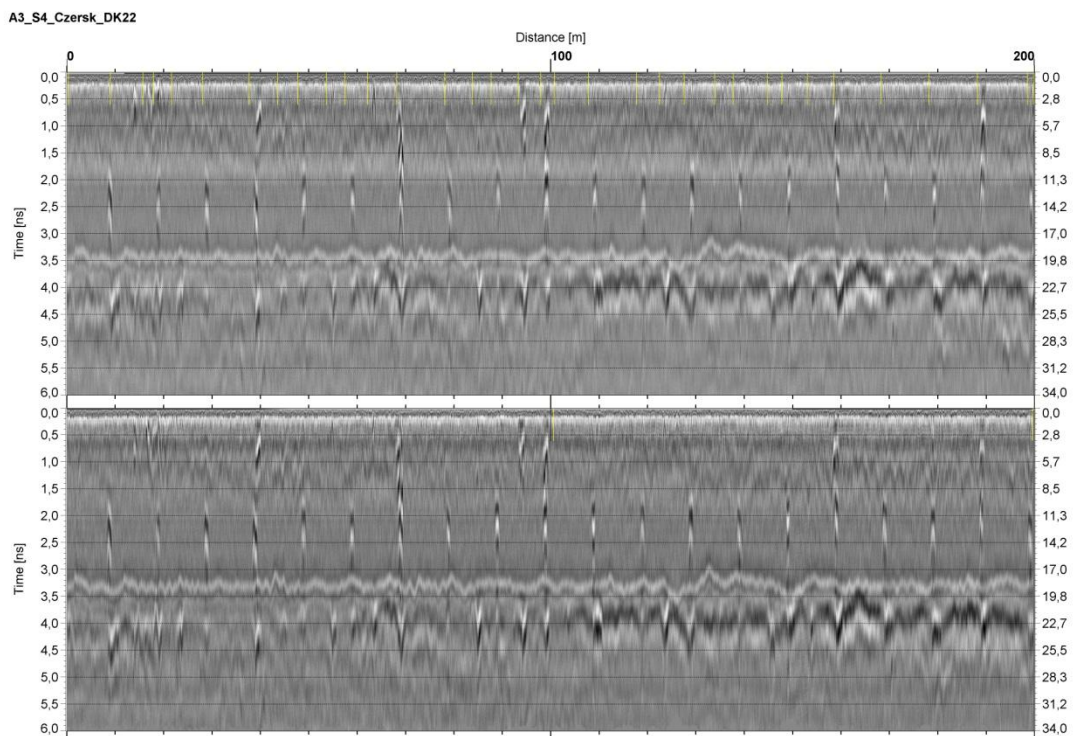
Na Rysunkach 5.1-5.6 zamieszczono echogramy radarowe uzyskane w trakcie pomiarów w latach 2010 i 2011. Ze względu na różnice w procedurze pomiarowej, którą wprowadzono w 2010 roku nie przedstawiono tu wyników z pomiaru w 2009 roku. Tego rodzaju zestawienie byłoby nieporównane i wprowadzałoby szereg niejasności interpretacyjnych. Pomiar z 2009 roku wraz z ich interpretacją zostały omówione i przedstawione w raportach częściowych niniejszej pracy.



Rysunek 5.1 Echogramy uzyskane w latach 2010 (echogram górny) i 2011 (echogram dolny) A1\_S

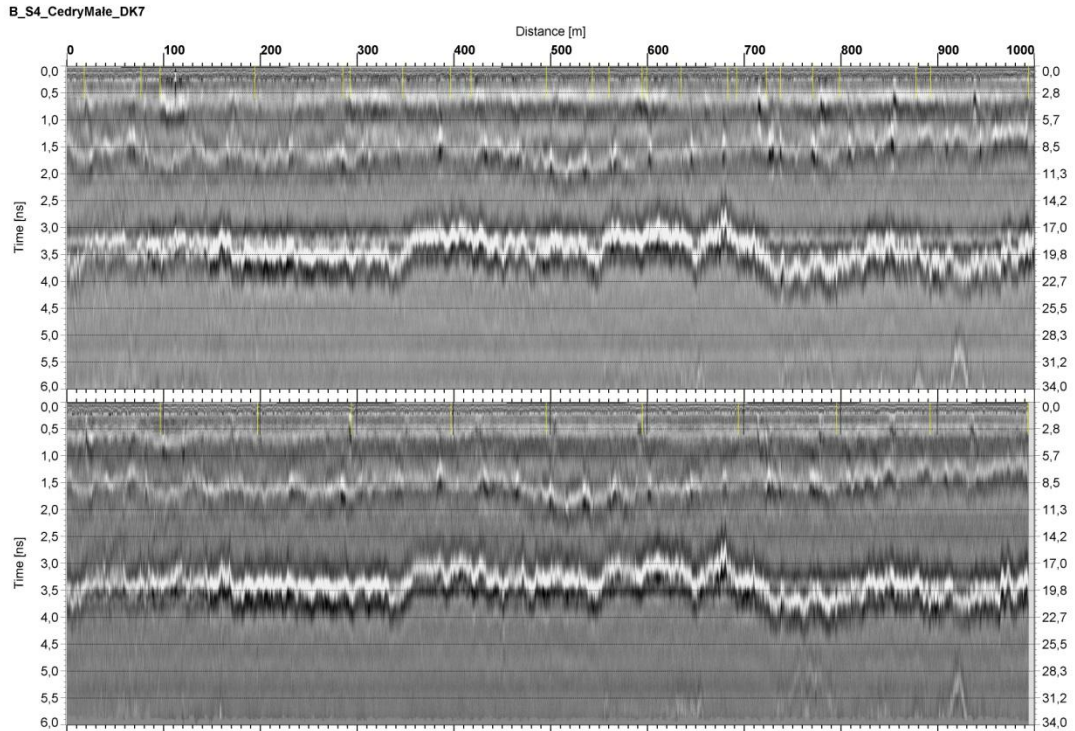


Rysunek 5.2 Echogramy uzyskane w latach 2010 (echogram górny) i 2011 (echogram dolny) A2\_S

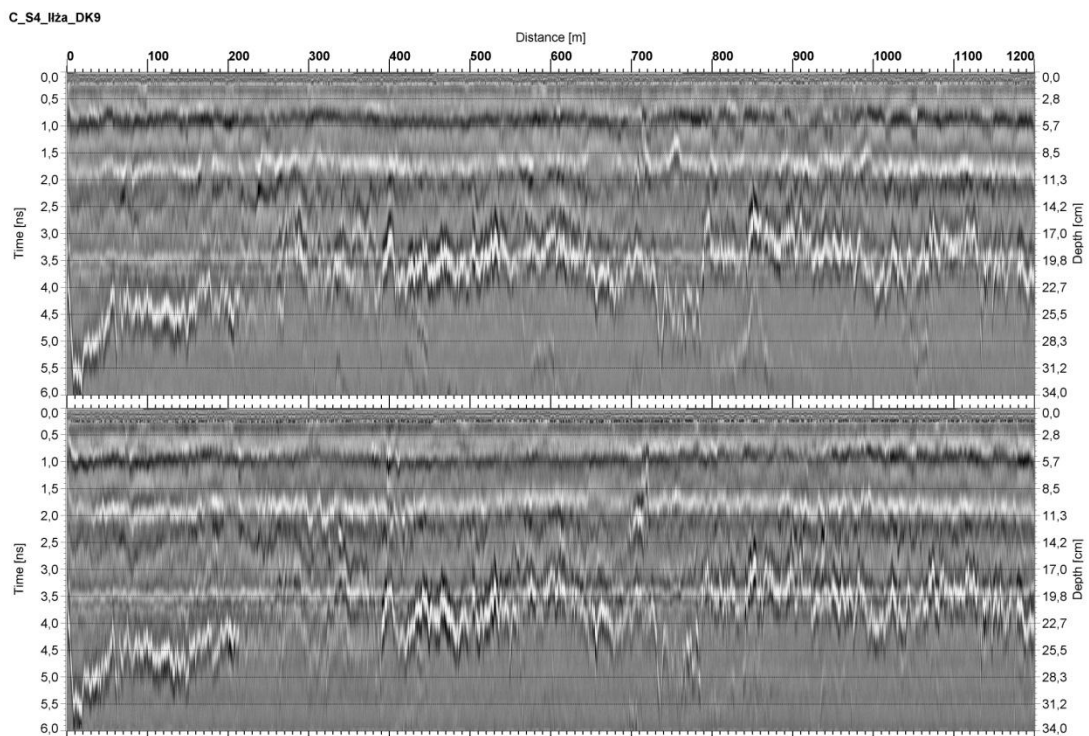


Rysunek 5.3 Echogramy uzyskane w latach 2010 (echogram górny) i 2011 (echogram dolny) A3\_S



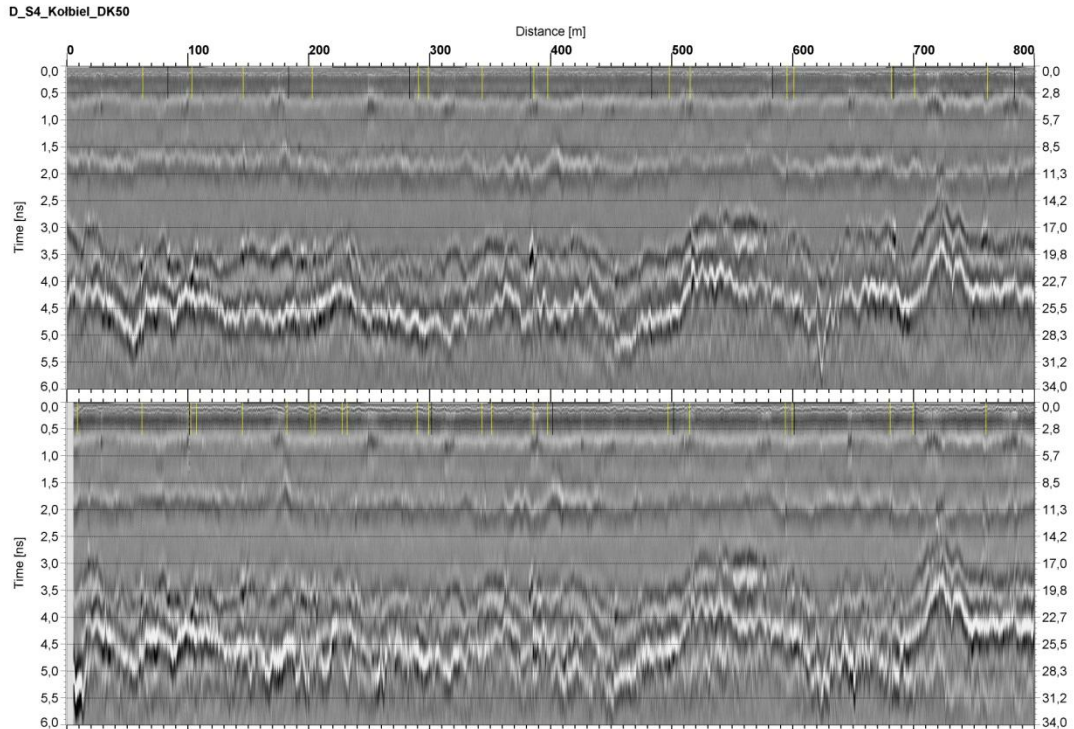


Rysunek 5.4 Echogramy uzyskane w latach 2010 (echogram górny) i 2011 (echogram dolny) B\_S



Rysunek 5.5 Echogramy uzyskane w latach 2010 (echogram górny) i 2011 (echogram dolny) C\_S





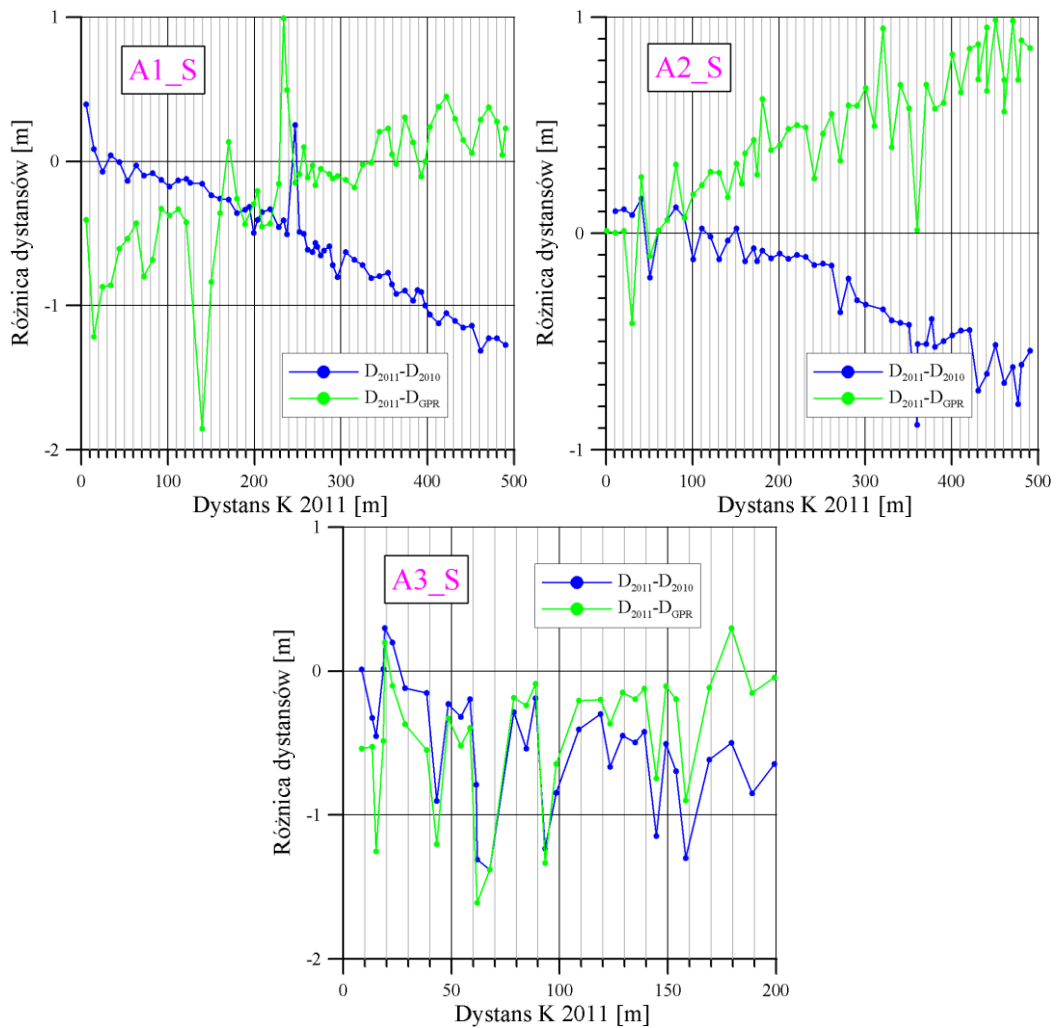
Rysunek 5.6 Echogramy uzyskane w latach 2010 (echogram górny) i 2011 (echogram dolny) D\_S

### 5.1 Odcinki A1\_S, A2\_S i A1\_S - drogi betonowe DK 22

Odcinki A1\_S, A2\_S oraz A3\_S należą do drogi DK 22 zbudowanej z płyt betonowych. Odcinek A2\_S jak A1\_S charakteryzuje się analogicznym stylem budowy z tą jedną różnicą, że płyty betonowe zostały tutaj przykryte jedynie warstwą ścierną ponacinaną poprzecznie, wyłącznie w pobliżu dylatacji. Na odcinku A1\_S pod warstwą ścierną wbudowano warstwę wyrównującą, a nacięcia wykonano jak się wydaje nie tylko w miejscach dylatacji, ale także tam, gdzie znajdują się pęknięcia mimędzywarstwowe.

Zjawiska właściwe drogom betonowym zostały dokładnie przebadane i rozlegle opisane we wcześniejszych etapach badań i dlatego obecnie wykonano jedynie skanowania w pojedynczym śladzie oraz inwentaryzację spękań w celu stwierdzenia, czy zachodzą widoczne zmiany w stanie spękań na przestrzeni jednego roku. Dokończono również zestawienia statystyczne i korelację obserwacji.

Nie jest zaskoczeniem, że w obrazie georadarowym i w inwentarzu spękań ponad siedemdziesięcioletniej drogi betonowej zmiany w tak krótkim okresie są niezauważalne. Jedyne zmiany obserwuje się w asfaltowej warstwie ścierną wbudowanej na tych dwóch odcinkach.



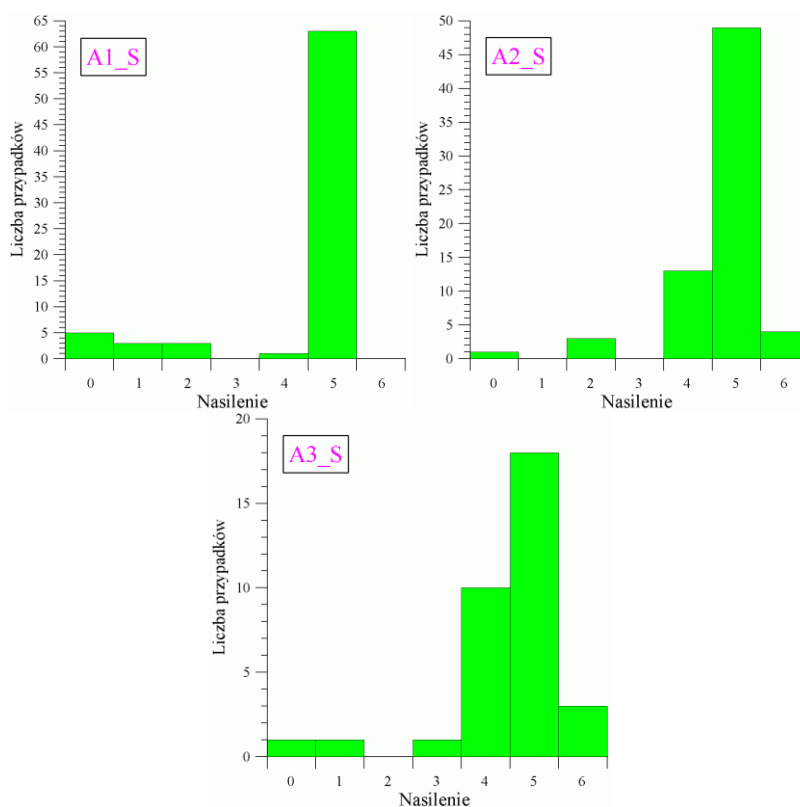
Rysunek 5.7 Krzywe kalibracyjne różnych pomiarów dystansu oparte o spękania skorelowane w stopniu wystarczająco poprawnym na trzech odcinkach drogi DK22: A1\_S, A2\_S oraz A3\_S.

Katalogowanie spękań i ich korelacja z wynikami GPR nastęrczyła pewnych dylematów związanych z nacięciami technologicznymi warstwy ścieralnej. Nacięcia te wykonywane były najczęściej nad dylatacjami, a czasem nad spękaniami międzywarstwowymi. Powoduje to trudność przy próbach analizy statystycznej spękań, gdyż uszczelnione asfaltem szczeliny w zasadzie nie są typowymi spękaniami. Przebijające się spękanie czasem na takie nacięcie trafia, a czasem nie. Tablice katalogowe są w takich przypadkach raczej formalnym zestawieniem korelacyjnym szczelin i nacięć, zaś problem ujawniania się spękań na powierzchni ma charakter odrębny.

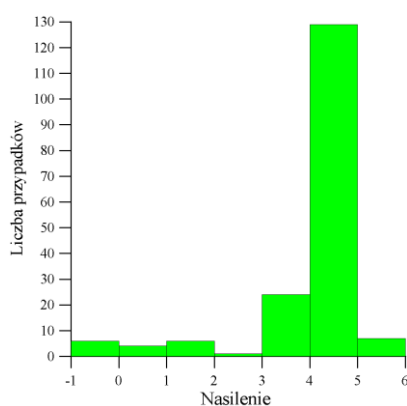
Spękania międzywarstwowe w nawierzchniach betonowych są zwykle znakomicie widoczne także na echogramach, chociaż są mniej spektakularne od przejawów dylatacji. We wcześniejszych bardzo szczegółowych analizach odsłoniętej (nieprzykrytej warstwą ścieralną) nawierzchni betonowej (odcinek A3\_S) stwierdzono ścisłą korelację powierzchniowych defektów i danych GPR. Stąd obecne analizy korelacyjne pominęły szczegółową dyskusję rzadkich słabszych defektów tym bardziej, że na odcinkach tych nie zaplanowano skanowania w równoległych profilach. Oszacowanie liczności słabo

widocznych defektów może być przez to zaniżone, aczkolwiek nie jest to raczej istotna różnica.

Statystyka diagnozowanych nasileń w nawierzchniach betonowych jest zdominowana przez dylatacje, które stanowią dominującą populację o bardzo dobrej widoczności, celowo zaniżanej, choć przewyższającej wszelkie znamiona spękań w nawierzchniach asfaltowych. Być może rozwijając konwencję przypisywania nasileń należałoby nadzwyczaj spektakularnym zespołom przejawów towarzyszącym dylatacjom przypisywać stopnie 6, a nawet 7. Dylatacje nie są jednak spękaniami we właściwym sensie, jakimi są natomiast spękania międzywarstwowe, które zostaną wspomniane w podsumowaniu.



Rysunek 5.8 Histogramy nasileń georadarowych przejawów spękań poprzecznych (wraz z dylatacjami) w nawierzchniach trzech badanych odcinków betonowych.



Rysunek 5.9 Zbiorczy histogram nasileń georadarowych przejawów spękań poprzecznych (wraz z dylatacjami) w nawierzchniach betonowych.

Poniżej przedstawiono tabele korelacyjne spękań, nacięć i dylatacji dla odcinków A1S, A2\_S oraz A3\_S. Użyte w kolumnie „znamiona GPR” symbole są zgodne z oznaczeniami typów układów opisanymi w rozdziale 4. W kolumnie „symbol” dla każdego zaobserwowanego pod powierzchnią pęknięcia użyto oznaczenia N.

Tabela 5.1 Tablica korelacyjna spękań, nacięć i dylatacji - odcinek A1\_S

A1_S						
Symbol	Dystans K 2010	DystansGPR	Dystans K 2011	Znamiona GPR	Nasilenie	Stan wizualny 2011
S01	5	5.8	5.394	Dyl: N,Db,CH,CHI	5	N
S02	14.2	15.5	14.285	Dyl: N,CH,V	5	N
S03	24.3	25.1	24.23	Dyl: N, Db,chi	5	N
S04	33.9	34.8	33.941	Dyl: N, Db, V	5	N
S05	43.9	44.5	43.896	Dyl: N,Db, CH, v	5	N
S06	53.6	54.0	53.466	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S07	63.3	63.7	63.272	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S08	72.7	73.4	72.602	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S09	82.7	83.3	82.619	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S10	92.6	92.8	92.473	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
N01		98.1		Sw: N, v	5	
S11	102.3	102.5	102.125	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S12	112	112.2	111.869	Dyl: N, Ch, Zs, Db, chi	5	N
S13	121.5	121.8	121.378	Dyl: N, Ch, Db, v, chi	5	N
S14	126.1		125.952		0	N
N02		131.5		Dyl: N, Ch, Db, chi	5	
S15	139.6	141.3	139.446	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S16	150.3	150.9	150.065	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S17	160.5	160.6	160.24	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S18	170.4	170.0	170.134	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S19	180	179.9	179.643	Dyl: N, Ch, Db, v	5	N
S20	189.5	189.6	189.166	Dyl: N, Ch, Db, v	5	N
S21	194.4		194.084		0	N
S22	199.4	199.2	198.906	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S23	204.1	203.9	203.696	Hsl	2	N
S24	208.9	209.0	208.549	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S25	218.5	218.6	218.168	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
N03		223.7		Sw: N, v	5	
S26	228.6	228.3	228.146	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S27	233.8	232.4	233.392	Sw: N, v	5	N
S28	238.1	237.1	237.594	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
N04		244.6		Sw: N, chi	5	
S29	247	247.4	247.252	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S30	252.3	251.9	251.811	Sw: N, v	5	N
S31	257.6	257.0	257.098	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
N05		259.2		Sw: n, dd	2	
S32	262.2	261.7	261.588	Sw: N, Dd	5	N
S33	267.4	266.8	266.773	Dyl: N, Ch, Db, v	5	N
S34	270.8	270.4	270.234	Sw: N, chi	5	N
S35	273.2		272.609		0	N
S36	277.1	276.5	276.449	Dyl: N, Ch, Db, v	5	N
S37	281		280.38		0	N
S38	286.8	286.3	286.211	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
N06		288.3		n, dg	2	
S39	291.3	290.7	290.582	Sw: N, Chi, Ds.	5	N
N07		294.6		N	1	
S40	296.7	296.0	295.898	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S41	306.2	305.7	305.571	Dyl: N, Ch, Db, v	5	N
N08		308.8		Dg	1	
S42	316	315.5	315.319	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
N09		322.0		N	1	
S43	325.7	325.0	324.98	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S44	335.6	334.8	334.793	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S45	345.3	344.3	344.504	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S46	355	354.0	354.227	Dyl: N, Ch, Db, V	5	N
S47	359.6	358.7	358.748	Sw: N, H, Dd	5	N
S48	364.7	363.8	363.782	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S49	374.5	373.3	373.606	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S50	384.2	383.1	383.233	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S51	389.4		388.509		0	N
S52	393.6	392.8	392.695	Dyl: N, Ch, Db	4	N
S53	398.4	397.4	397.4	Sw: N, v	5	N
S54	403.8	402.5	402.739	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S55	413.6	412.1	412.478	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S56	423	421.5	421.949	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S57	432.9	431.5	431.796	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S58	442.5	441.2	441.349	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S59	452.2	451.0	451.06	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S60	462.2	460.6	460.889	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S61	471.8	470.2	470.576	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S62	481.5	480.0	480.274	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
S63		486.2	486.245	Sw: N, dd	5	N
S64	491.2	489.7	489.927	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N
N10		494.4		Sw: Hs, N, chi	5	
S65		499.7		Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N



Tabela 5.2 Tablica korelacyjna spękań, nacięć i dylatacji - odcinek A2\_S

A2_S							
Symbol	Dystans K 2010	Dystans GPR	Dystans K 2011	Znamiona GPR	Nasilenie	Stan wizualny 2010	Stan wizualny 2011
S00a		0.7	0.712000000000003	Dyl: N, Ch, Db, chi, zm.p.	5		n - nacięcie
S00b			4.521		5		n
S01	10.6	10.7	10.703	Dyl: N, Ch, Db, v, chi	5	N	n
N0		13.4		n, ch	2		
S02	20.6	20.7	20.713	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N	n
S03	30.1	30.6	30.185	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N	n
S04	40.6	40.5	40.762	Dyl: N, Ch, Db, chi, zm.p.	5	N	n
S05	50.8	50.7	50.596	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	P	p - pęknięcie
S05a			50.695	j.w.			n
S06	60.7	60.7	60.715	Dyl: N, Ch, Db, v, chi	5	N	n
S07	70.7	70.7	70.763	Dyl: N, Zs, Ch, Db, chi	6	N	n
S08	80.6	80.4	80.72	Dyl: N, Ch, Db, v, chi	5	N	n
S09	90.7	90.7	90.772	Dyl: N, Ch, Db, v, chi	5	N	n
S10	100.8	100.5	100.682	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N	n
N1		104.2		Sw: N, V	5		
S11	110.7	110.5	110.723	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	No	n
S12	120.7	120.4	120.685	Dyl: N, Ch, Db, V, chi	6	N	n
N2		125.3		Sw: N, V, chi	4		
S13	130.7	130.3	130.582	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N	n
S14	140.7	140.5	140.668	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N	n
S15	150.6	150.3	150.624	Dyl: N, Ch, Db, chi, zm.p.	4	N	n
S15a		156.7	156.93	hs	2		p
S16	160.8	160.3	160.671	Dyl: N, Ch, Db, z, zm.p.	5	N	n
S17	170.7	170.2	170.633	Dyl: N, Ch, Db, chi	4	N	n
S18	174.9	174.5	174.773	Sw: N, Ch, V, zm.p.	5	P	p
S19	180.8	180.1	180.722	Dyl: N, Zs, Ch, Db, v, chi	5	N	n
N3	184.8	185.5		Sw: N, v	4	Pp	
S20	190.8	190.3	190.686	Dyl: N, Ch, Db, v, chi	4	N	n
S21	200.7	200.2	200.608	Dyl: N, Ch, Db, v, chi	5	N	n
S22	210.7	210.1	210.584	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N	n
N4	216.7	216.3		Sw: N, v, chi	5	Pp	
S23	220.8	220.2	220.701	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N	n
S24	230.8	230.2	230.691	Dyl: hs, N, Ch, Db, chi	4	N	n
S25	240.8	240.4	240.654	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N	n
S26	250.8	250.2	250.662	Dyl: hs, N, Ch, Db, v, chi	5	No	n
S27	260.8	260.1	260.652	Dyl: hs, N, Ch, Db, chi	5	No	n
S28	271	270.3	270.636	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N	n
S29	280.8	280.0	280.592	Dyl: N, Ch, Db, v, chi	5	N	n
S30	290.9	290.0	290.591	Dyl: N, Ch, Db, chi	4	N	n
N5	296.2	295.3		Sw: N, v, chi	5	zapadnięcie	
S31	301	300.0	300.673	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N	n
N6	306	305.0		Sw: N, v	5	zapadnięcie	
S32	310?	310.1	310.596	Dyl: N, Ch, Db, v, chi	4	N	n
N7		314.3		Sw: N, v	5		
N7		317.9		Sw: N, v	5		
S33	321	319.7	320.649	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N	n
N9	325.6	324.4		Sw: N, chi, zm.p.	5	zapadnięcie	
S34	330.9	330.1	330.498	Dyl: N, Ch, Db, V, chi	5	N	n
N10		337.0		Sw: N, v, chi	5		
S35	341	339.9	340.587	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N	n
N11	347.1	345.5		Sw: N, v, chi	4	zapadnięcie	
S36	351	350.0	350.579	Dyl: N, Ch, Db, v, chi	5	N	n
S37		359.8		Dyl: N, Zs, Ch, Db, V, chi	5		
S37'	361	360.1	360.117	Hsl	5	N+P	n
S37a	361		360.49	j.w.		zapadnięcie	s - siatka pęknięć
N12		365.8		Sw: N, H, V, chi, zm.p.	6		
S38	371.2	370.0	370.689	Dyl: N, Ch, Db, chi	4	N	n
S39	377.2		376.806		0	Pps	p
S40	381	379.9	380.476	Dyl: N, Ch, Db, V, chi	5	N+Pps	n+p
S41	391	389.9	390.504	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N	n
S42	401	399.7	400.529	Dyl: N, Ch, Db, chi	4	N	n
S43	411	409.9	410.553	Dyl: N, Ch, Db, v, chi	5	N	n
S44	421	419.7	420.554	Dyl: N, Ch, Db, chi	6	N	n
S45	431.2	429.6	430.475	Dyl: N, Ch, Db, v, chi, zm.p.	5	N+Pps	p
S45a		429.9	430.613	j.w.			n
S46	441	439.4	440.352	Dyl: N, Ch, Db, chi, zm.p.	5	N	p
S46a		439.8	440.46	j.w.			n
S47	451	449.5	450.486	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N	n
S48	461	459.6	460.31	Dyl: N, Ch, Db, V, chi	5	N	p
S48a		459.9	460.464	j.w.			n
S49	471	469.4	470.383	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N	n
S50	477.7	476.2	476.911	Sw: Hs, H/N, chi?	2	P	p + s
S51	481	479.5	480.393	Dyl: N, Ch, Db, chi	4	N	n
N13		484.4		Sw: N, v, chi, zm.p.	4		
S52	491	489.6	490.458	Dyl: N, Ch, Db, chi	5	N	n

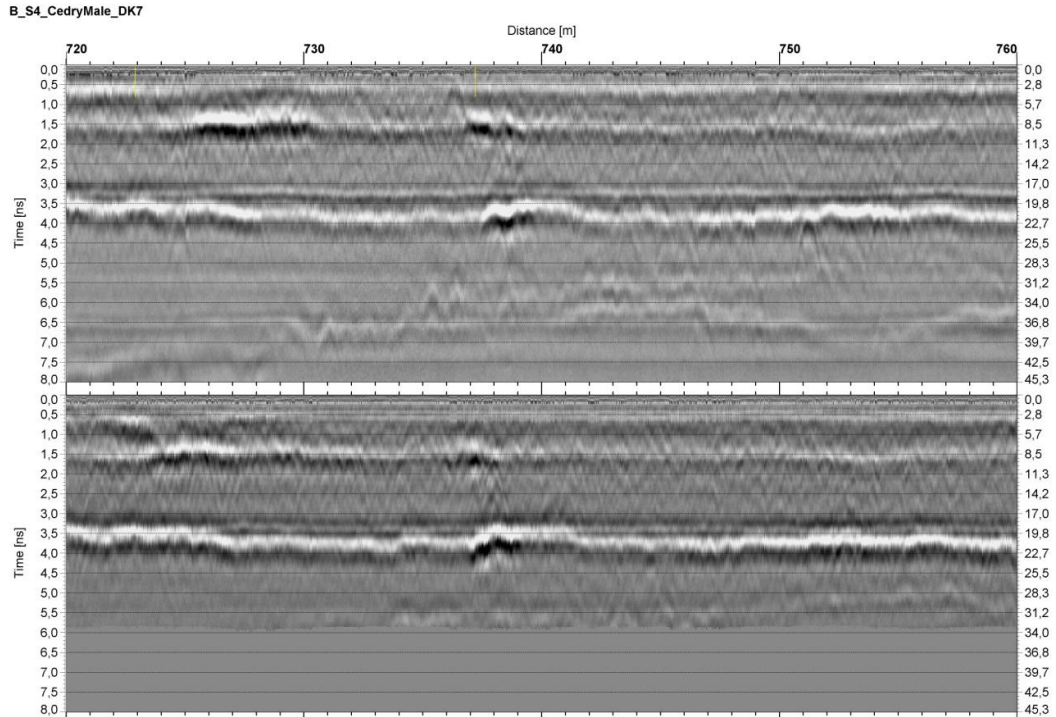
Tabela 5.3 Tablica korelacyjna spękań, nacięć i dylatacji - odcinek A3\_S

A3 S						
Symbol	Dystans K 2010	Dystans GPR	Dystans K 2011	Znamiona GPR	Nasilenie	Stan wizualny 2011
S01	8.35	8.9	8.362	Dyl: Hs, Ch, Db, chi	5	P- pęknięcie
S02	13.8	14.0	13.475	Sw: Hs, chi	4	P ukośne
S03	15.7	16.5	15.248	Sw: Hs, chi	3	P ukośne
S04	18.4	18.9	18.414	Dyl: Hs, Ch, Db, V	5	D - dylatacja
S05	18.9	19.0	19.2	S: Hs, Ch, Db, chi	5	P ukośne
S06	22.4	22.7	22.6	Sw: Hs, chi, DD, zm.p.	5	P
S07	28.65	28.9	28.531	Dyl: Hs, Ch, Db, chi	5	D
S08	38.7	39.1	38.55	Dyl: Hs, N, Ch, Db, V/Chi	6	D
S09	44	44.3	43.099	z, Dd	1	P
S10	48.8	48.9	48.573	Dyl: Hs, Ch, Db, chi	5	D
S11	54.7	54.9	54.381	Sw: HSI, V	5	P
S12	58.8	59.0	58.605	Dyl: Hs, Ch, Db, chi	4	D
S13	62.2		61.41		0	P
S14	63.2	63.5	61.89	Sw: HSI, DD, zm.p.	6	P
S15	69	69.0	67.621	Dyl: Hs, Zs, Ch, Db, V	6	D
S16	79	78.9	78.714	Dyl: Hs, Ch, Db, chi	4	D
S17	85.2	84.9	84.662	Sw: Hs, V	5	P
S18	89	88.9	88.812	Dyl: Hs, Ch, Db, chi	4	D
S19	94.4	94.5	93.167	Sw: N, Ch, V, zm.p.	5	P
S20	99.2	99.0	98.355	Dyl: N, Ch, Db, v, chi, zm.p.	5	D
S21	109.2	109.0	108.796	Dyl: Hs, Ch, Db, chi, zm.p.	5	D
S22	119.2	119.1	118.901	Dyl: Hs, Ch, Db, chi	4	D
S23	123.9	123.6	123.235	Sw: Hs, V	5	P
S24	129.4	129.1	128.953	Dyl: Hs, Ch, Db, V	5	D
S25	135.4	135.1	134.904	Sw: Hs, chi	4	P
S26	139.4	139.1	138.977	Dyl: Hs, Ch, Db, chi	4	D
S27	145.8	145.4	144.655	Sw: Hs, V	4	P
S28	149.5	149.1	148.995	Dyl: Hs, Ch, Db, chi	4	D
S29	154.4	153.9	153.704	Sw: Hs, Dd/zm.p.	4	P
S30	159.6	159.2	158.3	Dyl: N, Ch, Db, V, chi	5	D, łata
S31	169.7	169.2	169.085	Dyl: Hs, Ch, Db, chi	5	D
S32	179.9	179.1	179.4	Dyl: Hs, Ch, Db, chi, zm.p.	5	D
S33	189.8	189.1	188.95	Dyl: Hs, N, Ch, Db, chi, zm.p.	5	D, łata
S34	199.8	199.2	199.154	Dyl: Hs, Ch, Db, chi, zm.p.	5	D

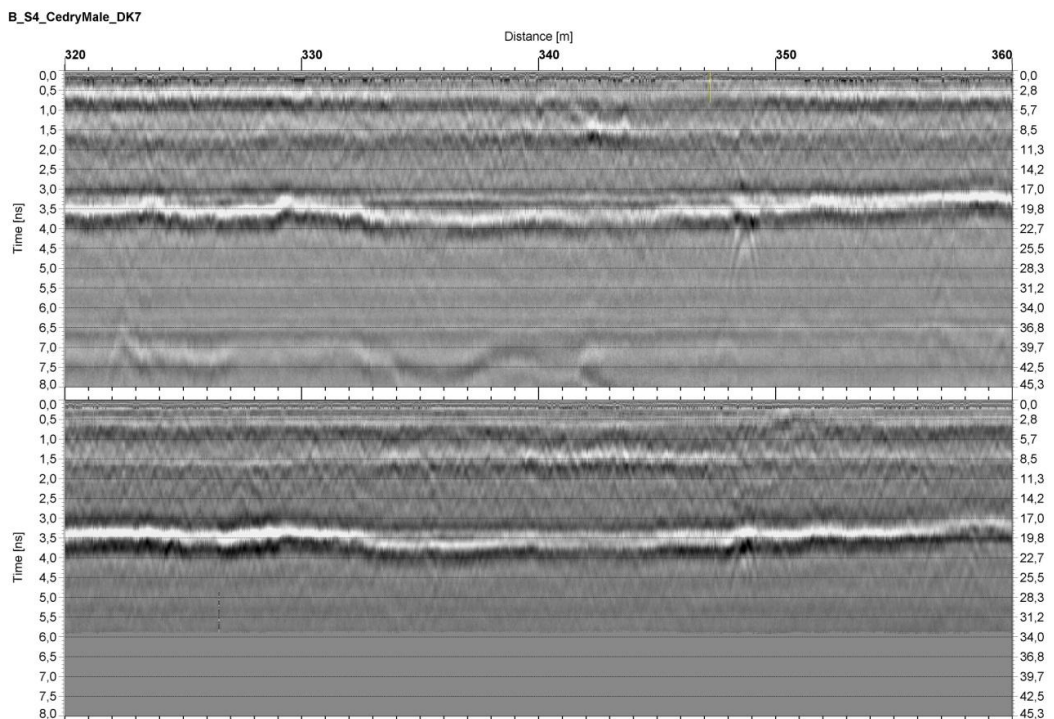
## 5.2 Odcinek B\_S

Na odcinku tym, w roku 2010 zanotowano 7 spękań (w tym jedno podłużne), a w ciągu kolejnego roku pojawiło się na powierzchni 14 kolejnych pęknięć. W drugim roku pomiarów zaobserwowano tam liczne przypadki lokalnego wzmożenia amplitudy osobliwych refleksów odpowiadających nietypowemu stanowi połączeń międzywarstwowych. Efekt ten może być ewentualnie przypisany większemu zawilgoceniu szczelin, gdyż pomiar został wykonany po deszczowej nocy. Nasilenie to nie koniecznie musi zatem być przejawem rozwoju spękań.

W roku 2010 niektóre z widocznych spękań miały także wyraźne przejawy georadarowe, jednak były także przypadki spękań pozbawionych manifestacji na echogramach (być może z powodu silnej kratki maskującej). Z drugiej strony licznym silnym defektem na echogramach nie towarzyszyły powierzchniowe pęknięcia.

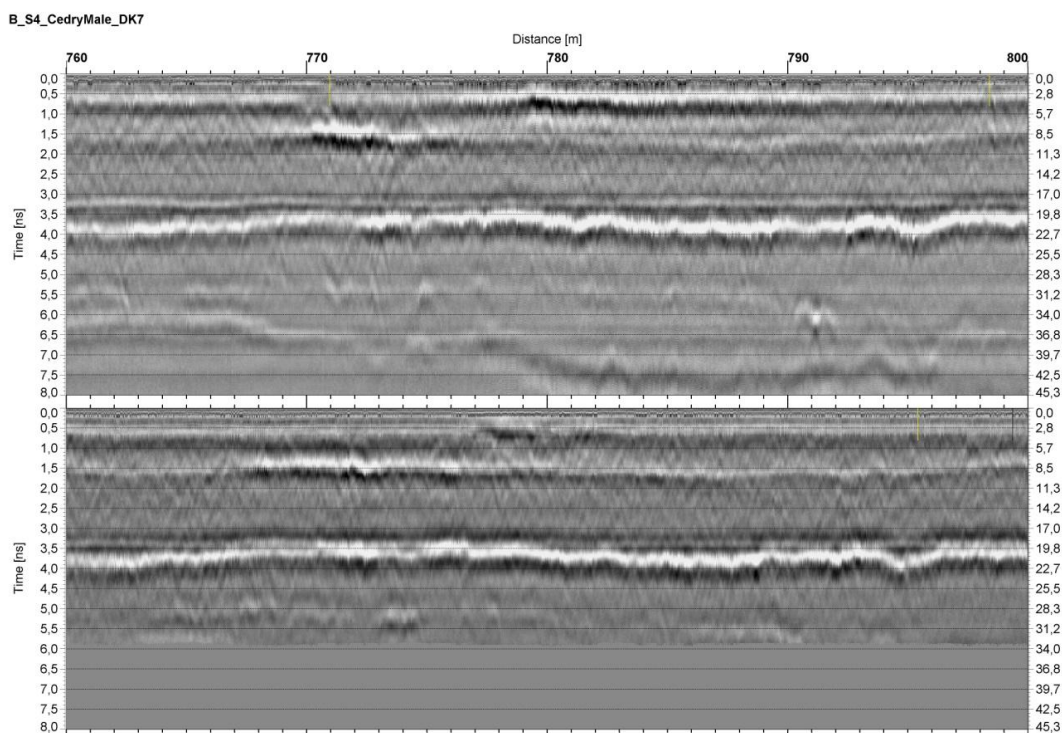


Rysunek 5.10 Przykład lokalnego defektu na horyzoncie międzywarstwowym, który choć w roku 2010 odnotowany został jedynie na echogramie (dolny), uległ lokalnemu wzmocnieniu i objawił się także na powierzchni jako spękanie S08e (dystans 738 m) w roku 2011.



Rysunek 5.11 Przykład spękania S05 (348.7 m) zanotowanego już w roku 2010, któremu towarzyszy na echogramie wyraźny defekt lokalny na horyzoncie odpowiadającym granicy między górnymi warstwami asfaltowymi, a podbudową MCE (około 20 cm głębokości).

Stąd, we wcześniejszych fazach badań wydawało się, że właściwe przejawy georadarowe spękań, chociaż są obserwowane na tym odcinku nie korelują dobitnie z widocznymi spękaniami. Zaskakującą obserwacją było zatem, że nowe spękania jakie pojawiły się na powierzchni, mają istotne powiązanie z rozległymi osobliwościami horyzontów międzywarstwowych, które mogą reprezentować odspojenia. Wiercenie wykonane w roku 2010 (W1\_B\_S) udokumentowało taki właśnie przypadek, to jest spękania rozwijającego się nad odspojeniem. Słaba widoczność właściwych znamion spękań jest zapewne spowodowana tutaj przez tzw. „kratkę maskującą” opisaną już wcześniej, a przypisywaną gruboziarnistej granulacji kruszywa w mieszance mineralno-asfaltowej użytej do budowy tej nawierzchni. Pomimo tych utrudnień na echogramie można znaleźć kilkanaście nietypowych układów choinkowych choć nie korelują z widzianymi obecnie spękaniami, mogą jednak odpowiadać spękanom w trakcie rozwoju, jeśli wziąć pod uwagę obserwowaną dynamikę tego procesu.

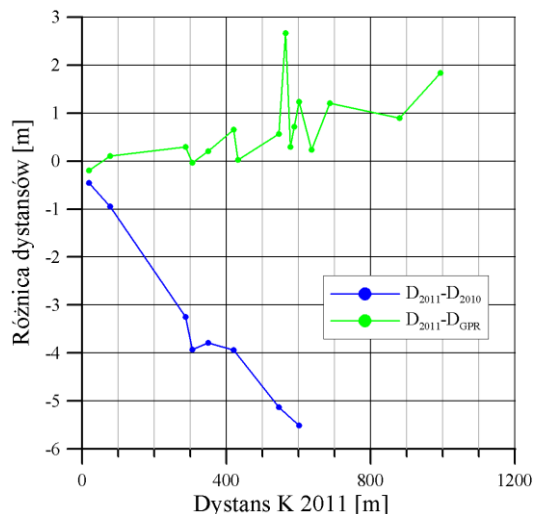


Rysunek 5.12 Przykład lokalnego defektu na horyzoncie międzywarstwowym, który choć odnotowany na echogramie w roku 2010 (dolny) uległ lokalnemu wzmocnieniu i objawił się także na powierzchni jako spękanie S08f (dystans 773 m) w roku 2011.



Tabela 5.4 Tablica korelacyjna spękań - odcinek B\_S

Symbol	Dystans K 2010	Dystans GPR	Dystans K 2011	Znamiona GPR 2010	Znamiona GPR 2011	Nasilenie	Stan wizualny 2011	Natężenie
S01	19.45	19.2	19	gp/ch	gp	2	Ptech	1
S02	78.65	77.6	77.71	ds	gp/chi	2	C zalane	1
S03	290.55	287	287.3	Chi/Z	Ch	5	C	3
S04	308.9	305	304.97	ods/z/dg	z/dg	0	podłużne	1
S05	352.7	348.7	348.91	Z	Ch/Z	4	C	3
S05a			384.11	-	-	0	podłużne	2
S05b			387.35	ods/z	ods/z	2	Pps	1
S06	424.6	420	420.66	Chi/ch	Chi/Ch	4	C zalane	1
S06a		432.8	432.83	dg/ods	ods	2	P siatka	1
S07	550.2	544.5	545.07	chi/z	ch/chi	2	C zalane	1
S07a		561.9	564.57	zs	Ch/Chi	3	Pps	2
S07b		577.4	577.7	dg	z	1	Pps	1
S07c		588	588.72	Gp/Chi	Ch	3	P	2
S08	607.75	601	602.24	Dg/zr	Dg/zr	2	C zalane duple	1
S08a		636.5	636.74	z	dg/zs	2	Pps	2
S08b		685.4	686.61	dd	dd	1	P	2
S08c			725.41	ods	ods	2	P	2
S08d			728.9	ods	ods	2	Pps	1
S08e		738	738.74	Gp/Ch/Z/ods	Gp/Ch/Z/Ods	4	P	3
S08f		773	773.59	Gp/Ch/ods	Gp/Ch/ods	4	P	3
S08g		879	879.9	dd	dd	2	P	3
S08h		992	993.84	dg	dg	2	P	2

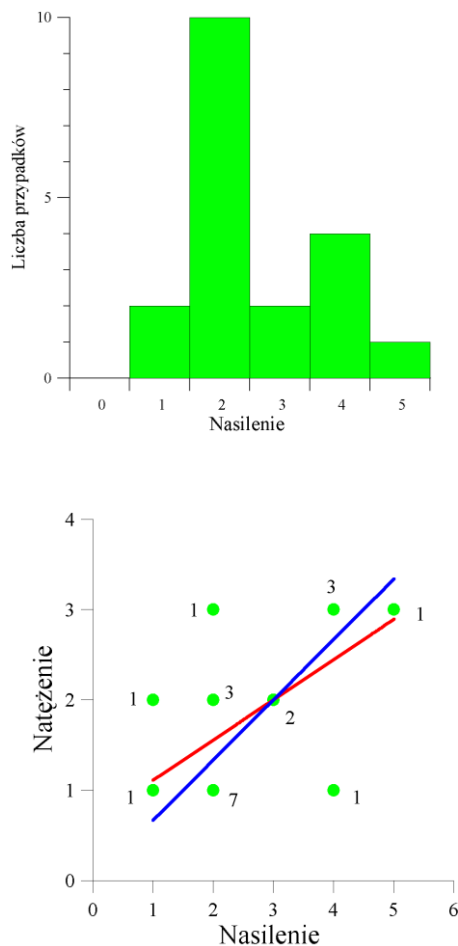


Rysunek 5.13 Krzywe kalibracyjne przeliczenia wyników pomiaru dystansu na odcinku B\_S różnymi metodami: pomiar kółkiem mierniczym w roku 2010 (D2010), pomiar profilografem w roku 2011 (D2011), pomiary dystansomierzem georadaru po wzajemnej synchronizacji (DGPR).

Histogram nasileni przejawów (Rysunek 5.14) GPR przypisanych widocznym na powierzchni spękaniami ma tendencję do płaskiego kształtu, jeśli próbować porównywać go z histogramem odcinka C\_S, który odpowiadałby bardziej zaawansowanemu procesowi spękaniewemu. Odcinek C\_S jest też o tyle odmienny, że nowy, relatywnie cienki pakiet asfaltowy wbudowany został na silnie zniszczonej starej nawierzchni asfaltowej o podbudowie betonowej i obserwowane na echogramach defekty są jak się wydaje obrazem rozwiniętych stref zniszczeniowych starszego pakietu asfaltowego. W przypadku odcinka B\_S mamy do czynienia ze znacznie grubszym pakietem górnych warstw asfaltowych, leżącym na nowej, także grubej podbudowie MCE z co najwyżej szczątkowymi relikami dawnych warstw na samym spodzie. Wszystkie defekty

obserwowane na echogramach są zatem tutaj aktualnie powstającymi, młodymi strukturami.

Obserwowanym na powierzchni spękaniami zostało przypisane natężenie. Statystyczną korelację pomiędzy natężeniem wizualnym, a nasileniem objawów GPR można uznać co najmniej zauważalną.



Rysunek 5.14 Górny: Histogram nasilenia georadarowych przejawów spękań poprzecznych na odcinku B\_S widocznych na powierzchni i przechodzących przez ślad prawego koła prawego pasa nawierzchni (ograniczona tablica korelacyjna tj. bez spękań podłużnych). Dolny: Korelacja nasilenia i natężenia spękań poprzecznych; liczby na wykresie oznaczają liczby przypadków, linia czerwona to regresja liniowa, a linia niebieska to dopasowana zależność proporcjonalna.

### 5.3 Odcinek C\_S

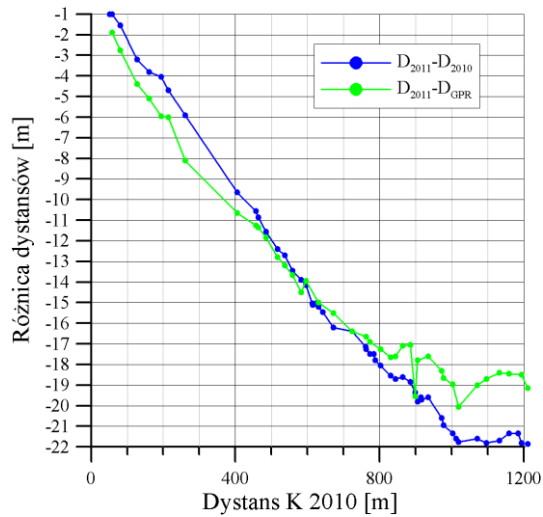
Odcinek C\_S, jako najbardziej obiecujący, zapewnił wystarczającą dla celów niniejszej pracy liczbę przykładów sygnałów georadarowych znamionujących obecność pojedynczych spękań. Analiza statyczna ich korelacji ze spękaniami obserwowanymi na powierzchni pozwoliła wcześniej na sformułowanie kryteriów diagnostycznych identyfikacji rozwiniętych spękań. W obecnej fazie badań wykonano skanowania w trzech równoległych profilach w celu weryfikacji metody diagnostycznej oraz

wykonano dodatkowe cztery wiercenia w celu ogólnego rozpoznania typu struktur zniszczeniowych odpowiedzialnych za spektakularne przejawy georadarowe spękań. Już we wstępnych testach pojawił się wniosek, że cienkie w przybliżeniu płaskie strefy spękaniowe choćby o szerokości nawet pojedynczych centymetrów nie powinny dawać sygnałów wystarczająco silnych, aby można je było zarejestrować w pomiarze georadarowym. Pierwsze przykłady wierceń pochodzące z dróg betonowych pokazywały, że struktury zniszczeniowe dające zauważalne manifestacje bynajmniej nie są małe bo mają rozmiary decymetrowe. Zjawisko to jest łatwe do przeoczenia, gdyż przejawem strefy zniszczeniowej w wierceniu często są rozległe ubytki rdzenia, które mogą być pochopnie wzięte, za niepowodzenie wiercenia np. błąd jego wykonania. Tymczasem ubytki te są nadzwyczaj znaczącym źródłem informacji o procesie niszczenia, gdyż niezniszczony materiał nawierzchni jest pozyskiwany przy wierceniu w postaci litej, co można łatwo unaocznic przez wykonanie wierceń referencyjnych w pobliskich lokalizacjach nie dotkniętych niszczeniem spękaniowym (raport z drugiego etapu).

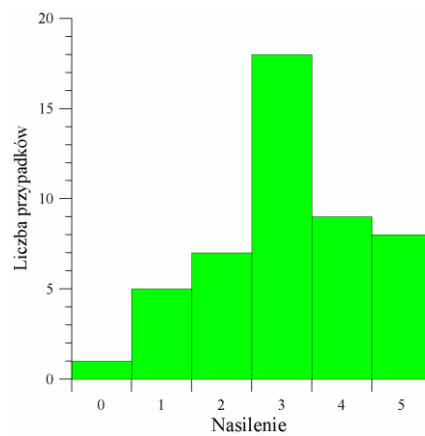
Rozszerzone zestawienie spękań odcinka C\_S zawiera Tabela 5.5. Oprócz wyników inwentaryzacji z lat 2010 (symbol S) i 2011 (symbol S z indeksem małej litery po numerze) zawiera ona także spękania hipotetyczne niewidoczne na powierzchni (symbol N) stwierdzone na podstawie wystarczająco dobitnych objawów georadarowych w roku 2010 i potwierdzone w roku 2011 za pomocą metody skanów równoległych (N1, N5, N6, N7, N8) lub wręcz objawione na powierzchni (N2, N3, N4) oraz hipotetyczne spękania (N1a, N4a) nowo-zapostulowane w roku 2011.

Inwentaryzacji i korelacji z wynikami GPR podlegały także spękania prawego pasa jezdni mimo, że nie był on skanowany, ponieważ jak się okazuje spękania występujące na sąsiednim pasie mają czasem odpowiednik w obrazie GPR, chociaż na skanowanym pasie nie są widoczne wizualnie. Tabela nie zawiera pełnej listy miejsc w których występują słabe przesłanki georadarowe spękań (nasilenie 2 lub 3), jeśli nie odpowiadają im widoczne na powierzchni spękania.

Jeśli z listy korelacyjnej spękań usuniemy te spękania, które nie przechodzą przez skanowaną strefę śladu prawego koła i środka lewego pasa, od pozostałych spękań należałoby oczekiwać ewentualnych manifestacji na echogramach. Statystykę nasilenia tych manifestacji ilustruje histogram. Ma on wyraźne maksimum preferujące przejawy zauważalne, znamienita większość odnotowanych przejawów to przejawy o znaczących konsekwencjach diagnostycznych (3, 4, 5, prawa strona zakresu). Wstępnie można próbować wiązać taki wygląd histogramu ze znacznym zaawansowaniem procesu spękaniowego, mając tu na myśli starszy segment pakietu, na którym leży nakładka.



Rysunek 5.15 Krzywe kalibracyjne przeliczania wyników pomiaru dystansu na odcinku C\_S różnymi metodami: pomiar kółkiem mierniczym w roku 2010 ( $D_{2010}$ ), pomiar kółkiem mierniczym w roku 2011 ( $D_{2011}$ ), pomiary dystansomierzem georadaru po wzajemnej synchronizacji ( $D_{GPR}$ ).



Rysunek 5.16 Histogram nasilenia georadarowych przejawów spękań poprzecznych na odcinku C\_S widocznych na powierzchni i przechodzących przynajmniej częściowo przez skanowaną strefę lewego pasa nawierzchni (ograniczona tablica korelacyjna).



Tabela 5.5 Tablica korelacyjna spękań - odcinek C\_S

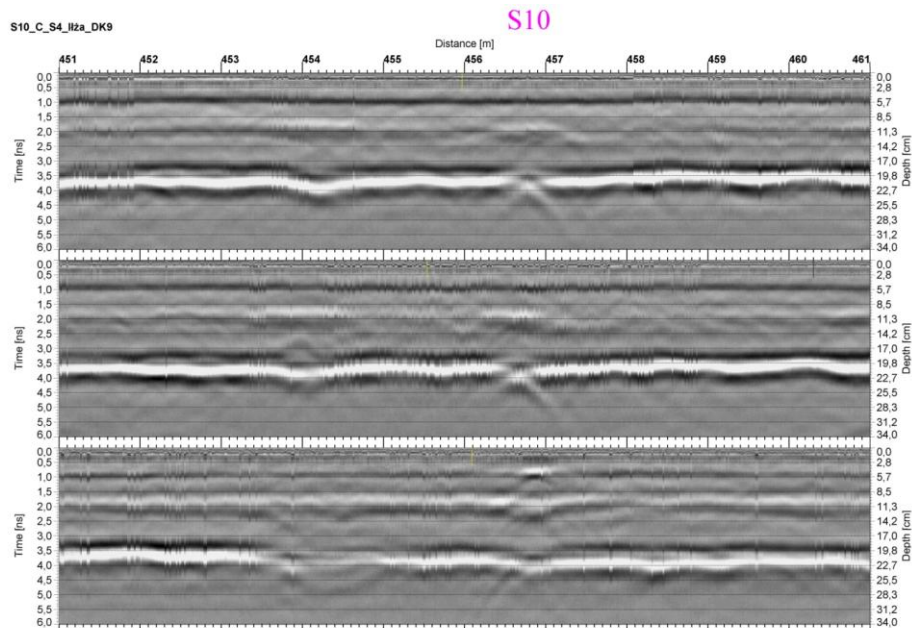
Symbol	Dystans K 2010	Dystans GPR	Dystans K 2011	Znamiona GPR 2010	Znamiona GPR 2011	Nasilenie	Stan wizualny 2011
S01	50.6	-	49.6	-	-	-	P
S02	57.8	58.7	56.8	CH	CH	4	L
S03	80.6	81.8	79.05	ch	ch/gp	2	C
S03a		108	104.4	-	-	-	LI
S04	127.6	128.8	124.4	CH	CH	4	C
N1		160.9		ch/chi	ch/chi	3	-
S05	161	162.3	157.2	CH	CH	5	C
S06	193.9	195.8	189.85	CH	CH	5	L,double
S07	214	215.3	209.3	ch/chi	CH	5	Lls
S07a		231?	224.5	-	-	-	P
S08	260.6	262.8	254.7	GP	GP/CH	5	Ls
S08a		328.5	319.65	-	gp	1	Ls
S08b		398?	388	-	-	-	Pls
S09	404.9	405.9	395.25	CH	ch	3	C
N1a		425		-	Gp	3	-
N2		432.4	421.5	CH	CH	5	P
S10	456.6	457.3	446.05	CH	CH	5	C
S11	463.9	464.4	453.05	CH/CHI	CH/GP	5	L
S12	485.7	486	474.15	CH'/chi	CH	5	C
N3		492.3	487.2	CH???	-	-	P
S13	516.8	517.2	504.4	gp	Ch/gp	4	C
S13a		526?	512.85	-	-	-	P
N4		533.3	520.65	CH/chi	gp	3	Ps
S14	536.6	537.1	523.9	gp	gp/chi	3	PLI
S15	558.5	558.7	545.05	gp/chi	ch/gp	3	L
N4a		574		-	ch/gp	3	-
S16	582.4	583	568.5	CH'	CH/gp	4	C,pocz.siatki
S17	596.4	596.2	582.25	-	ch	3	Lls
S18	613.2	613.5?	598.15	Z	Z/gp/ch	3	P
S19	613.7	614?		Z	Z	2	Lls
S20	614.2	614.5?	599.1	Z	Z/gp/ch	3	Lp
S21	623.1	622.5?	608.05	-	gp/ch	3	L
S22	630.5	630.3	615.3	ch'	gp/chi	2	C
S23	642.6	642.15?	627.15	-	-	-	P
S24	671.8	671.1	655.6	CH	ch	3	C
S25	724.5	724.5	708.1	ch	-	-	P
S25a		750?	733.45	ch/chi	ch/chi	1	P
S26	761.4	760.7?	744.25	-	-	-	C,P+Lls
S27	762.4	761.8	745.15	-	ch/gp/chi	2	L
S28	773.4	772.8	755.9	ch'	ch/gp/chi	2	C
S28a		778?	761.5	-	-	-	Ps
S29	783.9	783?	766.4	-	-	-	P
S30	788.3	787.5?	770.5	-	-	-	P
S31	803.1	802.3	785.05	ch'	ch	3	C
S32	831.1	830.2	812.55	gp	CH/GP	4	C
S33	844.8	843.7	826.1	-	ch	3	C
S34	864.1	862.6	845.5	-	gp/ch	3	C
S35	886	884.2	867.15	-	ch	2	C
N5		889.9		CH/chi	ch	3	-
S36	898.5	898.7	879.15	ch'	ch/gp/z	3	Ls
S37	905	903	885.2	-	ch	3	C
S38	915.1	913?	895.5	Z	ch	3	Ls
S39	916.5	915?	896.8	Z	-	-	P
S40	934.8	932.8	915.2	-	chi	1	C
S41	971.9	969.6	951.3	gp	CH/gp	4	C
S42	978.2	975.9	957.25	ch'/chi	ch'/gp	3	L
S42a		989.5	971.65	-	dg	1	Lsp
S43	1002.7	1000.3	981.35	CH	ch	3	C
S44	1012.5	1009?	990.9	-	-	-	P
S45	1019.5	1017.8	997.75	ch'/chi	-	-	P
S46	1071.1	1068.5	1049.5	CH	CH	4	C,zalany
S47	1093	1090.5?		-	-	-	-
S48	1096.8	1093.7	1075	CH	CH	5	C,zalany
S48a		1105?	1087.2	-	-	-	Ps
N6		1120.49		CH	ch	2	-
S49	1132.4	1129.1	1110.7	CH	CH	4	C, lataL
N7		1136.3		gp	-	-	-
N8		1145.5		gp	GP	5	-
S50	1158.6	1155.7	1137.25	CH	CH	4	L,zalany
S50a		1167	1149.4	-	gp	3	Ls
S51	1185.2	1182?	1163.85	-	chi	2	C,zalany
S52	1194.4	1191.1	1172.6	-	ch	3	C,zalany
S53	1211.3	1208.6	1189.45	-	gp/chi	1	C,zalany

Tabela 5.6 Ograniczona tablica korelacyjna spękań odcinka C\_S zawierająca wyłącznie spękania, które uwidoczniły się na powierzchni i przechodzą przynajmniej częściowo przez skanowaną strefę nawierzchni na lewym pasie ruchu (śląd prawego koła i środek pasa).

Symbol	Dystans K 2010	Dystans GPR	Dystans K 2011	Znamiona GPR 2010	Znamiona GPR 2011	Nasilenie	Stan wizualny 2011
S02	57.8	58.7	56.8	CH	CH	4	L
S03	80.6	81.8	79.05	ch	ch/gp	2	C
S04	127.6	128.8	124.4	CH	CH	4	C
S05	161	162.3	157.2	CH	CH	5	C
S06	193.9	195.8	189.85	CH	CH	5	L,double
S07	214	215.3	209.3	ch/chi	CH	5	Lls
S08	260.6	262.8	254.7	GP	GP/CH	5	Ls
S08a		328.5	319.65	-	gp	1	Ls
S09	404.9	405.9	395.25	CH	ch	3	C
S10	456.6	457.3	446.05	CH	CH	5	C
S11	463.9	464.4	453.05	CH/CHI	CH/GP	5	L
S12	485.7	486	474.15	CH'/chi	CH	5	C
S13	516.8	517.2	504.4	gp	Ch/gp	4	C
S14	536.6	537.1	523.9	gp	gp/chi	3	PLI
S15	558.5	558.7	545.05	gp/chi	ch/gp	3	L
S16	582.4	583	568.5	CH'	CH/gp	4	C,pocz.siatki
S17	596.4	596.2	582.25	-	ch	3	Lls
S18	613.2	613.5?	598.15	Z	Z/gp/ch	3	P
S19	613.7	614?		Z	Z	2	Lls
S20	614.2	614.5?	599.1	Z	Z/gp/ch	3	Lp
S21	623.1	622.5?	608.05	-	gp/ch	3	L
S22	630.5	630.3	615.3	ch'	gp/chi	2	C
S24	671.8	671.1	655.6	CH	ch	3	C
S25a		750?	733.45	ch/chi	ch/chi	1	P
S26	761.4	760.7?	744.25	-	-	-	C,P+Lls
S27	762.4	761.8	745.15	-	ch/gp/chi	2	L
S28	773.4	772.8	755.9	ch'	ch/gp/chi	2	C
S31	803.1	802.3	785.05	ch'	ch	3	C
S32	831.1	830.2	812.55	gp	CH/GP	4	C
S33	844.8	843.7	826.1	-	ch	3	C
S34	864.1	862.6	845.5	-	gp/ch	3	C
S35	886	884.2	867.15	-	ch	2	C
S36	898.5	898.7	879.15	ch'	ch/gp/z	3	Ls
S37	905	903	885.2	-	ch	3	C
S38	915.1	913?	895.5	Z	ch	3	Ls
S40	934.8	932.8	915.2	-	chi	1	C
S41	971.9	969.6	951.3	gp	CH/gp	4	C
S42	978.2	975.9	957.25	ch'/chi	ch'/gp	3	L
S42a		989.5	971.65	-	dg	1	Lsp
S43	1002.7	1000.3	981.35	CH	ch	3	C
S46	1071.1	1068.5	1049.5	CH	CH	4	C,zalany
S48	1096.8	1093.7	1075	CH	CH	5	C,zalany
S49	1132.4	1129.1	1110.7	CH	CH	4	C, lataL
S50	1158.6	1155.7	1137.25	CH	CH	4	L,zalany
S50a		1167	1149.4	-	gp	3	Ls
S51	1185.2	1182?	1163.85	-	chi	2	C,zalany
S52	1194.4	1191.1	1172.6	-	ch	3	C,zalany
S53	1211.3	1208.6	1189.45	-	gp/chi	1	C,zalany

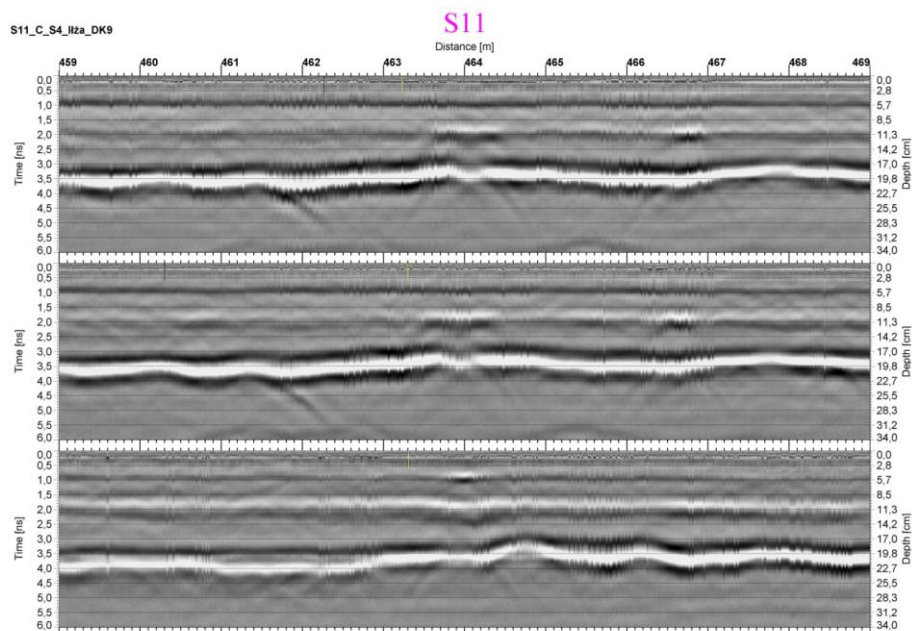
Na odcinku C\_S wykonano cztery wiercenia, których celem było rozpoznanie zjawisk zniszczeniowych odpowiedzialnych za najsilniejsze georadarowe manifestacje spękań. Przepuszczenie, że nie są to struktury małe zostało rozległe potwierdzone tymi próbami.

Wiercenie W1\_C\_S ujawnia rozgałęzioną szczelinę spękania, która wykonuje znaczne przeskoki poziome na hotyzontach międzywarstwowych, zaś poniżej dolnej granicy ostatniej nakładki, szczelina ta jest bardzo rozwarta osiągając szerokość kilku centymetrów i jest tam wypełniona materiałem zawierającym bardzo dużo frakcji ilastej (wysoka podatność elektryczna!). Poniżej głównego pakietu podbudowa miała typ słabo związany.



Rysunek 5.17 Echogram w pobliżu wiercenia W1\_C\_S i wygląd bocznej powierzchni rdzenia z powiększeniem poszerzonej i wypełnionej materiałem ilastym szczeliny w dolnych warstwach asfaltowych.

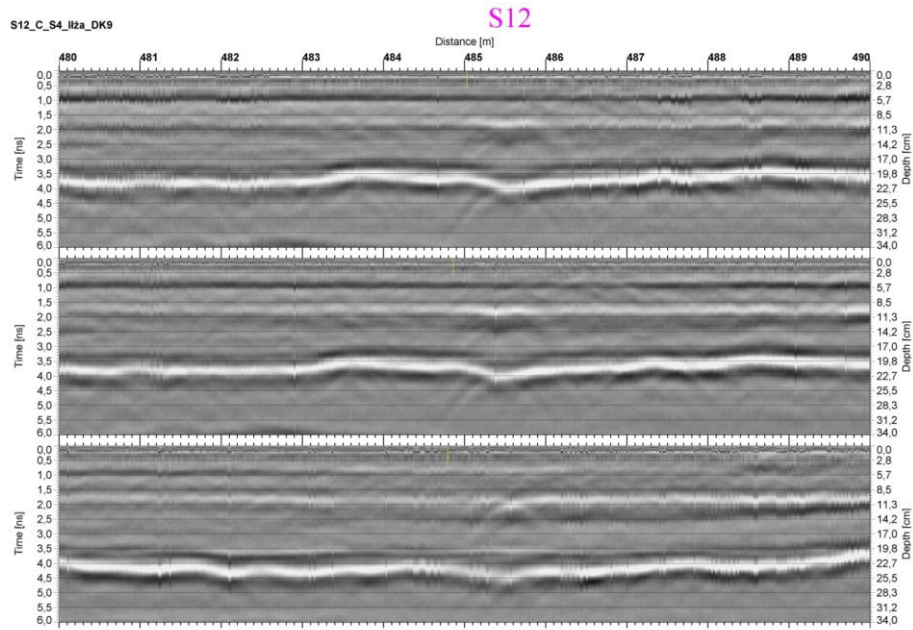
Wiercenie W2\_C\_S ukazuje rozległą i podobnie rozgałęzioną sieć spękania oraz poważne odspojenie pod nakładką. Powierzchnie spękań są silnie zniszczone przez co nie można ich uważać za rozstępy cienkowarstwowe, ale są to warstwy porowate i nasiąkliwe o znacznej grubości. Podbudowa pod pakietem głównym uległa całkowitej degradacji w trakcie wiercenia, a poniżej tej dziesięciocentymetrowej warstwy znajdował się fragment cienkiej warstewki jeszcze starszej MMA. Trudno jest orzec czy osłabienie podbudowy jest wynikiem erozji w pobliżu spękania, można jednak przypuszczać, że ów podatny stan sprzyja mechanicznej pracy szczeliny.



Rysunek 5.18 Echogram w pobliżu wiercenia W2\_C\_S i wygląd zrekonstruowanego z fragmentów rdzenia oraz fotografia wnętrza otworu.

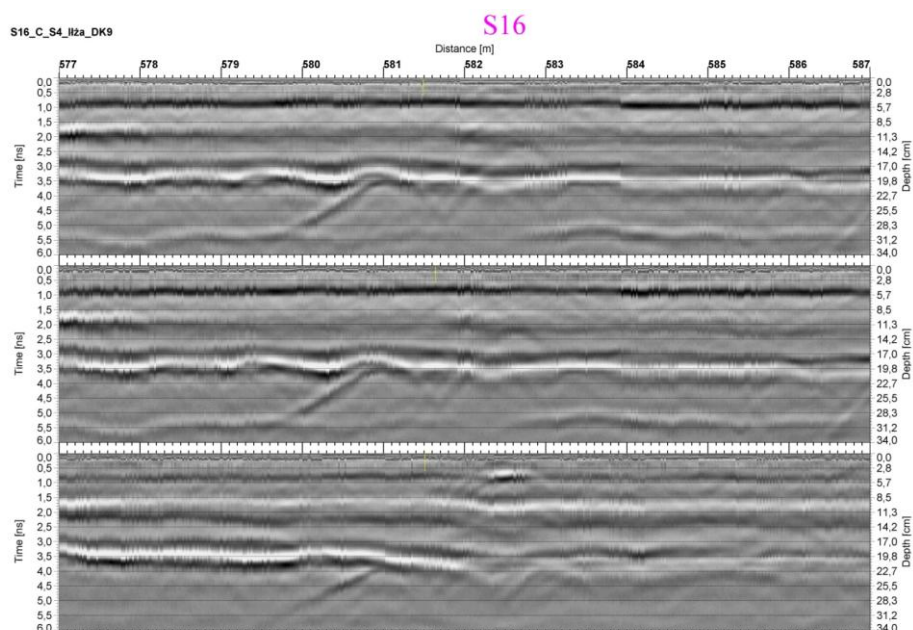
Wiercenie W3\_C\_S było jedynym, w którym uzyskano fragment litej podbudowy, ale ten odspojony od pakietu fragment był rozszczepiony na dwie części. Szczelina między nimi ma zatem powiązanie ze spękaniem w pakiecie asfaltowym, sygnalizując brak sztywności podbudowy. Okazało się, że spęknięcie rozwiera się istotnie poniżej osłabionego połączenia nakładki z niższym pakietem i jest tam wypełnione materiałem ilastym. Podobnie jak w odwiercie pierwszym, to ilaste wypełnienie może pochodzić z czasów, kiedy niższy pakiet asfaltowy funkcjonował jako warstwa ścieralna ulegająca pękaniu.





Rysunek 5.19 Echogramy wykonane w pobliżu wiercenia W3\_C\_S i wygląd poskładanego z fragmentów rdzenia (warstwy asfaltowe i fragment podbudowy), powiększenie powierzchni szerokiej szczeliny głównej pęknięcia w dolnych warstwach asfaltowych (pod małym fragmentem rdzenia) wypełnionej materiałem ilastym oraz fotografia wnętrza otworu.

Wiercenie W4\_C\_S dostarczyło rdzenie silnie zdegradowanego rdzenia z rozległą i rozgałęzioną siecią spękań, którego rekonstrukcja z fragmentów była podobnie trudnym zadaniem jak w przypadku odwiertu drugiego. Podobnie jak i w tamtym wierceniu podbudowa uległa całkowitej degradacji w czasie pozyskiwania rdzenia.



Rysunek 5.20 Echogramy wykonane w pobliżu wiercenia W4\_C\_S i wygląd zrekonstruowanego z fragmentów rdzenia oraz fotografia wnętrza otworu.

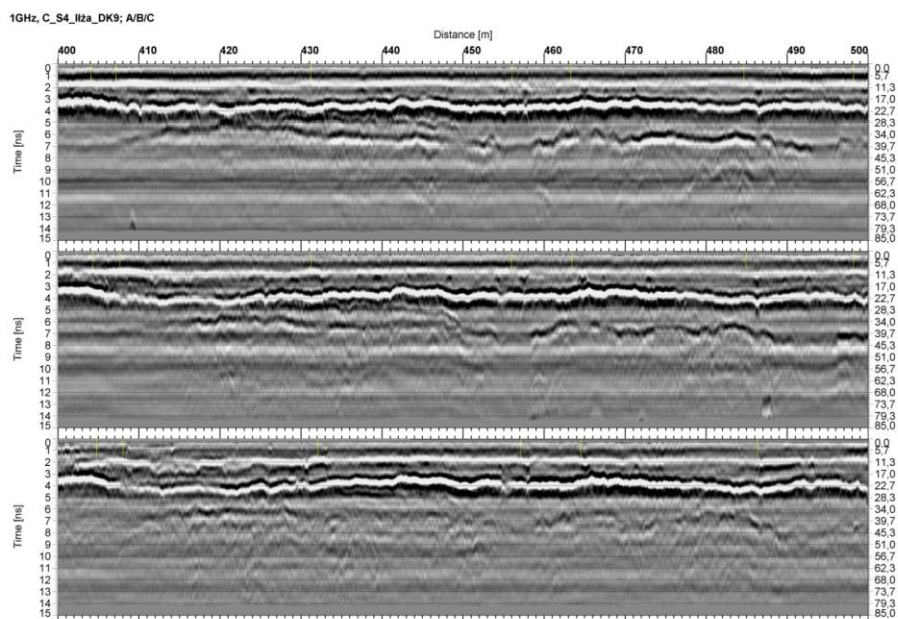
Oglądając galerię wszystkich czterech rdzeni (Rysunek 5.21) można ocenić jak wysoki jest stopień degradacji materiałowej i jaka potencjalnie objętość ośrodka może w związku z tym ulec zawilgoceniu lub wypełnieniu materiałem ilastym. Geometria szczelin wyjaśnia dlaczego silne rozproszenia GPR pojawiają się dopiero na poziomie granicy pomiędzy nakładką, a starszymi warstwami. Ponadto wiercenia te dokumentują osłabiony stan podbudowy w pobliżu opróbowanych spękań, który potencjalnie może być skutkiem erozji wywołanej w ośrodku przed szczeliną.



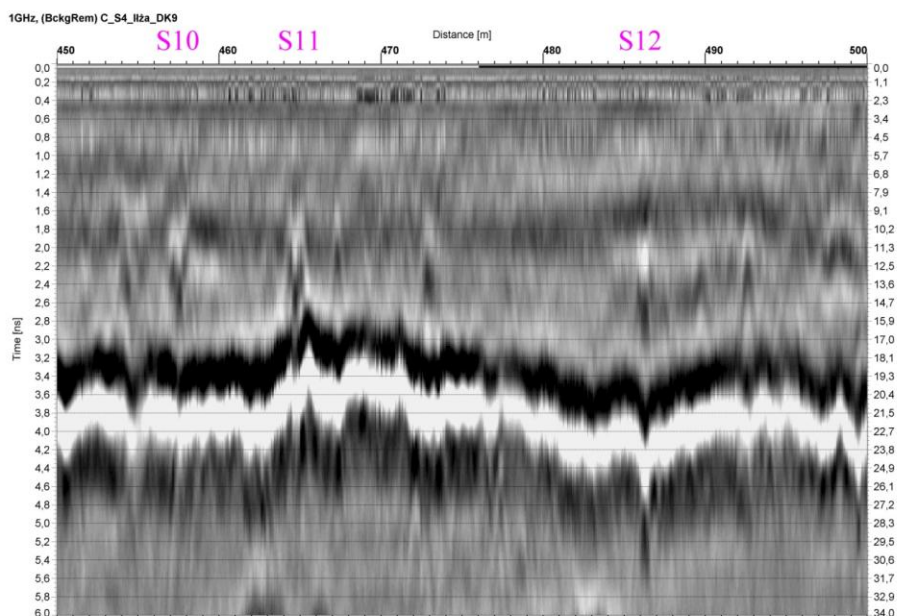


Rysunek 5.21 Zestawienie czterech rdzeni ustawionych na swoich powierzchniach górnych.

Na odcinku C\_S przeprowadzono także skanowanie w trzech równoległych profilach z użyciem anteny o częstotliwości centralnej 1 GHz, w celu zbadania przypuszczenia o słabo-rozdzielczym, ale bardziej efektywnym amplitudowo odzwierciedlaniu dużych struktur (Rysunki 5.22 i 5.23). Refleksy odpowiadające skomplikowanym strukturom spękaniaowym jakie możemy studiować z pomocą odwiertów, są tutaj zamaskowane przez emisją horyzontu granicznego, która może być zredukowana za pomocą filtrowania poziomego (np. background removal).



Rysunek 5.22 Trzy echogramy (antena 1 GHz) z odcinka C\_S w pobliżu odwiertów W1\_C\_S, W2\_C\_S, W3\_C\_S pokazujący lokalne, wzmożone emisje z poziomu granicy pomiędzy nakładką, a dawniejszymi warstwami asfaltowymi (około 10 cm głębokości) odpowiadające rozległym strefom zniszczeniowym spękań S10, S11 i S12.



Rysunek 5.23 Powiększony fragment środkowego echogramu (profil B; antena 1 GHz) po odwiltorowaniu sygnału płaskiej struktury warstwowej górnego pakietu asfaltowego, z wyraźnie widocznymi, lokalnymi zaburzeniami na głębokości około 12 cm odpowiadającymi spękanom S10, S11, S12 (odpowiednio odwierty W1\_C\_S, W2\_C\_S, W3\_C\_S).

#### 5.4 Odcinek D\_S

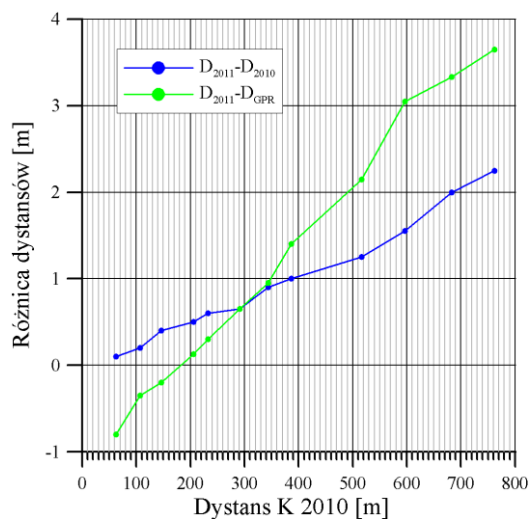
Pośród 12 spękań odnotowanych na powierzchni tego odcinka, jedynie w dwóch przypadkach można było się dopatrzeć wyraźnych grup pionowych. Ze względu na poważne trudności korelacyjne, w nowej sesji pomiarowej wykonano dodatkowy pomiar referencyjny z użyciem metalizowanych znaczników pozycji spękań wzdłuż śladu prawego koła. Pomiar ten został zsynchronizowany z podstawowym pomiarem na profilu B za pomocą szczególnych elementów kształtu horyzontów międzywarstwowych. Metoda ta pozwala na dokładne określenie pozycji spękań na echogramach i rozstrzygnięcie, które przejawy georadarowe odpowiadają spękanom.

Histogram nasilenia (Rysunek 5.25) powinien być interpretowany z ostrożnością, gdyż w znacznym stopniu odzwierciedla on nastawienie interpretatora. W przypadku odcinka D\_S ma on tendencję do płaskiego kształtu zapewne dlatego, że na skutek przypisania dużego znaczenia strefom zaburzeń Z pewnej części przypadków zostały przypisane wysokie nasilenia, gdyż przejawy GPR zostały uznane za ewidentne chociaż nie mają one tak dobrej lokalizacji jak znamiona podstawowe (Ch, Gp).

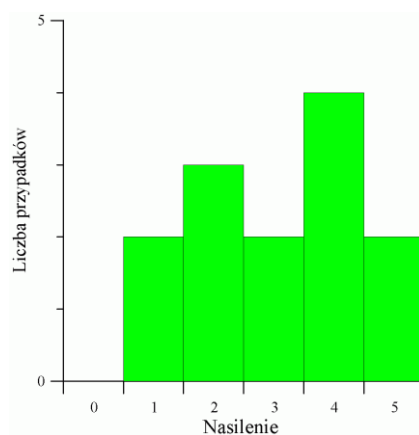


Tabela 5.7 Ograniczona tablica korelacyjna spękań odcinka D\_S zawierająca wyłącznie spękania, które uwidoczniły się na powierzchni i przechodzą przynajmniej częściowo przez skanowaną strefę nawierzchni na lewym pasie ruchu (śląd prawego koła i środek pasa).

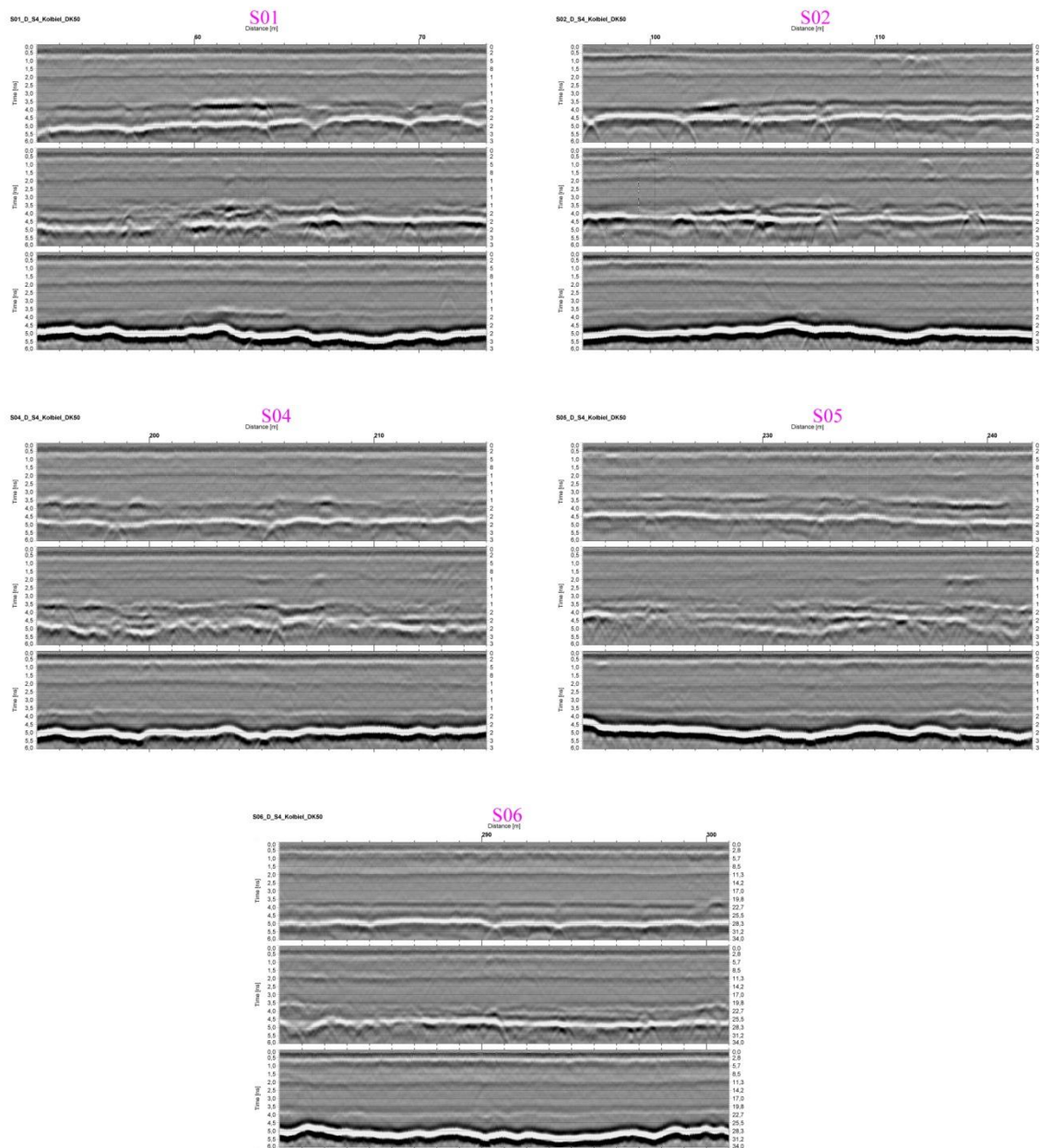
Symbol	Dystans K 2010	Dystans GPR	Dystans K 2011	Znamiona GPR 2010	Znamiona GPR 2011	Nasilenie	Stan wizualny 2011
S01	62.3	63.2	62.4	-	chi	2	C
S02	107.2	107.75	107.4	-	chi	2	C
S03	145.6	146.2	146	GP/ch	Z/ch/chi	4	C
S04	205.4	205.77	205.9	gp?	Z/chi/gp	3	C
S05	232.5	232.8	233.1	gp/chi?	chi/ch	2	L
S06	290.8	290.8	291.45	-	chi/ch	1	C
S07	343.8	343.75	344.7	gp	Z/CH/chi	3	C
S08	386.7	386.3	387.7	gp/ch	Z/ch/gp	4	C
S09	516.4	515.5	517.65	gp/chi?	Z!/ch/chi	4	C
S10	596.3	594.8?	597.85	GP/CH/Z	Z!	5	C
S11	682.7	681.37?	684.7	GP/chi	Z!/chi	4	C
S12	762.3	760.9?	764.55	z'/gp?	Z!/chi	5	
S03a	-	182.8	182.95	-	Z'	1	Ini



Rysunek 5.24 Krzywe kalibracyjne przeliczenia wyników pomiaru dystansu na odcinku D\_S różnymi metodami: pomiar kółkiem mierniczym w roku 2010 ( $D_{2010}$ ), pomiar kółkiem mierniczym w roku 2011 ( $D_{2011}$ ), pomiary dystansomierzem georadaru po wzajemnej synchronizacji ( $D_{GPR}$ ).

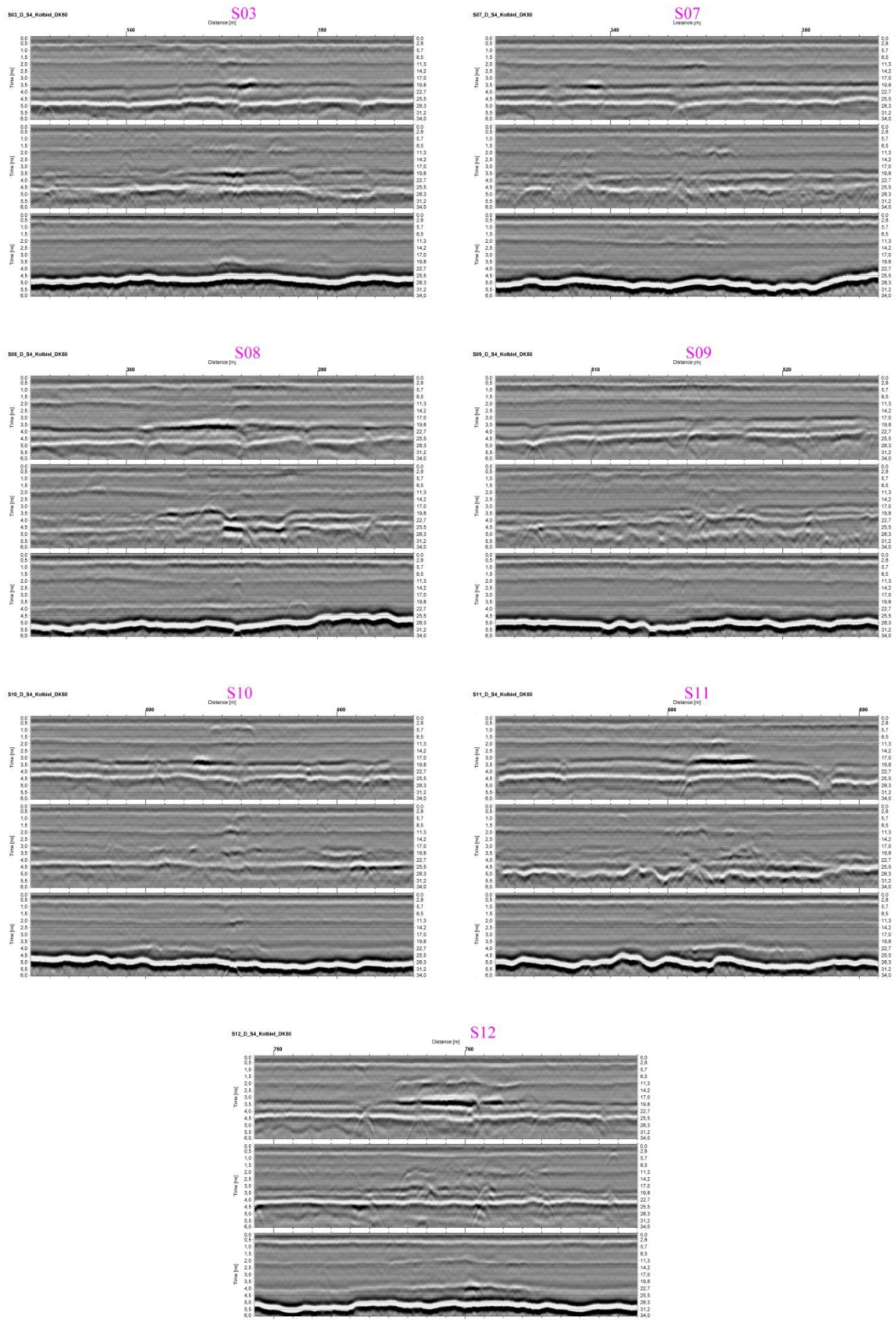


Rysunek 5.25 Histogram nasilenia georadarowych przejawów widocznych spękań poprzecznych na odcinku D\_S.

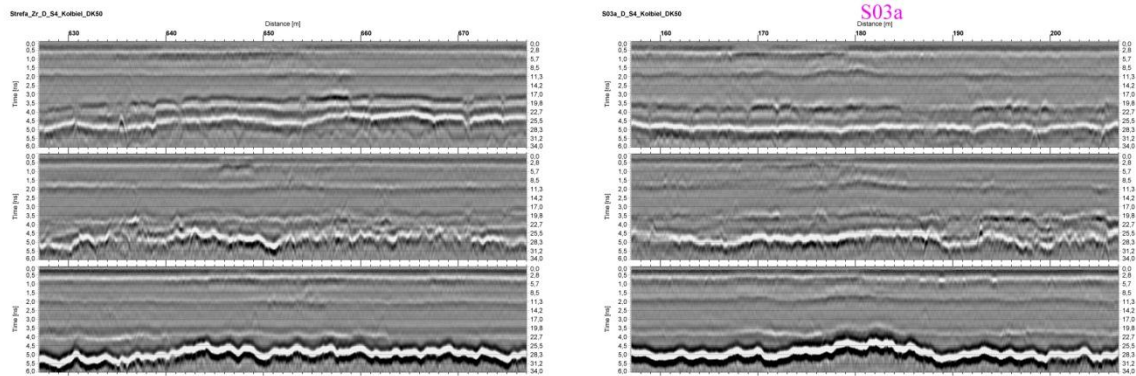


Rysunek 5.26 Przykłady słabych objawów spękań w obrazie georadarowym na odcinku D\_S.

Dokładna analiza przypadku D\_S po zastosowaniu metody równoległych skanów doprowadziła do spostrzeżenia, że czasem pomimo braku wyraźnych przejawów spękania pozwalających na dokładną jego lokalizację, otoczenie wykazuje liczne zaburzenia potencjalnie znamionujące spękania, ale rozproszone i nie określające jednej pozycji. Zaburzenia te to przede wszystkim hiperbole lub ich prawdopodobne fragmenty wierzchołkowe, ale także lokalne nasilenia refleksów horyzontów międzywarstwowych sugerujące odspojenia. Takie zaburzone strefy (**Z**) mogą być skupione do odcinków kilkumetrowej długości (**Zs**) lub też bardziej rozproszone, kilkunastometrowe (**Zr**), ale nadal odróżniające się od swego dalszego otoczenia. Warunkiem widoczności tego typu zjawisk jest brak kratki maskującej takiej jaka występuje np. na odcinku B\_S.



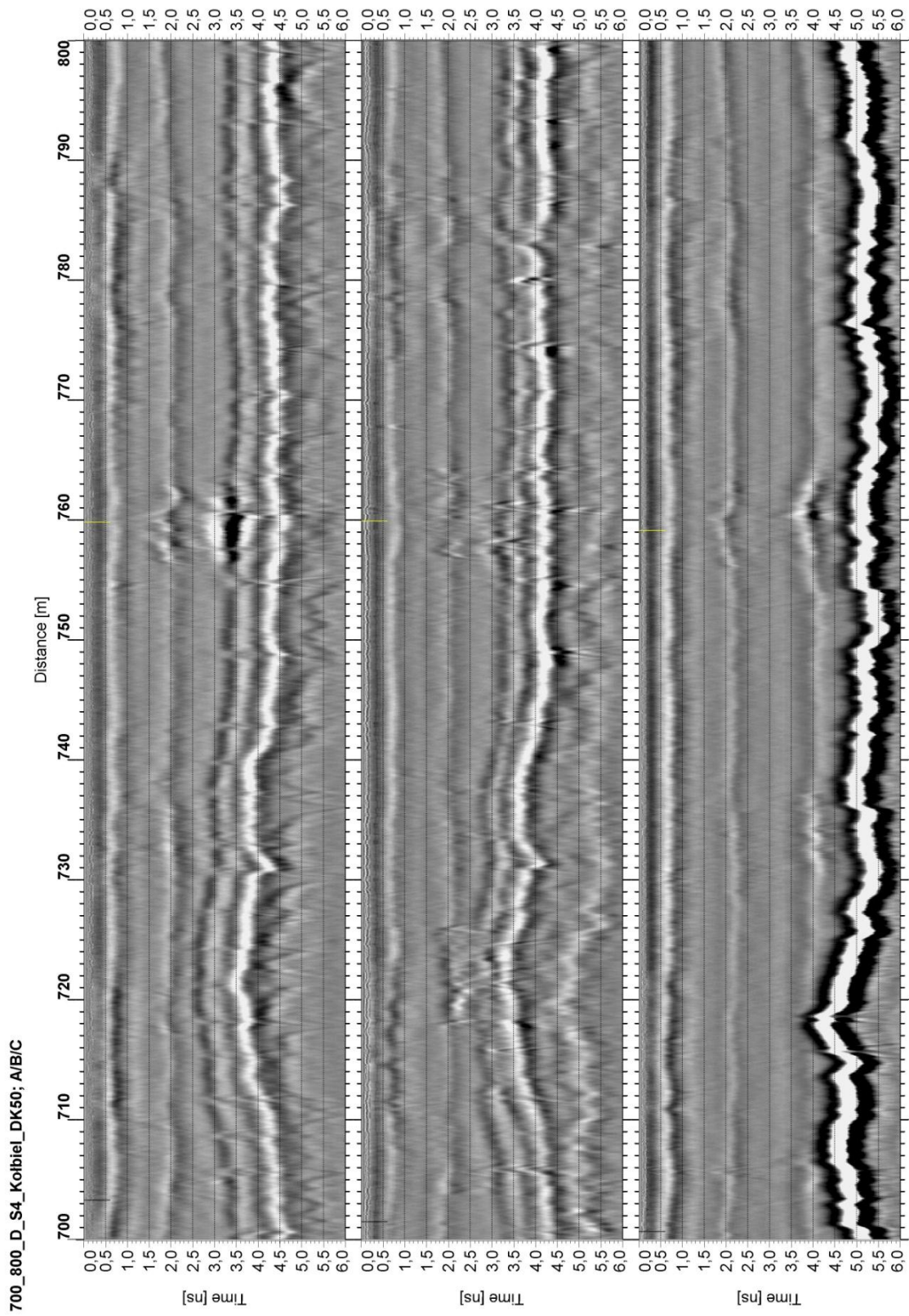
Rysunek 5.27 Przykłady skupionych stref zaburzonych Zs na odcinku D\_S.



Rysunek 5.28 Przykłady rozproszonych stref zaburzonych Zr na odcinku D\_S.

Opisywany efekt stref zaburzonych może mieć potencjalnie odzwierciedlenie pewnych własności procesu osłabiania nawierzchni wybudowanej na długim odcinku w zwartej formie. Nietrudno sobie wyobrazić, że konstrukcja taka już choćby pod wpływem pierwotnego skurczu termicznego ulega osłabieniu, w taki sposób, że inicjalne defekty powstają licznie w wybranych strefach, z których któryś uzyska przewagę w tej ewolucji biorąc na siebie rozładowanie okolicznych naprężeń.





Rysunek 5.29 Wygląd stref zaburzonych (dystanse około 720, 760, 785 m) na dłuższym fragmencie echogramu.

## 6 Analiza parametrów wejściowych w istniejących modelach degradacji nawierzchni pod kątem spękań i ich porównanie z uzyskanymi wynikami badań.

W niniejszej części sprawozdania przedstawiono pokrótce zagadnienia dotyczące parametrów wejściowych w modelach degradacji opisujących mechanizm powstawania pęknięć nawierzchni. Krótkie podsumowanie i wnioski z analizy parametrów wejściowych dotyczą metody projektowania MEPDG<sup>3</sup>, nad którą trwają prace wdrożeniowe<sup>4</sup> oraz systemu zarządzania HDM-4<sup>5</sup>.

Metoda MPEDG umożliwia prognozowanie spękań siatkowych i podłużnych. Zakłada się w niej, że spękania inicjowane są w spodzie warstw asfaltowych i propagują pod ciężkim ruchem, aż do warstwy ścieralnej. Wyjątek stanowią pęknięcia podłużne, dla których przyjęto miejsce powstawania i ich propagacji od powierzchni w dół. Dopuszczalna liczba zadanych obciążeń osi potrzebnych do określenia przyrostu wskaźnika uszkodzenia do przewidywania obydwu rodzajów pęknięć podana jest równanie:

$$N_{f-HMA} = k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1}(\epsilon_1)^{k_{f2}\beta_{f2}}(E_{HMA})^{k_{f3}\beta_{f3}}$$

w którym:

$N_{f-HMA}$  – dopuszczalna liczba zadanych obciążeń osi dla nawierzchni podatnych i nakładek z mma,

$\epsilon_t$  – odkształcenie rozciągające w krytycznych lokalizacjach obliczone wg modelu reakcji konstrukcji, cal/cal,

$E_{HMA}$  – moduł dynamiczny mma mierzony w ściskaniu, psi

$k_{f1}$ ,  $k_{f2}$ ,  $k_{f3}$  – parametry globalnej kalibracji terenowej ( $k_{f1} = 0,007566$ ;  $k_{f2} = -3,9492$ ,  $k_{f3} = -1,281$ )

$\beta_{1r}$ ,  $\beta_{2r}$ ,  $\beta_{3r}$  = stałe lokalne lub kalibracji terenowej mieszanki; w przypadku kalibracji globalnej stałe te są przyjmowane równe 1,

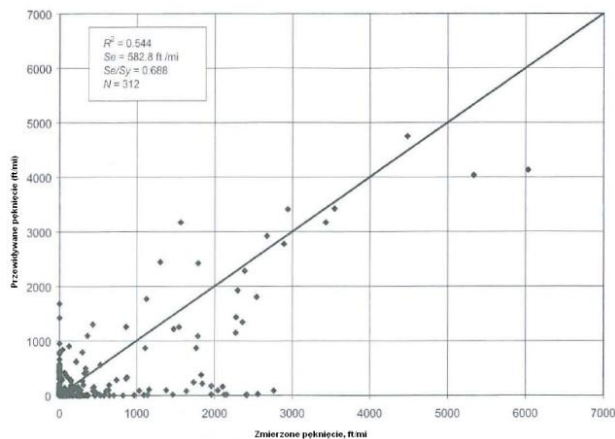
$C_H$  – współczynnik korygujący grubość w zależności od rodzaju pęknięcia.

Powierzchnie pęknięć siatkowych i długość pęknięć podłużnych obliczane są na podstawie całkowitej szkody w czasie, przy zastosowaniu różnych funkcji przeniesienia. Zamieszczony poniżej rysunek przedstawia porównanie pomiędzy zmierzonymi a przewidywanymi długościami pęknięć podłużnych (pęknięcie z góry do dołu) i statystyki wynikające z procesu globalnej kalibracji.

<sup>3</sup> MEPDG - Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide

<sup>4</sup> praca niepublikowana, realizowana w IBDiM na zlecenie GDDKiA

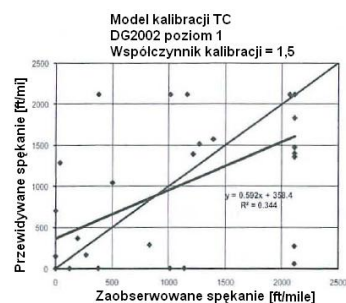
<sup>5</sup> HDM-4 - Highway Development and Management



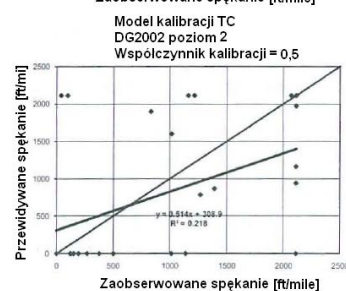
Rysunek 6.1 Porównanie mierzonych i przewidywanych długości pęknięć podłużnych (pęknięcia z góry do dołu) wynikające z procesu globalnej kalibracji.

W metodzie MEPDG można również prognozować pęknięcia odbite w nakładkach warstw asfaltowych lub warstwach ściernalnych z mma w nawierzchniach półsztywnych. Równanie empiryczne opisujące to zjawisko jest stosowane do oszacowania ilości zmęczeniowych i termicznych pęknięć pochodzących od warstw niżej położonych, które odwzorowały się w warstwie ściernalnej po pewnym czasie. Opracowana zależność stosowana jest również do oszacowania zmęczeniowych i termicznych pęknięć odbitych od warstwy stabilizacji lub istniejącej nawierzchni podatnej, oraz od połączeń i pęknięć w warstwach sztywnych.

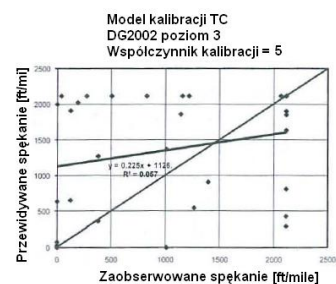
Poziom wejściowy 1 przy globalnym współczynniku kalibracji 1,5



Poziom wejściowy 2 przy globalnym współczynniku kalibracji 0,5



Poziom wejściowy 3 przy globalnym współczynniku kalibracji 5



Rysunek 6.2 Porównanie zmierzonych i przewidywanych pęknięć poprzecznych z procesu globalnej kalibracji

Istotną dla jakości prognoz szacowanych na podstawie zaimplementowanych modeli degradacji jest właściwa, precyzyjna w miarę możliwości ich kalibracja. Jak podkreśla się w MEPDG jedna z przyczyn względnie dużych błędów dla prognoz pęknięć (Rysunek 6.2) wynika z faktu, że na żadnym z testowanych odcinków uwzględnionych w procesie kalibracji metody nie dokonano odwiertów, ani cięć w celu stwierdzenia, czy pęknięcie rozpoczyna się w spodzie czy od góry warstw asfaltowych.

W systemie HDM-4 regulacja współczynników kalibracyjnych odbywa się na poziomie podstawowym, najmniej dokładnym, za to jak przedstawiono to w Raporcie<sup>6</sup>, wystarczającym dla najogólniejszych analiz.

Drugi, dokładniejszy poziom to regulacja na poziomie kalibracji. Ze względu na moment pojawienia się pęknięć wyróżnia się etap inicjacji pęknięć i ich rozwój. W odniesieniu do natężenia szkody rozróżnia się dodatkowo inicjację i rozwój pęknięć szerokich. Do stworzenia modelu i kalibracji przyjęto każdy odcinek, dla którego można było zaobserwować moment (z dokładnością do roku) w którym powierzchnia pokryta pęknięciami przekroczyła 0.5% powierzchni nawierzchni. W odniesieniu do pęknięć szerokich

Zgodnie z przedstawionymi w powołanym opracowaniu rozważaniami w modelu HDM współczynnik kalibracji inicjacji pęknięć i jego błąd (odchylenie standardowe) RMSE wyznacza się następująco:

$$K_{ci} = \frac{E(OTCI)}{E(PTCI)} \quad RMSE = \sqrt{E((OTCI - PTCI)^2)}$$

w których:

$E(OTCI)$  oznacza wartość średnią z obserwowanego czasu do inicjacji pęknięć,

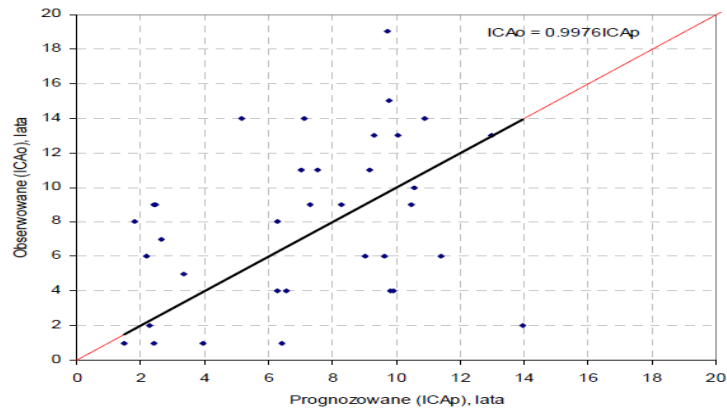
$E(PTCI)$  oznacza wartość średnią z czasu prognozowanego według modeli HDM

Alternatywnie współczynnik kalibrujący można dobrać tak, by współczynnik regresji liniowej między prognozowanymi i obserwowanymi wartościami czasu do pojawienia się pęknięć był równy 1. Na Rysunku 6.3 podano przykład dla takiego dopasowania dla nawierzchni pólstywnych z grubymi warstwami bitumicznymi (warstwy asfaltowe o grubości > 10 cm).

---

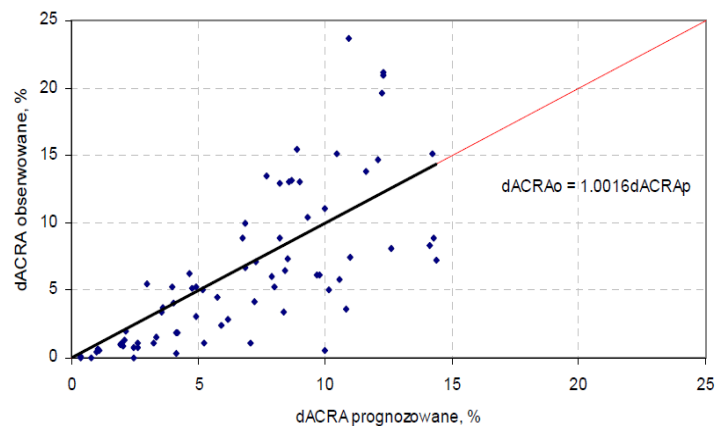
<sup>6</sup> A. Janowski, Weryfikacja modeli degradacji, Raport dla GDDKiA, listopad 2005





Rysunek 6.3 Regresja liniowa dla prognozowanego i obserwowanego czasu do powstania pęknięć na nawierzchniach

W odniesieniu do rozwoju pęknięć w kalibracji modeli HDM stosuje się metodę polegającą na doborze współczynnika kalibrującego tak, by współczynnik regresji liniowej między prognozowanymi i obserwowanymi wartościami rocznego przyrostu powierzchni pęknięć był równy 1 (Rysunek 6.4).



Rysunek 6.4 Regresja liniowa między prognozowanymi i obserwowanymi rocznymi przyrostami powierzchni wszystkich pęknięć dla współczynnika kalibracji 0.86

W wspomnianym Raporcie określa się też przydatność danych pomiarowych pomocnych w określeniu współczynnika kalibracyjnego. Dla podstawowych typów nawierzchni są to:

- wiek nawierzchni od ostatniej nakładki, przebudowy lub budowy, AGE2,
- powierzchnia objęta wszystkimi pęknięciami (w %),
- powierzchnia objęta pęknięciami szerokimi (> 3 mm) lub z wykruszeniami (w %),
- wskaźnik strukturalny (lub ugięcia), grubości warstw konstrukcyjnych nawierzchni,
- roczne obciążenie ruchem.

Obie metody przedstawiono tu jako przykłady systemów operujących na określonych rozwiązaniach matematycznych, opisujących rozwój poszczególnych uszkodzeń. Modele

te korygowane są poprzez współczynniki kalibracyjne, nieraz w sposób bardzo ogólny, niemniej wystarczający dla celów ogólnych analiz.

Szczegółowa kalibracja modeli degradacji nie jest już tak prosta i jak się wydaje nie dość dokładna. Wprowadzone korekty bazują na obserwacjach terenowych uszkodzeń, (pęknięć) pojawiających się na powierzchni nawierzchni. Jak podaje podręcznik MEPDG istotną dla jakości prognoz szacowanych na podstawie zaimplementowanych modeli degradacji jest właściwa, precyzyjna ich kalibracja. Jednocześnie podkreśla się że jedną z przyczyn dużych błędów dla prognoz pęknięć wynika z faktu, że na żadnym z testowanych odcinków uwzględnionych w procesie kalibracji metody nie dokonano badań potwierdzających, czy pęknięcie rozpoczyna się w spodzie czy od góry warstw asfaltowych.

## 7 Podsumowanie

Przeprowadzone badania i analizy potwierdziły skuteczność metody radarowej w ocenie pęknięć nawierzchni. W ocenie autorów przydatność tego typu badań zostanie potwierdzona w badaniach istniejących nawierzchni przewidywanych do remontu. Szczególną zaletą jest tu możliwość identyfikacji ilościowej pęknięć, co w kontekście doboru odpowiedniej technologii remontu jest niejednokrotnie kluczowym elementem.

Uzyskane w trakcie pomiarów radarowych wyniki świadczą w opinii autorów niniejszego sprawozdania o ich dużej przydatności w opracowaniu współczynników kalibracyjnych dla modeli inicjacji i rozwoju pęknięć nawierzchni (np. w metodzie MEPDG). Szczególną zaletą badania radarowego w tym aspekcie jest możliwość obserwacji pojawiających się i postępujących od dołu pęknięć poprzecznych nawierzchni. Jak dowiedziono w niniejszej pracy obserwacje takie, choć trudne w analizie, są jednak możliwe, a utrzymanie odpowiedniej procedury pomiarowej i dostatecznie długi czas obserwacji odcinków mógłby znacznie zwiększyć jakość i dokładność opracowywanych współczynników kalibracyjnych.

Uzyskane w ostatniej serii badań georadarowych dane potwierdziły poprawność przyjętej procedury pomiarowej. Procedura ta polega na wykonaniu pojedynczego skanowania całego odcinka, a następnie wykonaniu serii skanów o podwyższonej gęstości.

**Skanowanie pojedyncze** traktowane jest jako rozpoznawcze, z jednej strony do prawidłowego udokumentowania hiperbol rozproszeniowych, a z drugiej strony w celu redukcji szumów niekoherentnych, które poważnie utrudniają identyfikację hiperbol mających zwykle bardzo małą amplitudę sygnału. Celem takiego wstępnego rozpoznania jest obserwacja sygnałów spękań objawiających się w formie hiperbol oraz ich ewentualnej korelacji z pozycjami spękań widocznych na powierzchni. Kluczowe w tym wypadku są miejsca, gdzie nie występują pęknięcia powierzchniowe, natomiast pojawiają się georadarowe sygnały wskazujące na pęknięcia ukryte, które nie pojawiły się jeszcze na powierzchni.

**Skanowanie o podwyższonej gęstości**, z użyciem skrajnie wysokiej gęstości 500 skanów na metr, w co najmniej trzech równoległych, biegnących blisko siebie profilach (w odległości około 50 cm jeden od sąsiedniego) daje zdecydowanie pełniejszy obraz struktury. Zestawienie takich echogramów jest szalenie istotna ze względu na jakość interpretacji i pozwala na potwierdzanie lokalizacyjne znamion diagnostycznych występujących na sąsiednich profilach. Takie potwierdzenie poprzecznej rozciągłości bardzo lokalnej struktury jest bardzo dużą pomocą w uzasadnieniu przypuszczenia o pęknięciu, szczególnie w przypadkach o słabej manifestacji.

**Systematyczny monitoring nawierzchni** w relatywnie długim okresie czasu (2-3 lat) poprzez obserwację zmian obrazu georadarowego z równoczesną identyfikacją pęknięć powierzchniowych, prowadzoną przy zastosowaniu technik wizyjnych może dostarczać istotnych informacji o przebiegu procesu spękania. Wnioski płynące z korelacji obu tych obserwacji poparte dokumentacją budowy nawierzchni oraz ewentualnie odkrywkami i wierceniami mają konsekwencje daleko przekraczające ustalenia jakie może dać pojedynczy, wyrwany z kontekstu pomiar. Szczególne znaczenie może tutaj mieć georadarowe udokumentowanie pierwotnego stanu drogi oraz wczesnej fazy jej użytkowania.

Kluczowym osiągnięciem badań jest uzyskanie **typologii georadarowych przejawów obecności spękania poprzecznego**. Określenie „poprzeczne” oznacza w odniesieniu do pomiaru GPR, że spękanie jest poprzeczne do kierunku profilu skanowania, a antena powinna mieć polaryzację pola elektrycznego również poprzeczną do kierunku profilu. Ustawienie takie ma najwyższą skuteczność przy identyfikacji spękań. Przejawami spękań są wtedy przede wszystkim hiperbole rozproszeniowe  $H$ , które mogą odpowiadać liniowym obiektom osobliwym, czy liniowym krawężnikom szczelin, ale także skupionym (punktowym) obiektom rozpraszającym. Odróżnienie obiektu punktowego od obiektu liniowego nie jest możliwe przy skanowaniu wzdłuż pojedynczego profilu. Problem ten praktycznie rozwiązuje zastosowanie skanowania wzdłuż kilku równoległych profili, które poprzez korelację sąsiednich echogramów najczęściej rozstrzyga o poprzecznej kontynuacji obiektu rozpraszającego.

Sformułowane kryteria identyfikacji spękań w połączeniu z metodą skanów wzdłuż równoległych profili wydają się mieć znaczącą skuteczność także w badaniu spękań, które jeszcze nie pojawiły się na powierzchni. W przypadku użycia trzech równoległych profili uzyskuje się znaczącą korelację widocznych spękań z ich przejawami GPR. W jednym z przypadków okazało się natomiast, że nadzwyczaj intensywnie pojawiające się spękania wybitnie korelują z miejscami stwierdzonych wcześniej defektów połączeń międzywarstwowych.

Duże znaczenie diagnostyczne ma występowanie na echogramie „pionowych grup defektów”. Znamionami tych defektów są przede wszystkim hiperbole rozproszeniowe, a w dalszej kolejności lokalne, dobrze zlokalizowane w poziomie odspojenia oraz szczególne, lokalne osobliwości kształtu powierzchni międzywarstwowych. Przez grupę pionową należy rozumieć układ przynajmniej dwóch lub więcej niż dwóch znamion

lokalnego defektu występujących jeden nad drugim w nieznacznej odległości poziomej od siebie, nie większej niż połowa grubości nawierzchni.

Znakomite rezultaty dają anteny wysokoczęstościowe, a przede wszystkim antena o częstotliwości centralnej 2.2 GHz. Za pomocą tej wysokorozdzielczej anteny wykonano niemal wszystkie pomiary opisywanego przedsięwzięcia badawczego. W przypadku rozległych zniszczeń ośrodka paradoksalnie sprawdza się także mniej precyzyjna antena 1 GHz, dostarczając uzupełniających sugestii, co obecności takich defektów, które, o ile mają rozmyte granice, mogą być niedostatecznie odzwierciedlone w echogramach anten o wyższej częstotliwości.

W wyniku badań stwierdzono, że spękania poprzeczne nawierzchni drogowych mają istotne odzwierciedlenie w echogramach georadarowych. Metoda GPR jest jednak wyczulona na poważne, rozległe struktury zniszczeniowe, zaś cienkie inicjalne pęknięcia nie mają zauważalnych manifestacji. Oprócz diagnozowania poważnych zniszczeń, metoda ta dostarcza w pewnych przypadkach prawdopodobnych lokalizacji przyszłych spękań.

Spękania międzywarstwowe nawierzchni betonowych różnią się od spękań nawierzchni asfaltowych intensywnością manifestacji. Trzeba jednak wziąć pod uwagę, że przebadane nawierzchnie betonowe należą do jednej drogi o bardzo długiej historii. Dlatego trudno ocenić na ile różnice intensywności przejawów biorą się z odmiennego materiału, a na ile z zaawansowania procesów starzenia.