INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW Zakład Diagnostyki Nawierzchni

# **SPRAWOZDANIE**

z realizacji pracy pt.: "Analiza możliwości wykorzystania techniki radarowej w ocenie stanu połączeń międzywarstwowych".

# SPRAWOZDNIE CZĘŚCIOWE Etap II – zadania 3-5

Zleceniodawca: Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad

Umowa nr 2176/2008 z dnia 06.08.2008 roku

Opracowali: mgr inż. Jacek SUDYKA – IBDiM dr inż. Lech KRYSIŃSKI – Uniwersytet Warszawski mgr inż. Przemysław HARASIM – IBDIM Kierownik Zakładu Diagnostyki Nawierzchni

mgr inż. Tomasz MECHOWSKI

Warszawa, listopad 2009

# Spis treści

1	Wstęp6
2	Analiza zdolności systemu pomiarowego GPR w identyfikacji połączeń
	międzywarstwowych oraz jego kalibracja na podstawie badań laboratoryjnych .6
2.1	Badania laboratoryjne jakości sygnałów odbitych rejestrowanych przez system
	pomiarowy GPR
2.2	Analiza porównawcza uzyskiwanych wzorów fal elektromagnetycznych i ocena
	kontrastów międzywarstwowych9
2.2.1	Próby zaimplementowania procedur dekonwolucyjnych i metod pokrewnych11
2.3	Kalibracja systemu pod katem identyfikacji połączeń międzywarstwowych14
3	Badania terenowe14
4	Analiza porównawcza metod diagnostycznych pod kątem identyfikacji połączeń
	międzywarstwowych22
4.1	Wstępna ocena wyników uzyskanych z pomiarów radarowych22
4.2	Analiza wyników uzyskanych z pomiarów ugięć35
4.3	Porównanie metod pod kątem identyfikacji połączeń warstw nawierzchni41
5	Podsumowanie
Bibli	ografia

## Spis ilustracji

Rysunek 2.2 Stos płyt akrylowych umieszczonych na stelażu pod stanowiskiem badawczym .......8

Rysunek 2.4 Porównanie sygnałów odbitych od stosu szyb akrylowych w trzech przypadkach: stosu zawierającego mokrą szczelinę (wypełnioną wodą) o szerokości 1.5 mm równoległą do powierzchni stosu, 3 cm pod jego powierzchnią (krzywa niebieska), stosu ze szczeliną suchą o tym samym położeniu i rozmiarze (krzywa czerwona) oraz stosu bez szczeliny symulującej defekt odspojeniowy (krzywa zielona).

Rysunek 2.5 Porównanie echogramu (po lewej) z sekcją dekonwolucyjną (po prawej) dla skanu oddaleniowego płyty akrylowej zawierającej mokrą szczelinę, płytko położoną pod powierzchnią stosu (antena oddalająca się od płyty); opis w tekście13
Rysunek 3.1 Lokalizacja odcinków wytypowanych do badań terenowych15
Rysunek 3.2 Sekcje odcinka A_P, miedzy warstwą wiążącą a podbudowy zastosowano rożne ilości skropień emulsją oraz zaczyn gliniasty i pylasty16
Rysunek 3.3 Rdzenie odwiertów nr 1 i 2 (od lewej) nawierzchni odcinka B_P16
Rysunek 3.4 Rdzeń nr 2 – połączenie nowych warstw z istniejącymi; widoczna siatka z włókien szklanych przyklejona do dolnej części próbki17
Rysunek 3.5 Rdzenie odwiertów nr 1 i 2 (od lewej) nawierzchni odcinka C_P17
Rysunek 3.6 Rdzeń nr 2 – połączenie nowych warstw z istniejącymi; widoczny kompozyt siatki z matą przyklejony do górnej części próbki18
Rysunek 3.7 Rdzenie odwiertów nr 1 i 2 (od lewej) nawierzchni odcinka D_P18
Rysunek 3.8 Rdzeń nr 1 – widok odspojonych warstw asfaltowych19
Rysunek 3.9 Próbki nawierzchni odwiercone na pasie awaryjnym w km 2+400 (dane archiwalne z 2007 roku)20
Rysunek 3.10 Rdzenie odwiertów nr 1 i 2 (od lewej) nawierzchni odcinka E_P20
Rysunek 3.11 Rdzeń nr 1 – widok odspojonych warstw asfaltowych21
Rysunek 3.12 Rdzenie odwiertów nr 1 i 2 (od lewej) nawierzchni odcinka F_P22

Rysunek 4.2 Przykłady użycia nieprawidłowych sygnałów tła antenowego i wzorów sygnału odbitego zebranych kilka tygodni po pomiarze. Oba sygnały nieprawidłowe (rysunki górne), nieprawidłowy sygnał tła anteny (rysunki środkowe) oraz nieprawidłowe wzorce refleksyjne (rysunki dolne). W lewej kolumnie uzyskany przekrój strukturalny, a w prawej kolumnie sygnał resztkowy powstały w każdym z tych przypadków odpowiednio, w wyniku nieprawidłowego usunięcia tła antenowego (lewy górny) oraz sygnał rezydualny powstający w wyniku nieprawidłowości usuwania piku głównego (lewy środkowy i dolny). ....24

Rysunek 4.3 Przykład udanego usuwania sygnału maskującego (procedura usuwania piku głównego, przy użyciu sygnałów wzorcowych zarejestrowanych w czasie przeprowadzania pomiaru drogowego). Sygnały rezydualne powstające przy usuwaniu tła antenowego (lewy górny), piku głównego (prawy górny) oraz uzyskany przekrój strukturalny (droga gminna w Pszczółkach, odcinek testowy). Na przekroju oprócz

Rysunek 4.26 Zgodność interpretacji metody ugięć i metody radarowej; odcinek A\_P ......41

Rysunek 4.27 Zgodność interpretacji metody ugięć i metody radarowej; odcinek B_P, pas awaryjny42
Rysunek 4.28 Zgodność interpretacji metody ugięć i metody radarowej; odcinek B_P, pas ruchu42
Rysunek 4.29 Zgodność interpretacji metody ugięć i metody radarowej; odcinek C_P, pas lewy43
Rysunek 4.30 Zgodność interpretacji metody ugięć i metody radarowej; odcinek C_P, pas prawy43
Rysunek 4.31 Zgodność interpretacji metody ugięć i metody radarowej; odcinek D_P44
Rysunek 4.32 Zgodność interpretacji metody ugięć i metody radarowej; odcinek E_P44
Rysunek 4.33 Zgodność interpretacji metody ugięć i metody radarowej; odcinek F_P45

# Spis tabel

bela 3.1 Wytypowane odcinki dróg15
------------------------------------

#### 1 Wstęp

Zgodnie z przyjętymi założeniami celem pracy jest ocena przydatności techniki radarowej w identyfikacji połączeń międzywarstwowych. W ramach pracy przewidziano zastosowanie techniki radarowej wspólnie z innymi technikami diagnostycznymi takimi jak ugięciomierz dynamiczny. Pozytywne wyniki pracy pozwolą na zwiększenie efektywności oceny stanu technicznego istniejących nawierzchni, polepszając jednocześnie jakość proponowanych w ramach remontów rozwiązań technologicznych.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono zakres badań i analiz wykonanych w ramach kolejnego etapu pracy badawczej. Etap ten obejmował ocenę zdolności systemu pomiarowego GPR w identyfikacji połączeń międzywarstwowych na podstawie badań laboratoryjnych oraz porównanie jej pod tym kątem z metodą ugięć. W tym celu wytypowano odcinki badawcze zlokalizowane w ciągach dróg krajowych, na których przeprowadzono pomiary. Dzięki uprzejmości kolegów z Politechniki Gdańskiej badaniami objęto również odcinek testowy z sekcjami nawierzchni o różnej, kontrolowanej szczepności warstw.

## 2 Analiza zdolności systemu pomiarowego GPR w identyfikacji połączeń międzywarstwowych oraz jego kalibracja na podstawie badań laboratoryjnych

Przeprowadzone w ramach tego zadania pomiary laboratoryjne miały na celu ocenę rzeczywistych możliwości oraz ograniczeń systemu pomiarowego. Wyniki badań stanowiły jednocześnie dane wejściowe w procesie kalibracji sprzętu (tj. dobrania odpowiednich nastawień urządzenia) do badań terenowych. Wykorzystano je również w wstępnym opracowaniu metody interpretacyjnej, która będzie weryfikowana w trakcie pomiarów i przetwarzania wyników uzyskanych na odcinkach testowych.

Wstępne prace laboratoryjne opisane w poprzednim raporcie służyły rozpoznaniu własności sprzętu GPR używanego w diagnostyce nawierzchni drogowych. Ze względu na skrajnie małe rozmiary struktur będących przedmiotem prac badawczych, największym zainteresowaniem została otoczona antena o najwyższej częstotliwości 2 GHz pośród tych, jakie były do dyspozycji.

Dalsze prace laboratoryjne skupiły się na sprawdzeniu jaki typ sygnału refleksyjnego jest właściwy obecności rozległej i połogiej szczeliny odspojeniowej, jakie są potencjalne perspektywy jego detekcji w warunkach terenowych oraz jakie trudności powstają wskutek jego interferencji z sygnałem właściwym strukturze warstw, w których jest umiejscowiony taki szczelinowy defekt. Równolegle zostały podjęte rozległe prace nad metodami numerycznego przetwarzania i interpretacji rejestrowanych sygnałów refleksyjnych. Głównymi motywacjami tych prac są poważne trudności w interpretacji sygnału refleksyjnego i mają na celu identyfikację horyzontów odbijających i ich własności.

W trakcie prac wstępnych zidentyfikowano liczne przyczyny tych trudności. Bliskie wzajemne położenie horyzontów powoduje nakładanie się na siebie odpowiadających im pakietów czołowych sygnałów refleksyjnych. Metody dekonwolucyjne są wtedy sposobem pozwalającym na rozłożenie zinterferowanego sygnału na sygnały elementarne, ale jak się okazało, sposób ten jest skuteczny, o ile interferujące składniki są silne. Ważną obserwacją było przy tym stwierdzenie, że kształt sygnału refleksyjnego istotnie i w złożony sposób zależy od odległości anteny od horyzontu odbijającego, a także (jak się okazało później) od materiałowego kontrastu warstw. Obserwacie te niekoniecznie są zaskakujące, ale W pracach wdrożeniowych ważne jest eksperymentalne stwierdzenie, że zjawiska te mają kluczowe znaczenie w procesie przetwarzania sygnału jeśli dążymy do uzyskania czytelnych interpretacji strukturalnych. Wnioski te mają istotne znaczenie przy wyborze i konstrukcji metody dekonwolucyjnej i powiązanych z nią metod interpretacyjnych.

Drugą przyczyną braku czytelności echogramów okazał się maskujący wpływ tła antenowego i piku głównego. Próby precyzyjnego usuwania tła maskującego pokazały, że technika taka prowadzi do znaczącego polepszenia czytelności wyników, ale też zostały ujawnione wtedy trudności wynikające z niestabilności kształtu sygnału anteny w kilkunastominutowej skali czasu. Jak się okazało zbieranie referencyjnego sygnału tła antenowego i kolekcji wzorcowych sygnałów odbitych w trakcie każdego pomiaru, pozwala na znaczące polepszenie czytelności uzyskiwanego przekroju strukturalnego (Rysunek 2.1).



Rysunek 2.1 Przekrój strukturalny uzyskany w wyniku usuwania piku głównego. Linia żółta odpowiada powierzchni, silny czerwony refleks to kontakt nawierzchni z podłożem. Odcinek wzorcowy o długości ok. 80 m, nawierzchnia "zdrowa".

Przy zastosowaniu tej metody horyzonty pomiędzy poszczególnymi warstwami asfaltu stają się z reguły wyraźnie widoczne i pojawiła się wtedy możliwość poszukiwania refleksów podwójnych znamionujących odspojenia międywarstwowe, bądź wewnątrzwarstwowe, podczas gdy wcześniej wyraźnie była widoczna zazwyczaj jedynie granica pomiędzy asfaltem, a podłożem. Niemniej jednak problem maskowania nie jest jeszcze rozwiązany w wystarczającym stopniu i są widoczne dalsze możliwości podwyższania czytelności przekrojów, a co więcej polepszenie takie wydaje się być bardzo potrzebne, gdyż może istotnie ułatwić czy wręcz umożliwić odróżnianie refleksów pojedynczych od podwójnych.

# 2.1 Badania laboratoryjne jakości sygnałów odbitych rejestrowanych przez system pomiarowy GPR

Podstawowym celem badań laboratoryjnych było określenie typu sygnałów refleksyjnych powstających przy prześwietlaniu najprostszych struktur warstwowych, a w tym zbadanie jakiego typu sygnału można oczekiwać jako przejawu obecności rozległego, połogiego spękania odspojeniowego. Po wstępnych próbach okazało się, że laboratoryjny model systemu warstw (w tym także systemu zawierającego odspojenie) powinien mieć znaczne rozmiary poziome. Model o małych rozmiarach powoduje, że jego brzegi znajdują się w zasięgu stożka promieniowania anteny, co implikuje znaczące efekty dyfrakcyjne utrudniające interpretację i jednoznaczne wskazanie, które elementy sygnału reprezentują strukturę warstwową z odspojeniami, a które rozproszenie fali powstające na brzegach. Stąd najciekawszym i najwygodniejszym materiałem do symulacji warstw i szczelin okazały się duże płyty akrylowe.



Rysunek 2.2 Stos płyt akrylowych umieszczonych na stelażu pod stanowiskiem badawczym

Przeprowadzone pomiary są kontynuacją badań podjętych w ramach pierwszego etapu niniejszej pracy. Uzyskane wyniki badań stanowią element wejściowy analizy porównawczej i jako takie nie wymagają szczegółowego omówienia. Najważniejsze rezultaty wykonach badań przedstawiono w kolejnym punkcie , natomiast szczegółowe dane z przeprowadzonych pomiarów dostępne są w wersji elektronicznej i będą dołączone w formie załącznika do sprawozdania końcowego.

#### 2.2 Analiza porównawcza uzyskiwanych wzorów fal elektromagnetycznych i ocena kontrastów międzywarstwowych

W związku z trudnościami technicznymi najciekawszym, choć wyidealizowanym modelem laboratoryjnym szczeliny odspojeniowej okazuje się być pojedyncza cienka płyta dielektryczna, na przykład akrylowa. Unikamy wtedy interferencji sygnału czołowego generowanego przez szczelinę, z silnym sygnałem czołowym refleksu powierzchniowego, jeśli szczelina byłaby umiejscowiona płytko pod powierzchnią stosu płyt, a z drugiej strony unikamy kosztownego budowania bardzo grubego stosu płyt, jeśli szczelina miałaby być położona głęboko i pośrodku stosu, tak aby uniknąć interferencji trzech pakietów czołowych.



Rysunek 2.3 Porównanie sygnału georadarowego odbitego od cienkiej (1.9 mm) płyty akrylowej ("refleks podwójny"; krzywa niebieska) z sygnałem odbitym od metalowej blachy ("refleks pojedynczy"; krzywa zielona).

Test przeprowadzony za pomocą cienkich szyb akrylowych pozwolił na określenie kształtu sygnału, który znamionuje obecność rozległego, połogiego odspojenia. Sygnał taki (Rysunek 2.3, krzywa niebieska) różni się zasadniczo od refleksu pojedynczego, czyli sygnału właściwego zwykłemu kontrastowi własności dwóch ośrodków kontaktujących ze sobą poprzez poziomą powierzchnię (Rysunek 2.3, krzywa zielona). O ile ten drugi jest podobny do sygnału wzorcowego w(t) rejestrowanego przy odbijaniu od blachy (z jednym ekstremum wiodącym w obszarze pakietu czołowego), to ten drugi jest

zbliżony kształtem do jego pochodnej dw(t)/dt i ma przez to dwa sąsiadujące ze sobą ekstrema wiodące przeciwnych znaków. Przedmiotem poszukiwań w pracach terenowych stały się zatem takie refleksy podwójne, które powinny być znamieniem odspojenia. W praktyce terenowej zadanie to okazało się sprawą trudną, jako że sygnały odbite są wtedy bardzo słabe i są skutecznie maskowane przez pik główny. Nawet przy obecnych obiecujących próbach usuwania sygnału maskującego, pozostaje nadal trudność w odróżnieniu refleksu podwójnego od pojedynczego.

Testy te pokazały, że sygnał znamionujący obecność szczeliny o szerokości pojedynczych milimetrów jest wystarczająco silny, aby mógł być zarejestrowany i zinterpretowany nawet w warunkach terenowych. Szczeliny o szerokości części milimetra również dają sygnał rejestrowalny i silniejszy od szumów występujących w terenie, ale przy obecnym stanie techniki usuwania tła maskującego występuje wspomniana wyżej trudność w odróżnieniu refleksu podwójnego od pojedynczego i problemu tego nie można rozwiązać przy użyciu dekonwolucji.

Refleks pojedynczy nazywany jest (w roboczej terminologii) dodatnim jeśli ma znak zgodny z refleksem powstającym przy odbiciu od metalowej blachy, czyli odpowiada on horyzontowi kontrastu materiałowego, z ośrodkiem o niższej prędkości leżącym niżej. Odpowiednio refleks ujemny odpowiada przeciwnemu kontrastowi materiałowemu. Refleks podwójny nazywamy dodatnim, jeśli pierwszy pik z pary wiodących ekstremów jest dodatni (czyli ma taki znak jak pik wiodący dodatniego refleksu pojedynczego) i refleks tego typu jest właściwy takiemu ośrodkowi wypełniającemu szczelinę, który ma prędkość mniejszą niż ośrodek otoczenia. W przypadku nawierzchni drogowych jest to na przykład sytuacja szczeliny w asfalcie, wypełnionej wodą. Odpowiednio refleks podwójny nazywamy ujemnym, jeśli pierwszy pik wiodącej amplitudowo pary ekstremów jest ujemny, co odpowiada szczelinie wypełnionej materiałem o większej prędkości niż w otoczeniu, na przykład w szczelinie suchej, czyli wypełnionej powietrzem, albo szczelinie wypełnionej sypkim porowatym materiałem. Jak widać odróżnienie typu refleksu i identyfikacja jego znaku ma fundamentalne znaczenie diagnostyczne i własności te mogą być konfrontowane z wynikami wierceń.

Inna, szczególna trudność wykrycia i interpretacji piku refleksyjnego, jaką wskazały badania laboratoryjne, powstaje w sytuacji, gdy horyzont lub odspojenie jest położone płytko pod powierzchnią drogi, czyli wtedy, gdy właściwy sygnał refleksyjny jest zmieszany z pikiem głównym (Rysunek 2.4). Jeśli sygnał ten jest wystarczająco silny, skutecznym narzędziem analizy kształtu piku głównego i rozdzielania refleksów, okazuje się być dekonwolucja.



Rysunek 2.4 Porównanie sygnałów odbitych od stosu szyb akrylowych w trzech przypadkach: stosu zawierającego mokrą szczelinę (wypełnioną wodą) o szerokości 1.5 mm równoległą do powierzchni stosu, 3 cm pod jego powierzchnią (krzywa niebieska), stosu ze szczeliną suchą o tym samym położeniu i rozmiarze (krzywa czerwona) oraz stosu bez szczeliny symulującej defekt odspojeniowy (krzywa zielona).

# 2.2.1 Próby zaimplementowania procedur dekonwolucyjnych i metod pokrewnych

**Dekonwolucja** jest metodą przetwarzania i interpretacji zarejestrowanego sygnału f(t), która polega na próbie jego rozłożenia na kombinację liniową sygnałów elementarnych  $w_i(t)$ :

$$f(t) \approx b(t) + \sum_{i=1}^{Np} \alpha_i \cdot w_i(t)$$

Jako  $\alpha_i$  zostały tutaj oznaczone współczynniki kombinacji liniowej, które są amplitudami sygnałów elementarnych wchodzących w skład interpretowanego przebiegu f(t). W przypadku sygnału georadarowego przed dekonwolucją dokonuje się usunięcia tła antenowego b(t), przy czym jest tu niezbędna korekta przesunięcia w czasie, gdyż system pomiarowy wykazuje istotny dryf w czasie. Stąd okno czasowe rejestracji skanu musi zawierać prekursor, który jest pakietem czołowym odbicia od obudowy anteny. Niezbędne przesunięcie czasowe modelowego sygnału tła antenowego jest dobierane tak, aby uzyskać maksymalne podobieństwo sygnału do jego modelu w obszarze prekursora. Sygnały elementarne w tym przypadku to sygnały odbite od poszczególnych horyzontów strukturalnych. W najprostszym podejściu modelami sygnałów elementarnych są sygnały odbite od dużej, poziomej, metalowej blachy przy różnych jej odległościach od anteny, przy czym indeks *i* numeruje te odległości. Koncepcja kolekcji wzorcowych sygnałów odbitych *w<sub>i</sub>(t)* wraz ze sposobem ich zbierania jest, jak się okazało dość złożonym zagadnieniem. Sygnały te są zbierane przy różnych odległościach anteny od płyty, ponieważ kształt sygnału odbitego zależy od tej odległości. Co więcej pewne elementy tego sygnału zależą od wielkości kontrastu materiałowego ośrodków graniczących wzdłuż horyzontu odbijającego. Ten ostatni problem nie został jeszcze rozwiązany w praktyce. Odbicie od blachy jest tutaj przyjęte jako model, gdyż badany ośrodek ma płasko-równoległą budowę warstwową przynajmniej jeśli idzie o formalne założenia modelu. Tym samym wszystkie naruszenia tego założenia (nachylenie warstw, zaburzenia kształtu horyzontów, bliska obecność bocznej krawędzi drogi czy obecność szczelin) powodują, że przyjęty model sygnału elementarnego staje się nieadekwatny, co prowadzi do rozmaitych trudności interpretacji.

Przy próbie implementacji numerycznej, prosta idea dekonwolucji staje się zagadnieniem bardzo skomplikowanym. Zadanie jest zdefiniowane jako poszukiwanie dających najlepsze dopasowanie sygnału modelowego parametrów αi do obserwowanego. Uzyskane tą drogą amplitudy αi mają zaskakującą postać, jeśli idzie o ich zależność od indeksu i, która uniemożliwia ich bezpośrednie interpretowanie jako amplitud sygnałów elementarnych. Na tle znaczącego krzywoliniowego i zmieniającego się poważnie od skanu do skanu trendu widoczne są wąskie piki odpowiadające poszukiwanym sygnałom refkeksyjnym. Pikom tym czasem towarzyszy oscylacja zanikająca przy oddalaniu się od piku. Stąd zespół amplitud wymaga dalszego przetwarzania w celu wydzielenia poszczególnych pików, które mogłyby bvć interpretowane jako refleksy. Mniej kapryśna i znacznie szybsza jest metoda dekonwolucji fourierowskiej, jednak nie honoruje ona zależności kształtu sygnału od odległości pomiędzy horyzontem odbijającym, a anteną oraz postulując okresowość sygnału ignoruje jego rzeczywiste własności. Jej zastosowanie nie przynosi zadawalających wyników w praktyce, ale być może metoda ta wymagałaby dalszej procedury reinterpretacyjnej.

Ważną obserwacją wynikłą z prób zaimplementowania dekonwolucji jest jej skuteczność w analizie kształtu czoła piku głównego, gdy jest on ewidentnie zniekształcony na skutek obecności płytkich horyzontów strukturalnych, takich jak płytka obecność granicy pomiędzy warstwą ścieralną, a wiążącą lub hipotetyczne płytkie, ale silnie odbijające odspojenie. Na Rysunku 2.5 przedstawiono zapis pomiarów z prowadzonych obserwcji. Współrzędna pozioma odpowiada oddaleniu anteny, zaś pionowa odpowiada podwójnemu czasowi przejścia, a amplitudy są uwidocznienie za pomocą kolorów. W tym przypadku echogram jest trudny do interpretacji, ze względu na interferencję sygnałów odbitych od wzajemnie bliskich powierzchni, natomiast sekcja dekonwolucyjna pozwala na rozpoznanie refleksu powierzchniowego (S), pary refleksów o przeciwnych znakach odpowiadających szczelinie, czyli refleksu podwójnego (C) oraz refleksu od metalowej podstawy stosu (B)



Rysunek 2.5 Porównanie echogramu (po lewej) z sekcją dekonwolucyjną (po prawej) dla skanu oddaleniowego płyty akrylowej zawierającej mokrą szczelinę, płytko położoną pod powierzchnią stosu (antena oddalająca się od płyty); opis w tekście.

Nadzwyczaj interesujące wyniki przyniosła realizacja procedury *usuwania piku głównego*. Pik główny to robocza nazwa sygnału odbitego od nawierzchni drogi. W przypadku sytuacji badań terenowych jest to najsilniejszy sygnał strukturalny i powraca on do anteny najwcześniej, przez co jego oscylacje ciągnące się za pakietem czołowym, mimo że słabsze amplitudowo od pakietu czołowego, mają na tyle znaczącą amplitudę, że skutecznie maskują refleksy strukturalne będące głównym przedmiotem badań. Prototypy metody usuwania piku głównego polegają na odjęciu od rejestrowanego sygnału *f*(*t*) jednego tylko wzorcowego sygnału refleksyjnego *w<sub>i</sub>*(*t*), który jest wybrany razem ze skalującym czynnikiem amplitudowym  $\alpha$  jako najlepiej pasujący do sygnału rejestrowanego w zakresie pakietu czołowego.

 $e(t) = f(t) - b(t) - \alpha \cdot w_i(t)$ 

Procedura taka jest niejako skrajnie uproszczoną wersją dekonwolucji i dzięki ograniczeniu liczby dopasowywanych parametrów ma znacznie wyższą stabilność. Zaimplementowanie tej metody wybitnie poprawiło czytelność echogramu *e*(*t*), na którym można obecnie obserwować horyzonty odpowiadające granicom pomiędzy warstwami asfaltu, a ponadto stało się dowodem na to, że przyczyną braku czytelności echogramu po usunięciu piku głównego jest przede wszystkim niestabilność kształtu sygnału emitowanego przez antenę (lub ewentualnie także niestabilność procesu rejestracji sygnału powracającego) w kilkunastominutowej skali czasu. Innym wnioskiem z tych prób jest zidentyfikowanie jednej z głównych przyczyn niepowodzenia dekonwolucji w analizie słabych sygnałów strukturalnych, gdyż jak się okazało, głównym składnikiem analizowanego sygnału jest zwykle sygnał resztkowy (rezydualny) po nieprawidłowo usuniętym sygnale maskującym.

Warto tutaj zaznaczyć, że badania nad wspomnianą niestabilnością sygnału i wdrożenie metody usuwania piku głównego wymaga samodzielnej implementacji

odpowiednich metod numerycznych, ponieważ funkcja "*background removal*" obecna w komercyjnym oprogramowaniu nie jest obecnie wystarczająco elastyczna do zrealizowania tych celów z zadowalającą precyzją. Jednak funkcja ta jest bez wątpienia użyteczna przy podwyższaniu czytelności echogramu, szczególnie w sytuacji braku innych sposobów.

# 2.3 Kalibracja systemu pod katem identyfikacji połączeń międzywarstwowych

W efekcie przeprowadzonych badań i analiz przedstawionych w wcześniejszych punktach przyjęto następujące ustawienia systemu pomiarowego:

- częstotliwość próbkowania: 100 KHz,
- ilość sampli w skanie: 1024,
- ilość bitów w samplu: 16,
- początek próbkowania sygnału: 96,5ns
- szerokość okna próbkowania sygnału: w dwóch wariantach 7ns i 12ns,
- wzmocnienie sygnału: 11dB.

Dla takich nastawów systemu pomiarowego przyjęto następującą metodykę pomiarów:

- przed rozpoczęciem zasadniczych pomiarów należy wygrzewać system w trybie zapisu przez co najmniej dwie godziny (można zastosować stacking<sup>1</sup> sygnałów),
- przeprowadzić pomiar tła (tzw. sygnał powietrza) przez min 30s,
- przeprowadzić pomiar sygnału odbitego z blachy przez min 30s,
- przeprowadzić pomiar sygnału odbitego z blachy w trybie "bouncing<sup>2</sup>",
- wykonać pomiar zasadniczy przy oknie próbkowania 7ns,
- wykonać pomiar zasadniczy przy oknie próbkowania 12ns.

Po pomiarach zasadniczych:

- przeprowadzić pomiar tła (tzw. sygnał powietrza) przez min 30s,
- przeprowadzić pomiar sygnału odbitego z blachy przez min 30s,

### 3 Badania terenowe

W celu weryfikacji przyjętych założeń zaplanowano i wykonano badania terenowe na wytypowanych odcinkach dróg (Tabela 3.1 oraz Rysunek 3.1). Odcinki przewidziane do badań zostały wyselekcjonowane z pośród kilkunastu odcinków. Część z nich wytypowana została na podstawie danych archiwalnych z okresu 3 poprzednich lat, natomiast pozostałe ustalono według informacji uzyskanych z terenu oraz na podstawie odwiertów kontrolnych.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> stacking – funkcja uśredniająca określoną przez operatora liczbę skanów

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> tryb bouncing – pomiar sygnału odbitego w celu ustalenia amplitudy wychyleń anteny w pionie

Oznaczenie	e Lokalizacja	Pikietaż [km]		
odcinka		początek	koniec	uwagi
A_P Odcinek badawczy "Pszczółki"; siedem sekcji badawczych – opis w t				em sekcji badawczych – opis w tekście
B_P	DK1	37+400	38+300	strona prawa (pomiar w śladzie prawego koła oraz w osi pasa awaryjnego)
C_P	DK20	281+500	283+500	strona prawa i lewa (pomiar w śladzie prawego koła)
D_P	DK9	32+100	33+000	strona prawa ( w śladzie prawego koła)
E_P	S7 – obw. Białobrzegów	2+300	2+700	strona prawa (pomiar na pasie awaryjnym)
F_P	DK50– obw. Słomczyna	2+200	2+900	storna lewa ( w śladzie prawego koła)

#### Tabela 3.1 Wytypowane odcinki dróg



Rysunek 3.1 Lokalizacja odcinków wytypowanych do badań terenowych

## Odcinek badawczy A\_P - "Pszczółki"

Odcinek badawczy "Pszczółki" (Rysunek 3.2) przygotowany został w ramach pracy badawczej prowadzonej przez Politechnikę Gdańską. W konstrukcji nawierzchni zasymulowano różne poziomy szczepności pomiędzy warstwami asfaltowymi, od pełnej do jej całkowitego braku. Różną szczepność międzywarstwową uzyskano przez zmiany ilościowe zastosowanego skropienia. Brak szczepności zasymulowano przez aplikację pomiędzy warstwy asfaltowe pyłów z odpylania oraz zaczynu z gliny. Szerszy opis odcinka badawczego można znaleźć między innymi w publikacji (Jaskuła, 2009).



#### ODCINEK PRÓBNY PSZCZÓŁKI

Rysunek 3.2 Sekcje odcinka A\_P, miedzy warstwą wiążącą a podbudowy zastosowano różne ilości skropień emulsją oraz zaczyn gliniasty i pylasty

#### Odcinek badawczy B\_P

Odcinek doświadczalny nadzorowany przez GDDKiA Oddział w Gdańsku, na którym testowane są rożne rodzaje siatek stosowanych w warstwach asfaltowych. Nową nawierzchnię odcinka stanowią warstwy asfaltowe o grubości ok. 10 cm ułożone na istniejącej nawierzchni. Na połączeniu warstw zastosowano siatkę wzmacniającą. Na Rysunku 3.3 przedstawiono próbki odwiertów wykonanych w osi pasa awaryjnego (odwiert nr 1) i w śladzie prawego koła (odwiert nr 2). W próbce nr 2 stwierdzono brak połączenia warstw asfaltowych (Rysunek 3.4).



Rysunek 3.3 Rdzenie odwiertów nr 1 i 2 (od lewej) nawierzchni odcinka B\_P



Rysunek 3.4 Rdzeń nr 2 – połączenie nowych warstw z istniejącymi; widoczna siatka z włókien szklanych przyklejona do dolnej części próbki

#### Odcinek badawczy C\_P

Nową nawierzchnię odcinka stanowią warstwy asfaltowe o grubości ok. 13 cm ułożone na istniejącej nawierzchni. Na połączeniu warstw zastosowano kompozyt siatki z matą polipropylenową. Na Rysunku 3.5 przedstawiono próbki odwiertów wykonanych na pasie lewym (odwiert nr 1) i na pasie prawym (odwiert nr 2). W trakcie oględzin próbki nr 2 rdzeń rozpadł się w miejscu połączenia nowych warstw nawierzchni z istniejącymi (Rysunek 3.6).



Rysunek 3.5 Rdzenie odwiertów nr 1 i 2 (od lewej) nawierzchni odcinka C\_P



Rysunek 3.6 Rdzeń nr 2 – połączenie nowych warstw z istniejącymi; widoczny kompozyt siatki z matą przyklejony do górnej części próbki

#### Odcinek badawczy D\_P

Odcinek wytypowano na podstawie danych archiwalnych, z których wynika, że nawierzchnia nie podlegała remontowi w ciągu ostatnich 15 lat. Nawierzchnię odcinka stanowią warstwy asfaltowe o grubości ok. 16-19 cm ułożone na warstwie podbudowy z betonu cementowego. Na Rysunku 3.7 przedstawiono próbki odwiertów wykonanych na pasie prawym w km 32+200 (odwiert nr 1) i w km 32+850 (odwiert nr 2). Stwierdzono brak szczepności międzywarstwowej w próbce nr 1 (Rysunek 3.8). Widoczny brak lepiszcza oraz ślady penetracji szlamu z odwiertu mogą sugerować permanentny brak szczepności w tym rejonie nawierzchni



Rysunek 3.7 Rdzenie odwiertów nr 1 i 2 (od lewej) nawierzchni odcinka D\_P



Rysunek 3.8 Rdzeń nr 1 – widok odspojonych warstw asfaltowych

#### Odcinek badawczy E\_P

Odcinek oddano do użytku w 2003 roku. Nawierzchnię odcinka stanowią warstwy asfaltowe o grubości ok. 26 cm ułożone na warstwie mieszanki mineralnej stabilizowanej mechanicznie. Na Rysunku 3.10 przedstawiono próbkę z odwiertu wykonanego na pasie awaryjnym. Zarówno z danych archiwalnych (Rysunek 3.9) jak i na podstawie odwierconej próbki stwierdzono brak szczepności międzywarstwowej. Mimo takiego stanu nie zarejestrowano jak dotąd uszkodzeń powierzchniowych nawierzchni. Na Rysunku 3.11 przedstawiono spód warstwy wiążącej z charakterystyczną, małą ilością spoiwa asfaltowego.



Rysunek 3.9 Próbki nawierzchni odwiercone na pasie awaryjnym w km 2+400 (dane archiwalne z 2007 roku)



Rysunek 3.10 Rdzenie odwiertów nr 1 i 2 (od lewej) nawierzchni odcinka E\_P



Rysunek 3.11 Rdzeń nr 1 – widok odspojonych warstw asfaltowych

#### Odcinek badawczy F\_P

Odcinek wytypowano na podstawie jednokrotnego pomiaru radarowego. Nawierzchnię tego odcinka drogi stanowią warstwy asfaltowe o grubości ok. 25-31 cm ułożone na warstwie kruszywa stabilizowanego mechanicznie. Na Rysunku 3.12 przedstawiono próbki odwiertów wykonanych na pasie lewym w km 2+800 (odwiert nr 1) i w km 2+239,40 (odwiert nr 2). Stwierdzono brak szczepności międzywarstwowej w próbce nr 2.



Rysunek 3.12 Rdzenie odwiertów nr 1 i 2 (od lewej) nawierzchni odcinka F P

## 4 Analiza porównawcza metod diagnostycznych pod kątem identyfikacji połączeń międzywarstwowych

W ramach badań przeprowadzono pomiary techniką radarową zgodnie z nastawami i metodyką opracowaną w ramach kalibracji urządzenia. Równolegle z badaniami radarowymi prowadzono pomiary ugięciomierzem dynamicznym. Całość badań zamknięto wykonaniem w ustalonych miejscach odwiertów kontrolnych prezentowanych wcześniej.

Najistotniejsze wyniki przeprowadzonych pomiarów i analiz przedstawiono w dalszej części niniejszego sprawozdania. Wszystkie pomiary dostępne są w wersji elektronicznej i w formie załącznika elektronicznego zostaną dołączone do sprawozdania końcowego.

#### 4.1 Wstępna ocena wyników uzyskanych z pomiarów radarowych

terenowe Pierwsze badania ujawniły poważny rozdźwięk pomiędzy wyidealizowanymi sytuacjami symulowanymi laboratoryjnie, a realiami ośrodka z jakim mamy do czynienia w terenie. W sytuacji terenowej kontrasty materiałowe pomiędzy warstwami asfaltowymi są tak słabe, że najczęściej nie jest możliwe uchwycenie na echogramie tych horyzontów. Kłopot ten dotyczy także hipotetycznych odspojeń, które generują równie słabe sygnały odbite, a co więcej ich obecność jest oczekiwana szczególnie na samych kontaktach między warstwami asfaltowymi. Przyczyną maskowania słabych sygnałów refleksyjnych jest wspomniana wcześniej obecność tła antenowego (sygnału powstającego w wyniku wielokrotnych odbić wewnątrz anteny, a rejestrowanego także w czasie nadejścia refleksów) oraz duża amplituda piku głównego (refleksu powstającego na powierzchni drogi, którego fluktuacje kontynuują się daleko za jego impulsem czołowym) (Rysunek 4.1). Na przekroju strukturalnym widać wyraźnie jedynie granicę pomiędzy asfaltem, podłożem (silny czerwony refleks, ale jeśli idzie o horyzonty pośrednie, pojawia się jedynie hipoteza ich obecności.



Rysunek 4.1 Echogramy (wyrównane do powierzchni drogi) bez usuniętego tła maskującego (rysunki górne; z lewej w skali barw zgodnej z rysunkami poniżej, a z prawej ten sam rysunek w skali barw zmoderowanej dla uniknięcia przesterowań); rysunek dolny przedstawia przekrój strukturalny z usuniętym jedynie tłem antenowym, ale bez usuniętego piku głównego.

Po zastosowaniu usuwania tła antenowego i piku głównego, okazało się w trakcie kolejnych sesji terenowych, że w prawdzie metoda ta nieco polepsza czytelność echogramu, ale nadal jest obecne silne systematyczne tło maskujące (Rysunek 4.2).



Rysunek 4.2 Przykłady użycia nieprawidłowych sygnałów tła antenowego i wzorów sygnału odbitego zebranych kilka tygodni po pomiarze. Oba sygnały nieprawidłowe (rysunki górne), nieprawidłowy sygnał tła anteny (rysunki środkowe) oraz nieprawidłowe wzorce refleksyjne (rysunki dolne). W lewej kolumnie uzyskany przekrój strukturalny, a w prawej kolumnie sygnał resztkowy powstały w każdym z tych przypadków odpowiednio, w wyniku nieprawidłowego usunięcia tła antenowego (lewy górny) oraz sygnał rezydualny powstający w wyniku nieprawidłowości usuwania piku głównego (lewy środkowy i dolny).

Główną przyczyną okazała się duża niestabilność sygnału generowanego przez antenę, przez co zarejestrowane w innym czasie kolekcje wzorcowych sygnałów odbitych nie są

skuteczne w usuwaniu piku głównego. Wynikająca z tych obserwacji metoda wymaga zbierania kolekcji sygnałów wzorcowych w trakcie każdego pomiaru terenowego. Metoda ta nadaje się do stosowania w terenie i znacząco poprawiła możliwości strukturalnej interpretacji echogramów (Rysunek 4.3). Przy jej użyciu kontakty pomiędzy warstwami asfaltowymi są z reguły widoczne, jednak interpretacja czy mamy do czynienia z refleksem pojedynczym od kontrastu materiałowego, z refleksem podwójnym pochodzącym od szczeliny odspojeniowej czy też z przypadkiem pośrednim jest trudna nie tylko ze względu na niepełne usunięcie tła maskującego.



Rysunek 4.3 Przykład udanego usuwania sygnału maskującego (procedura usuwania piku głównego, przy użyciu sygnałów wzorcowych zarejestrowanych w czasie przeprowadzania pomiaru drogowego). Sygnały rezydualne powstające przy usuwaniu tła antenowego (lewy górny), piku głównego (prawy górny) oraz uzyskany przekrój strukturalny (droga gminna w Pszczółkach, odcinek testowy). Na przekroju oprócz powierzchni granicznej asfaltu z podłożem (silny czerwony refleks) wyraźnie są widoczne dwa horyzonty w pakiecie warstw asfaltowych, przy czym dolnemu towarzyszy silny refleks podwójny związany z odspojeniem wykonanym celowo w intencjach badawczych, w trakcie budowy drogi. Rzeczywiste powierzchnie kontrastów nie są zapewne nieskończonymi, poziomymi płaszczyznami i generują sygnał istotnie odmienny od wzorcowego. Testowanie tej metody diagnostycznej w terenie jest zadaniem trudnym i wymagającym rozległych prac, bo struktura nawierzchni rzadko jest udokumentowana w wystarczający sposób niezależnymi metodami. Jednak w wyjątkowych sytuacjach, gdy mamy do czynienia z odspojeniami o dużej, kilkumilimetrowej szerokości, refleksy podwójne bywają bardzo wyraźnie widoczne. Jednym z pierwszych przykładów skuteczności tej metody były wyniki uzyskane na testowym odcinku drogi gminnej w Pszczółkach.

Zamieszczone w dalszej części obrazy nawierzchni zawierają interpretację stanu połączeń reprezentowany przez pasek o następującej gradacji kolorów:

- kolorem zielonym oznaczono strefy nawierzchni o dobrej szczepności warstw,
- kolorem żółtym oznaczono strefy nawierzchni gdzie prawdopodobnie występuje problem z połączeniem międzywarstwowym,
- kolorem czerwonym oznaczono miejsca, w których występuje brak połączenia warstw.

#### Odcinek badawczy A\_P "Pszczółki"

Poniżej (Rysunek 4.4) przedstawiono zapis z pomiarów radarowych na odcinku A\_P. Tak jak wcześniej wspomniano jest to odcinek doświadczalny, na którym symulowano rożne stany połączenia warstw wiążącej i podbudowy asfaltowej. Na sekcjach A, E, F i G w strefie połączeń warstw zastosowano różne ilości emulsji od 015 kg/m<sup>2</sup> do 1 kg/m<sup>2</sup>. Warstwa wiążąca na sekcji B ułożona została "na sucho", natomiast na połączeniach warstw sekcji C i D zastosowano pyły i zaczyn gliniasty.

Przedstawiona interpretacja potwierdza wstępnie skuteczność oceny połączeń techniką radarową. Niewielkie przesunięcia stref względem sekcji mogą wynikać z niedokładności oznaczeń wyniesionych w terenie.

Na uwagę zasługuje interpretacja sekcji F gdzie na połączeniu warstw zastosowano skropienie 0,4 kg/m<sup>2</sup>. Z zapisu sygnałów radarowych wynika, że na części sekcji możliwy jest brak połączenia, tymczasem zastosowana technologia i dane z odwiertu wskazują na sytuację odwrotną. Oceniając tą sekcję należy pamiętać, że próbki zostały pobrane w krótkim okresie po wykonaniu nawierzchni, a odcinek oddano do ruchu w roku 2007. Dodatkowo przeprowadzone konsultacje z osobami nadzorującymi odcinek wykazały możliwe błędy technologiczne popełnione w czasie wykonania nawierzchni.



Rysunek 4.4 Obraz nawierzchni odcinka A\_P wraz z interpretacją, kolory paska: zielony – pełne połączenie, żółty – prawdopodobny brak połączenia, czerwony – brak połączenia

Ciekawy obraz nawierzchni uzyskano przez wykonanie pomiaru równoległego, przesuniętego o 50cm względem pomiaru oryginalnego (Rysunku 4.5). Jest to doskonały przykład zmienności jakości konstrukcji nawierzchni w przekroju poprzecznym drogi.



Rysunek 4.5 Obraz nawierzchni odcinka A\_P, profil górny przedstawia pomiar w linii odwiertów (interpretację przedstawiono wcześniej), natomiast profil dolny przedstawia pomiar wykonany równolegle, z przesunięciem ok. 50 cm

#### Odcinek badawczy B\_P

Radarowy obraz odcinka jest bardzo niejednorodny (Rysunek 4.6). Przyczyną uzyskania takiego obrazu nawierzchni jest niewątpliwie zastosowanie siatek szklanych na połączeniu warstwy wiążącej i podbudowy asfaltowej, które utrudniają prawidłową

interpretację uzyskiwanego sygnału. Tym nie mniej udało się zidentyfikować i potwierdzić miejsca, w których występuje brak szczepności warstw. Na Rysunku 4.7 przedstawiono fragment odcinka, na którym potwierdzono interpretację sygnałów radarowych. Kształt zarejestrowanych refleksów jest klasycznym obrazem poziomej szczeliny wypełnionej wodą.



Rysunek 4.6 Obraz nawierzchni odcinka B\_P wraz z interpretacją, profil górny przedstawia pomiar w osi pasa awaryjnego, natomiast profil dolny przedstawia pomiar wykonany równolegle, na pasie ruchu, w śladzie prawego koła



Rysunek 4.7 Fragment odcinka, na którym potwierdzono brak połączenia między warstwami asfaltowymi; brak połączenia na dł. ok. 90 m reprezentuje para refleksów – dodatni-ujemny o kolorach czerwony-czarny

#### Odcinek badawczy C\_P

Tak jak na odcinku B\_P radarowy obraz odcinka jest bardzo niejednorodny (Rysunek 4.8). Również i w tym przypadku przyczyną uzyskania takiego obrazu nawierzchni jest zastosowanie siatek szklanych na połączeniu warstwy wiążącej i podbudowy asfaltowej, które utrudniają prawidłową interpretację uzyskiwanego sygnału. Tym nie mniej udało się zidentyfikować i potwierdzić miejsca, w których występuje brak szczepności warstw.



Rysunek 4.8 Obraz nawierzchni odcinka C\_P wraz z interpretacją, profil górny przedstawia pomiar pasa prawego, profil dolny przedstawia pomiar pasa lewego

Na Rysunku 4.9 przedstawiono fragment odcinka, na którym potwierdzono interpretację sygnałów radarowych. Kształt zarejestrowanych refleksów jest zbieżny z obrazem suchej szczeliny poziomej. Przypadek ten ma szczególne znaczenie ponieważ rolę szczeliny w większym stopniu pełni zastosowany kompozyt siatki i maty z polipropylenu niż sama szczelina. Pomijając zasadność stosowania tego rodzaju elementów w nawierzchni należy pamiętać, że uzyskiwany na takich odcinkach obraz radarowy może wprowadzać w błąd operatora, czego skutkiem może być mylna interpretacja danych.



Rysunek 4.9 Fragment odcinka, na którym potwierdzono brak połączenia między warstwami asfaltowymi; brak połączenia na dł. ok. 120 m reprezentuje para refleksów ujemny-dodatni o kolorach czarny-czerwonym

#### Odcinek badawczy D\_P

Interpretacja odcinka, którego nawierzchnia eksploatowana jest w dłuższym okresie czasu okazała się znacznie trudniejsza niż to się ma w przypadku nowszych nawierzchni, o usystematyzowanym układzie warstw. Zarejestrowana niejednorodność sygnału (Rysunek 4.10) jest niestety typowym objawem nieciągłości i zniszczeń strukturalnych nawierzchni.



Rysunek 4.10 Obraz nawierzchni odcinka D\_P wraz z interpretacją, profil górny przedstawia pomiar pasa prawego, profil dolny przedstawia pomiar pasa lewego

Nieciągłości i uszkodzenia mające wpływ na jakość rejestrowanych sygnałów często prowadzą do błędów na etapie interpretacji danych. Taka sytuacja miała miejsce na

omawianym odcinku. Na Rysunku 4.11 przedstawiono początkowy fragment odcinka, na którym według przyjętej interpretacji nie ma prawidłowego połączenia warstw asfaltowych. Tymczasem wykonany odwiert kontrolny wykazał, że w miejscu tym jest pełna szczepność warstw. "Szczeliną" jest tu warstwa, która przed wykonaniem nakładki pełniła rolę warstwy ścieralnej. Warstwa ta jest zdegradowana (duże ubytki lepiszcza, drobne kruszywo) i jakościowo znacznie odbiegająca od warstw sąsiednich, co niewątpliwie miało wpływ na otrzymany kształt sygnału i tym samym błędne zinterpretowanie danych.



Rysunek 4.11 Fragment odcinka, na którym potwierdzono brak połączenia między warstwami asfaltowymi; brak połączenia na dł. ok. 120 m reprezentuje para refleksów ujemny-dodatni o kolorach czarny-czerwonym

Drugi z fragmentów odcinka zinterpretowano poprawnie, co potwierdzono odwiertem kontrolnym (Rysunek 4.12). Na uwagę zasługuje umiejscowienie refleksów wskazujących na brak szczepności. W początkowym fragmencie brak poprawnego połączenia występuje na głębokości ok. 6 cm od powierzchni, natomiast dalej szczelina jest na głębokości ok. 10 cm.



Rysunek 4.12 Fragment odcinka, na którym potwierdzono brak połączenia między warstwami asfaltowymi; brak połączenia na dł. ok. 60 m reprezentuje para refleksów dodatni-ujemny o kolorach czerwony-czarny

#### Odcinek badawczy E\_P

Praktycznie na całej długości odcinka uzyskane dane wskazują na brak połączenia warstw. Dane archiwalne z tego odcinka (odwiert wykonany w strefie oznaczonej kolorem czerwonym tj. brak szczepności wg pomiarów radarowych) również wskazywały na występowanie tego niekorzystnego dla nawierzchni zjawiska.



Rysunek 4.13 Obraz nawierzchni odcinka E\_P wraz z interpretacją

Odwiert kontrolny wykonany w strefie określonej jako prawdopodobny brak połączenia wraz z fragmentem odcinka przedstawiono na Rysunku 4.14. Lokalizacja odwiertu kontrolnego nie była przypadkowa, a jego umiejscowienie miało na celu potwierdzenie braku szczepności w miejscu występowania odwrotnej pary refleksów. Należy zauważyć, że sąsiednie strefy o refleksach w układzie czerwony-czarny również świadczą o występowaniu poziomej szczeliny, z tym że prawdopodobnie zalanej wodą. Strefa odwiertu, o parze refleksów czarny-czerwony świadczy o występowaniu szczeliny suchej.



Rysunek 4.14 Fragment odcinka, na którym potwierdzono brak połączenia między warstwami asfaltowymi; brak połączenia reprezentuje para refleksów ujemny-dodatni o kolorach czarny-czerwonym

#### Odcinek badawczy F\_P

Odcinek o wyraźnie odmiennych konstrukcjach nawierzchni. Z uzyskanych informacji oraz danych radarowych należy wnioskować, że początkowa część odcinka to konstrukcja nowa, natomiast dalsza część przedstawia istniejącą nawierzchnię, na której wykonano nakładkę asfaltową.

Brak szczepności potwierdzono w części odcinka z nakładką asfaltową (Rysunek 4.16). Na szczególną uwagę zasługują zaznaczone na profilu strefy, które według przyjętej metodyki reprezentują szczelinę zalaną wodą. Na odcinku z nakładką zidentyfikowano kilka takich stref.



Rysunek 4.15 Obraz nawierzchni odcinka F\_P wraz z interpretacją



Rysunek 4.16 Fragment odcinka, na którym potwierdzono strefy występowania braku połączenia między warstwami asfaltowymi; brak połączenia reprezentuje para refleksów dodatni-ujemny o kolorach czerwony-czarny

#### 4.2 Analiza wyników uzyskanych z pomiarów ugięć

Podejmowane w ciągu ostatnich kilku lat próby określenia stanu połączenia międzywarstwowego z wykorzystaniem metody przedstawionej przez (Mechowski, i inni, 2006) kończyły się częstokroć z różnorodnym skutkiem. Uzyskiwane w tym czasie rezultaty i doświadczenia wskazują na konieczność weryfikacji tej metody. Należy przy tym zaznaczyć, że metoda ta wciąż posiada bardzo duży potencjał, szczególnie gdy uwzględni się możliwość symulowania zjawisk falowych zachodzących w konstrukcji nawierzchni.

Zebrane doświadczenia pozwoliły na weryfikację metody na poziomie wskaźnikowym, bez rozpatrywania skomplikowanych zjawisk falowych, co powinno być tematem oddzielnej pracy badawczej. W tym celu, przed przystąpieniem do pomiarów zasadniczych, wykonano serię pomiarów na odcinkach testowych Instytutu, na których zidentyfikowano brak połączenia międzywarstwowego. Uzyskane wyniki poddano analizie, w której oceniano wpływ wielkości obciążenia oraz czasu rejestracji przebiegu ugięć na charakter rejestrowanej czaszy ugięcia. Zasymulowano cztery wielkości obciążenia nawierzchni: 32, 57, 75 i 92kN. W wyniku przeprowadzonych prób nie stwierdzono istotnych z punktu widzenia metody zmian w charakterze przebiegu krzywej, dlatego podstawowym obciążeniem do dalszych badań pozostało 50kN.

Pomiary wykonano z wykorzystaniem rejestracji przebiegu ugięć w maksymalnym możliwym interwale czasu tj 1200ms. Dla zebranych wyników stwierdzono, że wartości ugięć rejestrowane do typowej wartości *Uend=600ms* pozostają optymalne do opisu oddziaływania konstrukcji. Analizę ugięć przeprowadzono w oparciu o jeden geofon zlokalizowany bezpośrednio pod obciążeniem. Wartości ugięć rejestrowane przez pozostałe geofony będą przedmiotem przyszłych badań.

Dla każdego punktu pomiarowego obliczono wskaźnik połączenia warstw zgodnie ze wzorem:

$$W = \frac{Uend - Umin}{Umax} 100\%$$

w którym:

W – wskaźnik połączenia warstw,

Uend – wartość ugięcia na końcu rejestrowanego przebiegu, µm,

Umin – najmniejsza wartość ugięcia zarejestrowana po ugięciu maksymalnym, μm,

*Umax* – ugięcie maksymalne, μm.

Przeprowadzone analizy wykazały, że w dotychczasowych obliczeniach jako wartość minimalną *Umin* przyjmowano najmniejszą wartość w całym przebiegu czasowym. Jest to rozwiązanie błędne, a w poprawnym postępowaniu jako wartość minimalną należy przyjmować przeciwległe ekstremum występujące po zarejestrowaniu *Umax*. W

przypadku braku tego ekstremum (np. w warunkach dobrego połączenia warstw) przyjmuje się, że wartość minimalna *Umin* jest równa wartości końcowej zarejestrowanego przebiegu czasowego *Uend*. Graficzne wyjaśnienie przedstawiono na Rysunku 4.1.



Rysunek 4.17 Przebieg ugięcia w czasie oraz punkty charakterystyczne czaszy ugięć

Kryteria klasyfikacji stanu połączeń międzywarstwowych pozostawiono bez zmian i wynoszą odpowiednio:

W = 0	pełne połączenie warstw,
0 < W ≤ 4	dobre połączenie warstw,
4 < W ≤ 8	słabe połączenie warstw,
W > 8	brak połączenia warstw.

Pomiary ugięć na odcinkach zlokalizowanych w ciągach dróg krajowych przeprowadzono z krokiem pomiarowym 25m natomiast na odcinku badawczym "Pszczółki" z krokiem pomiarowym 2 m (Załącznik 1).

Na odcinku badawczym A\_P – "Pszczółki" zidentyfikowano dobre połączenie warstw na pierwszej sekcji o skropieniu normalnym oraz z brakiem skropienia. Na przeważającej części sekcji zanieczyszczonej pyłami stan połączeń zakwalifikowano jako dobry, natomiast w pozostałej części jako słaby. Na pozostałych sekcjach z użyciem zaczynu gliniastego oraz różnych ilościach skropienia wykazano brak połączenia warstw asfaltowych. Z uwagi na rozbieżności pomiędzy warunkami symulowanymi a otrzymanymi wynikami proponuje się zbadanie stanu konstrukcji poprzez wykonanie

odwiertów kontrolnych oraz badań laboratoryjnych określających stan połączenia warstw.



Rysunek 4.18 Wyniki obliczeń wskaźników połączenia warstw na odcinku A\_P

W wyniku przeprowadzonych analiz dla odcinka B\_P stwierdzono pełne połączenie warstw dla badań wykonanych zarówno na pasie awaryjnym jak i w śladzie prawego koła.



Rysunek 4.19 Wyniki obliczeń wskaźników połączenia warstw na odcinku B\_P\_1, prawy pas ruchu, ślad prawego koła



Rysunek 4.20 Wyniki obliczeń wskaźników połączenia warstw na odcinku B\_P\_2, pas awaryjny

Na całej długości odcinka C\_P (strona prawa i lewa) zidentyfikowano dużą zmienność stanu połączenia międzywarstwowego. Wartości wskaźnika wahają się od 0 do 17, przy czym nie można wyodrębnić wyraźnych sekcji o jednorodnym stanie konstrukcji. Ogólny stan szczepności warstw określono jako słaby.



Rysunek 4.21 Wyniki obliczeń wskaźników połączenia warstw na odcinku C\_P\_1, pas prawy



Rysunek 4.22 Wyniki obliczeń wskaźników połączenia warstw na odcinku C\_P\_2, pas lewy

Na odcinku D\_P wykazano lokalny brak połączeń międzywarstwowych w km od 32+325 do 32+575, podczas gdy na pozostałej części odcinka jego stan zakwalifikowano jako dobry. Jest to przykład możliwości dodatkowego wykorzystania wyników pochodzących z typowych pomiarów ugięć do lokalizacji sekcji podejrzanych o brak szczepności warstw.



Rysunek 4.23 Wyniki obliczeń wskaźników połączenia warstw na odcinku D\_P

Obliczenia wskaźników połączenia warstw na odcinku E\_P kwalifikują jego stan jako dobry. Jedynie w przypadku trzech punktów pomiarowych zidentyfikowano słabe połączenie warstw.



Rysunek 4.24 Wyniki obliczeń wskaźników połączenia warstw na odcinku E\_P

Z uwagi na dużą zmienność wyników oraz wysokie wartości wskaźników na odcinku E\_P jego ogólny stan połączeń międzywarstwowych określono jako słaby.



Rysunek 4.25 Wyniki obliczeń wskaźników połączenia warstw na odcinku F\_P

# 4.3 Porównanie metod pod kątem identyfikacji połączeń warstw nawierzchni

Na zamieszczonych poniżej Rysunkach 4.25-4.33 przedstawiono porównanie wyników interpretacji przeprowadzonej na wszystkich odcinkach badawczych obiema metodami. Już wstępne zapoznanie się z tymi rezultatami wskazuje na słabą korelację między zastosowanymi metodami. Nie jest to jednak zaskoczeniem, gdyż mamy do czynienia z zupełnie różnymi metodami badawczymi, a jak już wspominano wcześniej obie metody wymagają wciąż dalszego rozwoju.

Zakładane w ramach niniejszej pracy zastosowanie metody ugięć miało na celu wspomaganie interpretacji danych radarowych. Wydaje się, że przynajmniej na tym etapie rozwoju obu metod jest to założenie poprawne. W Załączniku 2 przedstawiono szczegółowe porównanie obu metod. Należy przy tym zaznaczyć, że interpretacja zarówno metodą ugięć jak i metodą radarową odbywała się niezależnie, bez znajomości danych z odwiertów kontrolnych, które wykonano w późniejszym etapie. Docelowo wyniki uzyskane metodą ugięć będą służyły jako element wspomagający w procesie oceny stanu połączeń metodą radarową.

Na tym etapie oceny porównawczej najbardziej zwracają uwagę dane uzyskane na odcinku E\_P (Rysunek 4.32). Na odcinku tym praktycznie na całej długości występuje brak połączenia warstw asfaltowych. Na stan taki wskazują zarówno dane z pomiarów radarowych, odwierty kontrolne jak i dane archiwalne. Tymczasem wyniki interpretacji metodą ugięć wykazały, że stan połączeń jest dobry i nie występuje tam zjawisko braku szczepności warstw asfaltowych.

sekcja A	sekcja B	sekcja C	sekcja D	sekcja E	sekcja F	sekcja G
	połączenie	e pełne				
	połączenie v	vątpliwe				
-						
	brak połą	zenia				
nie	zgodność interp	retacji				
0,000 0,004 0,008 0,012 0,016	0,020 0,024 0,028 0,032 0,036	0,046 0,044 0,048 0,052 0,056	0,060 0,064 0,068 0,072 0,076	0,080 0,084 0,088 0,092 0,096	0,100 0,104 0,108 0,112 0,116	0,120 0,124 0,128 0,132 0,136 0,136

Rysunek 4.26 Zgodność interpretacji metody ugięć i metody radarowej; odcinek A\_P

połączenie pełne		_	
połączenie wątpliwe			
brak połączenia			
niezgodność interpretacji			
37,400 37,420 37,440 37,440 37,480 37,540 37,540 37,550 37,550 37,560 37,650 37,650 37,650 37,650 37,650 37,650 37,650	37,740 37,740 37,780 37,800 37,800 37,840 37,840 37,840 37,840 37,840 37,800	37,920 37,940 37,960 37,980 38,020 38,020 38,020 38,040 38,040 38,080 38,080	38,120 38,140 38,140 38,160 38,200 38,220 38,240 38,240 38,260 38,280

Rysunek 4.27 Zgodność interpretacji metody ugięć i metody radarowej; odcinek B\_P, pas awaryjny

	połączenie pełne	
, r	oołączenie wątpliwe	-
	brak połączenia	-
37,400	37,440 37,440 37,520 37,520 37,520 37,520 37,520 37,520 37,540 38,5400 38,5400 38,5400 38,5400 38,5400 38,5400 38,5400 38,5400 3	38,300

Rysunek 4.28 Zgodność interpretacji metody ugięć i metody radarowej; odcinek B\_P, pas ruchu



Rysunek 4.29 Zgodność interpretacji metody ugięć i metody radarowej; odcinek C\_P, pas lewy



Rysunek 4.30 Zgodność interpretacji metody ugięć i metody radarowej; odcinek C\_P, pas prawy



Rysunek 4.31 Zgodność interpretacji metody ugięć i metody radarowej; odcinek D\_P



Rysunek 4.32 Zgodność interpretacji metody ugięć i metody radarowej; odcinek E\_P



Rysunek 4.33 Zgodność interpretacji metody ugięć i metody radarowej; odcinek F\_P

## 5 Podsumowanie

Obie metody, metoda ugięć i metoda radarowa, posiadają szereg ograniczeń, które powodują, że interpretacja uzyskiwanych danych jest trudna i obarczona błędami. Z drugiej strony obie metody posiadaj duży potencjał badawczy, który należy wykorzystać.

Technika georadarowa ma znaczące możliwości w identyfikacji odspojeń, jeśli są one rozległe i rozwinięte na tyle, że tworzą otwarte, połogie szczeliny o grubości rzędu pojedynczych milimetrów. Najpoważniejsze ograniczenie w skuteczności diagnostycznej bierze się z niestabilności kształtu sygnału anteny. Najbardziej obiecującym rozwiązaniem wydaje się obecnie metoda usuwania piku głównego, przy użyciu kolekcji sygnałów wzorcowych zbieranych bezpośrednio w trakcie pomiarów.

Badania pokazały potrzebę dalszego rozwoju metod zbierania sygnałów wzorcowych i numerycznego przetwarzania i interpretacji rejestrowanych sygnałów. Obecnie są to, jak się wydaje, jedyne sposoby poprawienia czytelności przekrojów strukturalnych, gdyż chwilowo nie obserwuje się ulepszeń w dziedzinie stabilności dostępnego sprzętu GPR.

Przedstawione wyniki badań przeprowadzonych w ramach niniejszego etapu wskazują na przydatność do oceny stanu połączenia warstw obu technik pomiarowych. Przyjęte w programie założenia dotyczące jednoczesnej, porównawczej analizy wyników badań uzyskiwanych obiema metodami wydają się być słuszne. Jak wykazano uzyskane we wstępnej fazie wyniki mogą być przydatne w ocenie stanu połączenia i tym samym być pomocne w precyzyjniejszej ocenie stanu konstrukcji nawierzchni.

W ramach Etapu II pracy przeprowadzono następujące prace:

 kontynuacja badań laboratoryjnych jakości rejestrowanych sygnałów odbitych,

- kontynuacja badań laboratoryjnych wzorów fal elektromagnetycznych i kontrastów międzywarstwowych,
- wykonanie pomiarów radarowych oraz pomiarów ugięciomierzem dynamicznym na wytypowanych odcinkach badawczych,
- dokonanie wstępnej analizy uzyskanych wyników badań pod kątem identyfikacji połączeń międzywarstwowych.

W następnym etapie pracy planuje się:

- ocenę możliwości przyjętej techniki diagnostycznej przez szczegółową analizę danych uzyskanych w warunkach terenowych,
- ocenę zastosowanej techniki diagnostycznej i jakości uzyskiwanych wyników pod kątem trwałości istniejących konstrukcji.

### **Bibliografia**

Jaskuła P Wpływ braku szczepności międzywarstwowej na wartość modułów sztywności warstw asfaltowych obliczonych na podstawie wyników ugięć z aparatu FWD, IV Miedzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Nowoczesne technologie w budownictwie drogowym. - Poznań : Fundacja na rzecz rozwoju Politechniki Poznańskiej, 2009. - pp. 103-112.

**Mechowski T [et al.]** Opracowanie metody oceny jakości połączenia warstw w konstrukcji nawierzchni za pomocą ugieciomierza dynamicznego FWD, Warszawa : IBDiM, Praca niepublikowana, wykonana na zlecenie GDDKiA, 2006.