INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW Zakład Diagnostyki Nawierzchni

## **SPRAWOZDANIE**

### z realizacji pracy pt.: "Ocena wpływu zagęszczenia warstwy asfaltowej na uzyskiwane wartości stałej dielektrycznej".

### SPRAWOZDNIE KOŃCOWE Etap II – zadania 2-6

## <u>Zleceniodawca: Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad</u> <u>Umowa nr 3102/2011 z dnia 18.11.2011 roku</u>

Opracowali: dr Lech Krysiński mgr inż. Jacek SUDYKA Kierownik Zakładu Diagnostyki Nawierzchni

mgr inż. Tomasz MECHOWSKI

wraz z zespołem Zakładu Diagnostyki Nawierzchni

Warszawa, listopad 2012

# Spis treści

1	Wstęp5
2	Teoretyczna analiza możliwości wykorzystania obliczonych wartości stałej
	dielektrycznej w ocenie jednorodności zagęszczenia warstwy asfaltowej7
2.1	Cechy elektryczne ośrodka8
2.2	Teoretyczna zależność między stałą dielektryczną a zagęszczeniem12
3	Laboratoryjna ocena dokładności stałej dielektrycznej obliczonej na
	podstawie pomiaru amplitudy fali elektromagnetycznej sygnału odbitego od
	badanej powierzchni 16
3.1	Refleksyjność nawierzchni drogowych17
3.2	Stabilność i precyzja pomiarów refleksyjności nawierzchni
4	Wykonanie pomiarów radarowych, pomiarów promieniowania
	podczerwonego oraz pobranie próbek nawierzchni wytypowanych odcinków
	badawczych
4.1	Pomiar refleksyjności na wybranym odcinku badawczym22
4.2	Pomiary nawierzchni w podczerwieni (IR)25
5	Laboratoryjna ocena podstawowych parametrów próbek warstw asfaltowych
	z odcinków badawczych
5.1	Skanowanie rozkładu przenikalności elektrycznej na powierzchni rdzenia
5.1.1	Charakterystyka rozkładu przenikalności elektrycznej obserwowanej na powierzchni bocznej
	rdzenia 3A
5.1.2	Charakterystyka rozkładu przenikalności elektrycznej obserwowanej na powierzchni bocznej
	rdzenia 12B31
5.1.3	Analiza map rozkładu przenikalności powierzchni bocznej rdzeni 3A i 12B
5.1.4	Analiza uśrednionego rozkładu głębokościowego przenikalności elektrycznej w warstwie
	ścieralnej rdzenia35
5.1.5	Wyznaczanie przenikalności powierzchniowej rdzeni
6	Ocena zależności między wynikami z badań laboratoryjnych a pomiarem
	zawartości wolnych przestrzeni przy pomocy techniki radarowej40
7	Podsumowanie
	Pibliografia A7

# Spis ilustracji

Rysunek 2.1 Odbicie i przenikanie fali: (a) TE i (b) TM8
Rysunek 2.2 Rodzaje polaryzacji: (a) elektryczna, (b) jonowa, (c) molekularna i (d)
międzyfazowa (Scaffer, i inni, 1995)10
Rysunek 2.3 Korelacja wyników uzyskanych z badań laboratoryjnych (oś x) oraz
pomiarami GPR (oś y) (Saarenketo, 2000)13
Rysunek 2.4 Pomiar radarowy zawartości wolnych przestrzeni na odcinku testowym.
Widoczne piki pochodzą od umieszczonych w nawierzchni czujników metalowych
(Saarenketo, 2000)
Rysunek 2.5 Zależność między zmianami wartości stałej dielektrycznej (oś x) a
zawartością wolnych przestrzeni (oś y) (Sebesta, i inni, 2002)14
Rysunek 2.6 Zmienność stałej dielektrycznej obliczonej dla próbek o równej grubości na
podstawie pomiaru antenami 1,5 GHz i 0,9 GHz (Ji-tong, i inni, 2012)14
Rysunek 2.7 Średni błąd obliczeń według modeli dla kilku mieszanek (Leng, i inni, 2011)16
Rysunek 3.1 Zestawienie dziewięciu przykładów ilustrujących zmienność refleksyjności
asfaltowych nawierzchni drogowych w Polsce18
Rysunek 3.2 Przykład nawierzchni (gęste skanowanie) o wysokiej jednorodności
warstwy ścieralnej uwidaczniającej się małą wariacją wygładzonych przebiegów
refleksyjności19
Rysunek 3.3 Wyniki testu na powtarzalność, poziom stabilności i rzeczywistą
rozdzielczość polowego pomiaru refleksyjności: pięciokrotne gęste skanowanie (50
skanów na metr, z uśrednieniem w oknie 0.5 m) wzdłuż jednego, dokładnie tego
samego profilu, przy kalibracji powtarzanej bezpośrednio przed każdym pomiarem20
Rysunek 3.4 Testy stabilności i rzeczywistej rozdzielczości polowego pomiaru
refleksyjności: kilkakrotne gęste skanowanie (500 skanów na metr, z uśrednieniem w
oknie 0.5 m) wzdłuż tego samego profilu, przy kalibracji powtarzanej bezpośrednio
przed każdym pomiarem21
Rysunek 4.1 Zestawienie echogramów georadarowych uzyskanych w wyniku pomiarów
wzdłuż czterech profili na każdej z dwóch jezdni badanego odcinka drogowego23
Rysunek 4.2 Rozkłady refleksyjności zmierzone wzdłuż czterech profili na każdej z
dwóch jezdni badanego odcinka drogowego24
Rysunek 4.3 Przykładowe zdjęcie pionowe IR miejsca poboru próbki 1A25
Rysunek 4.4 Przykład zdjęcia panoramicznego IR z odległości 10m od miejsca poboru
próbki 325
Rysunek 4.5 Przykład zdjęcia panoramicznego IR z odległości 10m od miejsca poboru
próbki 11 wraz ze zdjęciem cyfrowym26
Rysunek 5.1 Perkometr z sondą dedykowaną do pomiaru próbek o średnicy 10 cm27
Rysunek 5.2 Skanowanie powierzchni bocznej próbki przy pomocy perkometru28
Rysunek 5.3 Wyniki mapowania przenikalności na powierzchni rdzenia CO3A (po
prawej), zestawione z panoramiczną fotografią jego powierzchni (pośrodku) oraz z
wykresem uśrednionego głębokościowego rozkładu przenikalności (po lewej). Skale
pionowe podają głębokość w centymetrach, zaś skala pozioma mapy to dystans

katowy mierzony po obwodzie, a skala pozioma lewego wykresu oraz legendy barw po Rysunek 5.4 Wyniki mapowania przenikalności na powierzchni rdzenia C12B (po prawej), zestawione z panoramiczną fotografią jego powierzchni (pośrodku) oraz z wykresem uśrednionego głębokościowego rozkładu przenikalności (po lewej). Skale pionowe podają głębokość w centymetrach, zaś skala pozioma mapy to dystans kątowy mierzony po obwodzie, a skala pozioma lewego wykresu oraz legendy barw po prawej, to przenikalność uśredniona po obwodzie......32 Rysunek 5.5 Wyniki skanowania górnych części wybranych rdzeni. Uśrednione rozkłady głębokościowe przenikalności (przerywane krzywe czarne) pokazane zostały na tle ośmiu pomiarów profilowych (krzywe szare) na bocznej powierzchni każdego rdzenia. Średni rozkład pomierzonej przenikalności został wymodelowany (krzywe zielone) w celu lepszego zilustrowania rozkładu rzeczywistego (linie fioletowe) wykazującego obecność progu w górnej części warstwy ścieralnej, na głębokości rzędu kilku milimetrów do jednego centymetra......38 Rysunek 5.6 Przykład modelu zakładającego stałą podatność w warstwie ścieralnej. .....39 Rysunek 5.7 Porównanie korelacyjne średniej przenikalności mierzonej w połowie warstwy ścieralnej ze średnią wartością górnej cztero-centymetrowej warstwy rdzenia Rysunek 6.1 Próba korelacji zawartości pustek w warstwie ścieralnej z przenikalnością mierzoną w połowie warstwy......41 Rysunek 6.2 Próba korelacji gęstości materiału kruszywa w warstwie ścieralnej z przenikalnością mierzoną w połowie warstwy (rysunek lewy) i z przenikalnością oszacowaną przez modelowanie górnych czterech centymetrów rdzenia......41 Rysunek 6.3 Współzależność przenikalności oszacowanej za pomocą amplitudy rozpraszania z zawartością pustek i gęstością materiału kruszywa w warstwie ścieralnej......43 Rysunek 7.1 Współzależność przenikalności oszacowanej za pomocą amplitudy rozpraszania z zawartością pustek i gęstością materiału kruszywa w warstwie ścieralnej......45

#### **Spis tabel**

Tabela 2.1 Typowe wartości stałej dielektrycznej, przewodności, prędkość fali	i tłumienia
wybranych materiałów geologicznych (Moorman, 2001)(Morey, 1998)	11
Tabela 5.1 Zestawienie charakterystycznych amplitud znaczących anomalii przenika	alności oraz
ich charakterystycznych wymiarów poziomych i pionowych, jakie odnotowano przy a	nalizie map
powierzchni bocznej rdzeni C03 i C12B	34

#### 1 Wstęp

Dobór materiałów, projektowanie składu, produkcja i wbudowanie mieszanek mineralno-asfaltowych jest procesem bardzo złożonym i skomplikowanym. O końcowym sukcesie, czyli uzyskaniu nawierzchni spełniającej postawione wymagania techniczne, trwałej, bezpiecznej i komfortowej dla użytkownika decyduje każdy element tego procesu. Jednym z najważniejszych parametrów wykonanej nawierzchni, który ma wpływ na jej trwałość, odporność na uszkodzenia, bezpieczeństwo i walory eksploatacyjne jest zagęszczenie warstwy.

Niedogęszczenie nawierzchni skutkuje mniejszą odpornością na działanie wody i mrozu, na skutek możliwości penetracji i zalegania wody w nawierzchni oraz mniejszej wytrzymałości na rozciąganie w niskich temperaturach. Zbyt niski wskaźnik zagęszczenia to również ryzyko powstania trwałych deformacji plastycznych w warstwach asfaltowych, tzw. kolein. W takim przypadku oprócz mniejszej odporności na siły ścinające powodujące powstawanie kolein również może zajść zjawisko dogęszczenia nawierzchni pod ruchem pojazdów.

Zagęszczenie nawierzchni ma również duży wpływ na jej trwałość zmęczeniową. Zwiększenie zawartości wolnych przestrzeni powoduje znaczne obniżenie trwałości zmęczeniowej. Przy zawartości wolnych przestrzeni większej o 1% v/v, trwałość zmęczeniowa w zależności od mieszanki i konstrukcji może zmniejszyć się o kilkadziesiąt lub nawet kilkaset tysięcy osi obliczeniowych, co w praktyce skraca okres trwałości o nawet kilka lat. Bardzo ważnym czynnikiem, który praktycznie jest bardzo trudny do sprawdzenia w konwencjonalny sposób jest jednorodność zagęszczenia. Lokalne występowanie miejsc o mniejszym zagęszczeniu potencjalnie może powodować powstanie lokalnych uszkodzeń (spękań, deformacji), które obniżają komfort jazdy i zagrażają bezpieczeństwu użytkowników.

Badanie zagęszczenia jest badaniem kontrolnym, które wykonywane jest poprzez odniesienie gęstości objętościowej próbki odwierconej z danej warstwy do gęstości objętościowej wyprodukowanej mieszanki mineralno-asfaltowej. Miarą zagęszczenia jest wskaźnik zagęszczenia. Oprócz badań odwiertów znane są jeszcze inne metody do oceny zagęszczenia, jak np. metody nieniszczące NDT (Non-Destructive Testing) z użyciem nuklearnego miernika gęstości (Burati, i inni, 1987) czy metoda energii rozproszonej stosunkowo nowa metoda polegająca na pomiarze elektrycznej oporności pozornej nawierzchni i odniesieniu jej do gęstości (Apkarian, i inni, 1997). Pierwsza z wymienionych metod dostarcza wprawdzie dane o gęstości, ale jej stosowanie związane jest z kilkoma utrudnieniami: specjalne pozwolenia i zasady przechowywania materiałów radioaktywnych, właściwa kalibracja i odpowiednio długi kontakt z nawierzchnią. Metoda energii rozproszonej jest stosunkowo nowa i wymaga udoskonaleń.

Szybki rozwój technologiczny sprawia, że coraz częściej podejmowane są próby wdrażania coraz to nowych technik nieniszczących, umożliwiających bezpośrednią lub pośrednią ocenę jednorodności zagęszczenia nawierzchni. Jednym z rozwiązań jest technika radarowa (GPR - Ground Penetrating Radar), dzięki której możliwy jest pomiar

stałej dielektrycznej przypowierzchniowej części warstwy nawierzchni. Technika radarowa daje możliwość pośredniej oceny jednorodności zagęszczenia dzięki rejestracji stałej dielektrycznej, zmieniającej się w zależności od zawartości powietrza w badanej warstwie (Saarenketo, i inni, 2000), (Silvast, 2001), (Al-Qadi, i inni, 2010). W idealnych warunkach powinno to pozwolić na rejestrację zmian w dowolnie wybranym przekroju nawierzchni. Niestety, tak jak i w innych obserwacjach z użyciem GPR tak i tu znaczącą rolę odgrywają warunki lokalne. Jak podają między innymi (Sculion, i inni, 1995) (Sculion, 2006) (Colagrande, i inni, 2009) oraz (Benedetto, i inni, 2009) w ocenie jednorodności zagęszczenia, ale też w radarowej identyfikacji rozwarstwień, ubytków powierzchniowych i spękań lokalne zawilgocenia nawierzchni znacznie wpływają na końcowy wynik pomiaru. Jak podają autorzy tych prac wyniki przeprowadzonych badań należy traktować jako wstępne i wymagające ciągłego rozwoju.

Celem pracy jest ocena wpływu zagęszczenia wierzchniej warstwy asfaltowej na uzyskiwane dane z badań radarowych. Ocena ta zostanie dokonana poprzez porównanie wyników badań laboratoryjnych zawartości wolnych przestrzeni z wartościami stałych dielektrycznych, obliczonymi na podstawie badań terenowych i laboratoryjnych GPR. Połączenie laboratoryjnych technik weryfikacji zagęszczenia nawierzchni z metodami pomiaru stałej dielektrycznej pozwoliłoby na szacowanie jednorodności całej powierzchni nawierzchni, a nie tylko losowo wybranych punktów. Ustalenie zależności pomiędzy tymi parametrami pozwoliłoby na szybką i skuteczną ocenę jednorodności zagęszczenia wierzchnich warstw asfaltowych.

### 2 Teoretyczna analiza możliwości wykorzystania obliczonych wartości stałej dielektrycznej w ocenie jednorodności zagęszczenia warstwy asfaltowej

Pomiar zawartości wolnych przestrzeni przy użyciu techniki radarowej opiera się na pomiarze wartości dielektrycznych nawierzchni. Rejestrowane wartości dielektryczne zależą od dielektrycznych własności składników, których każdy (powietrze, asfalt i kruszywo) ma własne charakterystyczne cechy dielektryczne (Raju, 2003). Wzrost zagęszczania mieszanki mineralno asfaltowej zmniejsza udział składnika, w tym wypadku powietrza, o niskich wartościach dielektrycznych i zwiększa objętościowe proporcje lepiszcza i kruszywa, co powoduje zmniejszenie się prędkości przejścia fali elektromagnetycznej w warstwie i tym samym wzrost rejestrowanych wartości stałej dielektrycznej. W przypadku niedogęszczenia mamy sytuację odwrotną, w której powietrze stanowi znaczny udział w mieszance, powodując wzrost prędkości przenikającej fali i tym samym obniżenie wartości rejestrowanych stałych.

Do określenia wartości dielektrycznych nawierzchni przy użyciu techniki radarowej wykorzystuje się teoretyczne zależności pomiędzy amplitudami sygnału odbitego od badanej powierzchni i fali elektromagnetycznej odbitej od powierzchni w pełni refleksyjnej (płyta metalowa). Obliczany na tej podstawie tak zwany wspołczynnik odbicia poprzedza analiza prostego przypadek odbicia i refrakcji (załamania) fali na granicy dwóch materiałów o różnych właściwościach. Przypadek taki przedstawiono na Rysunku 2.1. Płaszczyznę padania fali elektromagnetycznej (EM) tworzy normalna do powierzchni płaskiej i fala padająca. Poprzeczna fala elektryczna (TE), nazywana falą o polaryzacji prostopadłej, reprezentuje falę, której wektor pola elektrycznego skierowany jest prostopadle do płaszczyzny padania, natomiast wektor pola elektrycznego poprzecznej fali magnetycznej (TM) skierowany jest równolegle do płaszczyzny padania i nosi nazwę fali o polaryzacji równoległej. Spełniając warunki brzegowe równania Maxwella na powierzchni padania można wyznaczyć współczynnik odbicia fali padającej:

współczynnik odbicia fali TE

$$\gamma_{\perp} = \frac{Z_2 \cos\theta_i - Z_1 \cos\theta_i}{Z_2 \cos\theta_i + Z_1 \cos\theta_i}$$
(2.1)

współczynnik odbicia fali TM

$$\gamma_{\parallel} = \frac{Z_2 cos \theta_t - Z_1 cos \theta_i}{Z_2 cos \theta_t + Z_1 cos \theta_i}$$
(2.2)

gdzie:

 $Z_{\rm 1}$  i  $Z_{\rm 2}$  - odpowiednio impedancja fali w ośrodku 1 i 2,

 $\theta_i$  i  $\theta_t$  - odpowiednio kąt padania i załamania



Rysunek 2.1 Odbicie i przenikanie fali: (a) TE i (b) TM

Ponieważ większość anten stosowanych w technice radarowej jest liniowo i horyzontalnie spolaryzowanych (TE) należy rozważyć jeszcze jeden przypadek gdy płaska fala elektromagnetyczna pada na płaszczyznę pod kątem prostym ( $\theta_i = \theta_i = 0^\circ$ ). W takim przypadku współczynnik odbicia fali będzie następujący:

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\varepsilon_{r2}}}$$
(2.3)

Z powyższego wynika, że współczynnik odbicia zależy od stałych dielektrycznych ośrodków, przez które propaguje fala. Jeżeli ośrodek 2 ma wyższą stałą dielektryczną od ośrodka 1, to współczynnik odbicia *r* będzie liczbą ujemną, co oznacza odwrotną polaryzację fali. Im wyższa bezwzględna wartość współczynnika odbicia tym silniejsze obicie od granicy między ośrodkami, większy kontrast między nimi i tym łatwiejsza identyfikacja ośrodków. Przedstawiona zależność jest najważniejszym równaniem stosowanym w interpretacji danych z pomiarów infrastruktury drogowej techniką radarową.

#### 2.1 Cechy elektryczne ośrodka

Ważnym elementem w procesie rozpoznania teoretycznych możliwości techniki radarowej w ocenie jednorodności zagęszczenia jest zrozumienie charakteru badanego ośrodka i jego "reakcji" na przenikającą przez ten ośrodek falę elektromagnetyczną generowaną w procesie pomiaru GPR.

Cechy elektryczne ośrodka są charakteryzowane przez przenikalność elektryczną  $\varepsilon$ , podatność magnetyczna  $\mu$  i przewodność (konduktywność)  $\sigma$ . Wielkości te mogą być tensorami zależnymi od kierunku w przestrzeni, a także poosiadać wartości zespolone ze względu na różne mechanizmy strat. Na potrzeby techniki radarowej można przyjąć, że są to wielkości skalarne, które są współczynnikami w tzw. równaniach materiałowych:

$$\vec{D} = \varepsilon * \vec{E} \tag{2.4}$$

$$\vec{B} = \mu * \vec{H} \tag{2.5}$$

$$\vec{I} = \sigma * \vec{E} \tag{2.6}$$

gdzie:

 $\vec{D}$  - wektor indukcji elektrycznej,

 $\vec{E}$  - wektor natężenia pola elektromagnetycznego,

 $\vec{B}$  - wektor indukcji magnetycznej,

 $\vec{H}$  - wektor natężenia pola magnetycznego,

- $\vec{J}$  gęstość prądu elektrycznego,
- ε przenikalność elektryczna,
- $\mu$  podatność magnetyczna,
- $\sigma$  przewodność.

Dla ośrodka określa się również względną przenikalność elektryczną  $\varepsilon_r$  i względną podatność magnetyczną  $\mu_r$ :

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{2.7}$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \tag{2.8}$$

gdzie:

 $\varepsilon = \varepsilon_r - j\varepsilon_r$ " - przenikalność elektryczna

 $\varepsilon_0$  - przenikalność elektryczna próżni (8, 854187817  $\cdot 10^{-12}$  F/m<sup>1</sup>)

 $\varepsilon_r$  - część rzeczywista (definiuje właściwości ośrodka),

 $\varepsilon_r^{"}$  - część urojona (odpowiada za straty w ośrodku),

 $\mu_0$  - podatność magnetyczna próżni (1.26·10<sup>-6</sup> H/m).

Najważniejszą właściwością elektryczną wpływającą na wyniki badań techniką radarową jest przenikalność elektryczna i związana z nią prędkość fali w ośrodku. Jest też ważna ze względu na precyzyjne określenie sposobu obliczenia poprawnej stałej dielektrycznej. Względna przenikalność elektryczna (nazywana również stałą dielektryczną) jest liczbą zespoloną i wyraża zgodnie z wzorem 2.7 stosunek przenikalności elektrycznej do przenikalności elektrycznej w próżni.

Podatność magnetyczna gruntu lub materiałów występujących w warstwach nawierzchni drogowych uważa się za równą podatności w próżni ( $\mu_r = 1$ ) i dlatego nie ma ona wpływu na propagację fali w tego rodzaju ośrodkach. Tym nie mniej znane są badania, miedzy innymi (Olhoeft, i inni, 1994), dowodzące przypadki, w których podatność magnetyczna wpływa na elektryczne właściwości gruntów.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Według International Council for Science: Committee on Data for Science and Technology, http://www.codata.org/

Przewodność elektryczna w ośrodkach takich jak grunty powoduje ruch nośników ładunków z wolnym lub ograniczonym przemieszczeniem, które może być powodowane przez rożne zjawiska. Większość jonowo lub kowalencyjnie<sup>2</sup> związanych skał formułujących minerały, takich jak kwarc lub mika, nie są przewodnikami. W momencie zetknięcia z wodą tworzą się na ich powierzchni elektrolity zdolne do przewodzenia prądu elektrycznego poprzez ruch wolnych jonów, generowany przez pole elektryczne. Ruch jonów jest proporcjonalny do wielkości pola elektrycznego i zależy od temperatury, koncentracji jonów i ich wielkości. Przewodność elektryczna ośrodka wpływa na tłumienie fali elektromagnetycznej i w pewnym zakresie na jej odbicie.

Polaryzacja jest to zjawisko nierównomiernego rozkładu cząstek ładunku elektrycznego na atomach połączonych wiązaniem chemicznym. W materiałach znajdujących się w polu elektrycznym mamy do czynienie z tzw. polaryzacją wymuszoną. Ma ona miejsce w sytuacji gdy na cząsteczkę działa silne pole elektryczne i cząsteczka znajduje się w otoczeniu innych silnie polarnych cząsteczek lub wiązanie zostało wzbudzone promieniowaniem elektromagnetycznym, którego działanie nie spowodowało jego rozerwania. Istnieją cztery różne mechanizmy polaryzacji, które przedstawiono na Rysunku 2.2.

Dla ośrodków takich jak skały definiuje się również oporność właściwą jako odwrotność przewodności:



Rysunek 2.2 Rodzaje polaryzacji: (a) elektryczna, (b) jonowa, (c) molekularna i (d) międzyfazowa (Scaffer, i inni, 1995)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Wiązanie kowalencyjne to rodzaj wiązania chemicznego, którego istotą jest istnienie pary elektronów, współdzielonych w porównywalnym stopniu przez oba atomy tworzące to wiązanie.

Parametry, które należy dodatkowo zdefiniować to impedancja falowa ośrodka, określana jako stosunek składowych wektorów pól elektrycznego i magnetycznego prostopadłych do siebie i do kierunku propagacji fali oraz stratność ośrodka, definiowana jako stosunek prądu przewodzenia związanego z ruchem ładunków do prądu przesunięcia związanego ze zmianą indukcji w czasie (Morawski, i inni, 1985). Na podstawie analizy tych parametrów przeprowadzonej przez (Karczewski, 2007) można określić dwie, istotnie z punktu widzenia zastosowania techniki radarowej w drogownictwie, cechy tj. współczynnik tłumienia fali oraz impedancja ośrodka małostratnego (takiego jak np. piaski , żwiry). Współczynnik tłumienia fali jest wprost proporcjonalny do przewodności natomiast impedancja ośrodka małostratnego zależy jedynie od stałej dielektrycznej ośrodka.

Tłumienie fali elektromagnetycznej jest zjawiskiem istotnym dla zakresu penetracji głębokościowej metody radarowej. Im większe tłumienie tym mniejsza głębokość pomiaru i odwrotnie, mniejsze tłumienie ośrodka pozwala uzyskać lepszą penetrację. Jak podaje między innymi (A-CUBED, 1983) największy wpływ na tłumienie mają przewodność i stała dielektryczna ośrodka, które z kolei zależą od jego składu mineralnego, porowatości, wilgotności, składu chemicznego, temperatury i częstotliwości fali emitowanej w głąb ośrodka. W Tabeli 2.1 przedstawiono typowe wartości stałych dielektrycznych, przewodności, prędkości fali i współczynników tłumienia wybranych materiałów.

ośrodek	stała dielektryczna ε <sub>r</sub>	przewodność <del>σ</del> [mS/m]	prędkość fali v [cm/ns]	tłumienie α [dB/m]
powietrze	1	0	30	0
woda destylowana	80	0,01	3,3	0,002
słodka woda	80	0,5	3,3	0,1
słona woda	80	30000	1	1000
lód	3-4	0,01	16	0,01
suchy piasek	3-5	0,01	15	0,01
piasek nasycony wodą	20-30	0,1-1	6	0,03-0,3
glina	5-40	2-1000	6	1-300
wapień	4-8	0,5-2	12	0,4-1,0
muł	5-30	1-100	7	1-100
asfalt	2,5-3,5	0,5-1,5	16-19	0,05-0,5
beton	3-9	1-3	10-17	0,5-1,5
granit	4-6	0,01-1	13	0,1-1
łupek	5-15	1-100	9	1-100

Tabela 2.1 Typowe wartości stałej dielektrycznej, przewodności, prędkość fali i tłumienia wybranych materiałów geologicznych (Moorman, 2001)(Morey, 1998)

Bardzo ważnym parametrem jest prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w ośrodku małostratnym. Dzięki zdefiniowaniu tego parametru możliwe jest określenie prędkości fali w ośrodku przy znanej stałej dielektrycznej ośrodka. Korzystając z definicji prędkości fazowej:

$$v_f = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega}{\beta} (\sigma \ll \omega \cdot \varepsilon)$$
(2.10)

gdzie:

 $\omega$  - częstotliwość kątowa (pulsacja), k - liczba falowa,  $\beta$  - współczynnik fazy,

i zależności prędkości fali elektromagnetycznej w próżni c:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \, m/s \tag{2.11}$$

otrzymujemy następujący wzór:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$
(2.12)

gdy:

 $\mu_r = 1$ .

#### 2.2 Teoretyczna zależność między stałą dielektryczną a zagęszczeniem

Jak wcześniej wspomniano w literaturze światowej podawane są zależności między wynikami pomiaru radarowego, a danymi z badań laboratoryjnych zagęszczenia nawierzchni. Opracowania teoretyczne, poparte ograniczonymi badaniami laboratoryjnymi przedstawiono między innymi przez (Saarenketo, i inni, 2000), (Ji-tong, i inni, 2012), (Colagrande, i inni, 2009) i (Sculion, 2006).

Między innymi (Saarenketo, 2000) przedstawia zależność między stalą dielektryczną, a zawartością wolnych przestrzeni w warstwie przypowierzchniowej. Zależność ta przedstawia się następująco:

$$y = 272,93e^{-1,3012k\epsilon_x}$$
, przy 1

w którym: k – współczynnik kalibracyjny,  $\varepsilon_x$  – zmierzona stała dielektryczna

Przedstawiono również wyniki wstępnych badań terenowych i laboratoryjnych, które potwierdziły wysoką jakość danych obliczonych na podstawie pomiarów GPR (Rysunki 2.3 i 2.4).



Rysunek 2.3 Korelacja wyników uzyskanych z badań laboratoryjnych (oś x) oraz pomiarami GPR (oś y) (Saarenketo, 2000)





Z kolei w pracy (Sebesta, i inni, 2002) przedstawiono zależność (2.14) (Rysunek 2.5) między zawartością wolnych przestrzeni, a zmianami wartości stałej dielektrycznej uzyskanych na podstawie pomiaru anteną typu horn o częstotliwości 1GHz.

$$f_a = -3,814\varepsilon_{acm} \tag{2.14}$$

w którym:  $f_a$  objętościowy wskaźnik powietrza,  $\varepsilon_{acm}$  stała dielektryczna mieszanki mineralno asfaltowej.

Jednocześnie autorzy opracowania stwierdzają, że lepszą teoretycznie jakość danych można uzyskać stosując anteny o wyższej częstotliwości no 2 GHz.



Rysunek 2.5 Zależność między zmianami wartości stałej dielektrycznej (oś x) a zawartością wolnych przestrzeni (oś y) (Sebesta, i inni, 2002)

Model stałej dielektrycznej może być opisany również w sposób liniowy jak między innymi w pracy (Ji-tong, i inni, 2012), gdzie stała dielektryczna opisana została wzorem:

$$\varepsilon_{\rm m} = 1,2(\varepsilon_{\rm a}f_{\rm a} + \varepsilon_{\rm ac}f_{\rm ac} + \varepsilon_{\rm s}f_{\rm s}) - 0,5573 \tag{2.15}$$

w którym:  $\varepsilon_m$  stała dielektryczna mieszanki,  $\varepsilon_a$  stała dielektryczna powietrza,  $\varepsilon_{ac}$  stała dielektryczna asfaltu,  $\varepsilon_s$  stała dielektryczna kruszywa,  $f_a$  objętościowy wskaźnik powietrza,  $f_{ac}$  objętościowy wskaźnik asfaltu,  $f_s$  objętościowy wskaźnik kruszywa.

Zależność tą oparto na badaniach laboratoryjnych próbek mieszanek mineralno asfaltowych, natomiast nie potwierdzono jej w badaniach terenowych. Niemniej autorzy niniejszej pracy dochodzą do innych istotnych wniosków mających wpływ na jej zastosowanie w praktyce drogowej. Jak przedstawiono to na Rysunku 2.6 obliczona stała dielektryczna zależy zarówno od grubości warstwy asfaltowej oraz od częstotliwości anteny zastosowanej podczas pomiaru. Te dwa czynniki poważnie wpływają na końcowy wynik pomiaru i należy je uwzględnić w obliczeniach stałej na podstawie badań terenowych.



Rysunek 2.6 Zmienność stałej dielektrycznej obliczonej dla próbek o równej grubości na podstawie pomiaru antenami 1,5 GHz i 0,9 GHz (Ji-tong, i inni, 2012)

W podejmowanych próbach oceny jednorodności wykonania nawierzchni należy też odnotować próby użycia georadaru do mierzenia gęstości mieszanek asfaltowych. Pierwsze próby podjęto w latach dziewięćdziesiątych, lecz stosowanie w praktyce jest nadal ograniczone. Jedną z takich prób jest opracowany przez Lytona (Lytton, 1995) program komputerowy do ustalania gęstości poszczególnych warstw i zawartości wody w tych warstwach w systemie wielowarstwowym przy użyciu konwencjonalnego georadaru. Poprzez wielokrotne powtarzanie procesu program ten oblicza stężenia cieczy i gazów w badanym obszarze w celu uzyskania informacji przydatnych w budowie i naprawie dróg. Bliższe dane techniczne tego opatentowanego programu są zastrzeżone. Innym rozwiązaniem są opracowane w pracy (Al-Qadi, i inni, 2010) trzy modele gęstości oparte na pozornym ciężarze właściwym i stałej dielektrycznej mieszanki asfaltowej zgodnie z teorią Lichteneckera (Lichtenecker, i inni, 1931). Te modele gęstości zostały opracowane poprzez odniesienie relacji masa-objętość mieszanki asfaltowej do modeli stałej dielektrycznej mieszanin, które wiążą tą stałą z właściwościami dielektrycznymi i objętościowymi składników mieszanki asfaltowej (Sihvola, 1989). Jak widać w równaniach (2.16-2.18) modele gęstości zostały opracowano na podstawie trzech modeli stałej dielektrycznej mieszanin, a mianowicie: na kompleksowym modelu współczynnika załamania (CRIM), modelu Rayleigha i modelu Bottchera.

$$G_{\rm mb} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{\rm ac}} - 1}{(P_{\rm b}/G_{\rm b})\sqrt{\varepsilon_{\rm b}} + ((1 - P_{\rm b})/G_{\rm sb})\sqrt{\varepsilon_{\rm s}} - (1/G_{\rm mm})}$$
(2.16)

$$G_{\rm mb} = \frac{(\epsilon_{\rm AC} - \epsilon_{\rm b})/(\epsilon_{\rm AC} + 2\epsilon_{\rm b}) - (1 - \epsilon_{\rm b})/(1 + 2\epsilon_{\rm b})}{(\epsilon_{\rm s} - \epsilon_{\rm b})/(\epsilon_{\rm s} + 2\epsilon_{\rm b})(1 - P_{\rm b})/G_{\rm sb} - (1 - \epsilon_{\rm b})/(1 + 2\epsilon_{\rm b})(1/G_{\rm mm})}$$
(2.17)

$$G_{\rm mb} = \frac{(\varepsilon_{\rm AC} - \varepsilon_{\rm b})/(3\varepsilon_{\rm AC}) - (1 - \varepsilon_{\rm b})/(1 + 2\varepsilon_{\rm AC})}{(\varepsilon_{\rm s} - \varepsilon_{\rm b})/(\varepsilon_{\rm s} + 2\varepsilon_{\rm AC})(1 - P_{\rm b})/G_{\rm sb} - (1 - \varepsilon_{\rm b})/(1 + 2\varepsilon_{\rm b})(1/G_{\rm mm})}$$
(2.17)

w których G<sub>mb</sub> – to pozorny ciężar właściwy mieszanki asfaltowej, G<sub>mm</sub> – maksymalny ciężar właściwy mieszanki asfaltowej, G<sub>sb</sub> – pozorny ciężar właściwy kruszywa, P<sub>b</sub> – zawartość lepiszcza, G<sub>b</sub> – ciężar właściwy lepiszcza,  $\epsilon_{AC}$  – stała dielektryczna mieszanki asfaltowej,  $\epsilon_{b}$  – stała dielektryczna lepiszcza, zaś  $\epsilon_{s}$  – stała dielektryczna kruszywa.

Należy zauważyć, że w tych równaniach ciężar właściwy materiału jest równy gęstości materiału podzielonej przez gęstość wody przy 4 °C (1 g/cm<sup>3</sup>), a zatem jest liczbowo taki sam, jak gęstość materiału w g/cm<sup>3</sup>. W eksperymencie przeprowadzonym przez (Leng, i inni, 2011) ciężar właściwy został wykorzystywany do opisania gęstości materiału, ponieważ ten wskaźnik jest najczęściej stosowany w budownictwie drogowym. W celu ustalenia skuteczności poszczególnych modeli w przypadku konkretnych mieszanek, obliczono średnie błędy dla każdego modelu (Rysunek 2.7). Zmodyfikowany model Bottchera (model ALL) umożliwił uzyskanie najniższego błędu dla wszystkich mieszanek poza mieszanką I i spośród trzech modeli gęstości ocenianych w badaniu wykazał najlepszą skuteczność.



Rysunek 2.7 Średni błąd obliczeń według modeli dla kilku mieszanek (Leng, i inni, 2011)

### 3 Laboratoryjna ocena dokładności stałej dielektrycznej obliczonej na podstawie pomiaru amplitudy fali elektromagnetycznej sygnału odbitego od badanej powierzchni

Pomiar refleksyjności jest jednym z podstawowych pomiarów towarzyszących badaniom georadarowym nawierzchni drogowych. Pomiar ten jest zadaniem o tyle dobrze zdefiniowanym, o ile powierzchnia drogi jest płaska, a do pomiaru używane są wysoko-częstościowe (kilku-gigahercowe) anteny wiszące. Mierzona wtedy amplituda refleksu powierzchniowego daje interesujące oszacowanie współczynnika odbicia materiału, z którego zbudowana jest nawierzchnia. Oszacowanie to (relatywna amplituda odbicia) jest nazywane tutaj refleksyjnością amplitudową ze względu na złożoności interpretacyjne nie pozwalające na utożsamienie tego pojęcia ze współczynnikiem odbicia. Sam współczynnik odbicia jest zdefiniowany w sposób poprawny jedynie w przypadku materiałów jednorodnych, a jego pomiar odpowiada nie do końca realistycznej sytuacji fali płaskiej padającej na nieskończoną, płaską powierzchnię rozdziału dwóch ośrodków. W przypadku pomiaru georadarowego naruszone są poważnie wszystkie te założenia, co prowadzi do skutków w widoczny sposób odzwierciedlających się w wynikach i powodujących istotne złożoności interpretacyjne. Najistotniejszym czynnikiem jest tutaj niejednorodność badanego ośrodka związana z jego granulacją i wybujałą zmiennością materiałową, które to zjawiska znajdują się centrum referowanych tutaj wysiłków badawczych. Pośród innych niemniej istotnych zjawisk utrudniających interpretowanie refleksyjności jako własności materiałowej ośrodka należy wyliczyć: niestabilności systemu pomiarowego, niepłaskość fali używanej do pomiaru i idące w ślad za nią komplikacje zjawiska odbicia oraz nierówności badanej powierzchni w bezpośrednim sąsiedztwie pojedynczego pomiaru.

Sam współczynnik odbicia r jest wiązany z przenikalnością elektryczną ośrodka  $\varepsilon = [(1-r)/(1+r)]^2$ , jednak przeliczenie to zakłada brak istotnej polaryzacji magnetycznej oraz

brak przewodnictwa elektrycznego (lub inaczej mówiąc brak urojonej części przenikalności). Założenia te w przypadku typowych materiałów drogowych są spełnione na tyle dobrze, że można używać wzajemnego przeliczania obu wielkości w zadaniach praktycznych. Znaczenie tych wielkości (r,  $\varepsilon$ ) w pomiarach georadarowych leży w tym, że wiążą się one (przy opisanych założeniach) z prędkością falową  $v = c_0/\varepsilon^{1/2}$  ośrodka, która umożliwia przeliczanie czasu przejścia fali na grubości warstw, przy określaniu głębokości horyzontów refleksyjnych.

#### 3.1 Refleksyjność nawierzchni drogowych

Przenikalność elektryczna wyrażana współczynnikiem odbicia jest charakterystyką materiałową ośrodka. W przypadku ośrodków o budowie ziarnistej wyliczanie przenikalności na podstawie przenikalności składników budujących ziarna jest zadaniem bardzo skomplikowanym. W przypadku fal o wysokiej częstotliwości pojawia się dodatkowa trudność związana z bezpośrednim uwidacznianiem się granulacji przez dyfrakcyjną deformację kształtu fali. Można wtedy mówić o pewnej efektywnej wartości przenikalności lub współczynnika odbicia, jaka jest właściwa w sensie statystycznym danemu typowi pomiaru. W podobny sposób jest rozumiana refleksyjność nawierzchni określana w pomiarach drogowych. Wartość refleksyjności (lub przenikalności) mieszanki mineralno-asfaltowej zależy przede wszystkim o rodzaju użytego kruszywa. W drugiej kolejności wpływ mają: typ lepiszcza, własności granulometryczne frakcji skalnej, zawartość wolnych przestrzeni oraz ewentualne obecność wody w tychże wolnych przestrzeniach.

Wartości refleksyjności jakie obserwujemy na drogach w Polsce mieszczą się w przedziale od 0.37 do 0.51, co odpowiada efektywnej przenikalności pomiędzy 4.73, a 9.5 w warstwie ścieralnej (Rysunek 3.1). Pomiary terenowe charakteryzują się dużym zaszumieniem w związku z czym wymagają intensywnego uśredniania i dopiero te średnie mogą być podstawą interpretacji materiałowych. Nawet po uśrednianiu wyniki mają znaczną niepewność, ale nagła zmiana średniej refleksyjności o wartości powyżej 0.01 dokonująca się na pewnym dystansie profilu, potwierdzona kolejnym pomiarem, jest już wyraźnym wskazaniem zmiany materiałowej (Rysunek 3.2).

W szczególności po intensywnym uśrednieniu wyników z wielokrotnych przejazdów można uzyskać stabilny obraz lokalnej zmienności materiałowej warstwy ścieralnej (Rysunek 3.2).



Rysunek 3.1 Zestawienie dziewięciu przykładów ilustrujących zmienność refleksyjności asfaltowych nawierzchni drogowych w Polsce



Rysunek 3.2 Przykład nawierzchni (gęste skanowanie) o wysokiej jednorodności warstwy ścieralnej uwidaczniającej się małą wariacją wygładzonych przebiegów refleksyjności

#### 3.2 Stabilność i precyzja pomiarów refleksyjności nawierzchni

Przed jakimikolwiek interpretacjami terenowymi niezbędne jest wykonanie testów stabilności i precyzji danego sprzętu w warunkach terenowych. Metoda oceny jednorodności materiału nawierzchni poprzez pomiar refleksyjności odnosi się w zasadzie wyłącznie do materiału powierzchniowego, czyli do warstwy ścieralnej, co wymaga zastosowania do inspekcji anteny o częstotliwości centralnej 2 GHz lub nieco więcej. Refleks powierzchniowy jest wtedy oddzielony czasowo od refleksu horyzontu między warstwą ścieralną, a wiążącą. Unika się wtedy zaburzania kształtu refleksu powierzchniowego i poważnego przekłamania oszacowania wartości jego amplitudy, bowiem metody rozdzielania obu refleksów są obecnie jeszcze mało rozwinięte, gdyż rzeczywista struktura warstwowa pakietu asfaltowego przybliżająca jego ziarnistą budowę jest słabo rozpoznana.

Test stabilności polega na kilkukrotnym pomiarze refleksyjności na krótkim odcinku, przy ścisłej wzajemnej synchronizacji dystansu wszystkich tych pomiarów. Pomiarów dokonuje się przy małej prędkości z bardzo dużą gęstością kilkudziesięciu do kilkuset skanów na metr. Pomiary są potem uśredniane w skali rzędu 0.5 m lub więcej. Do testu dobrze jest wybrać odcinek, na którym występuje nieduża, ale wyraźna lokalna anomalia materiałowa warstwy ścieralnej.



Rysunek 3.3 Wyniki testu na powtarzalność, poziom stabilności i rzeczywistą rozdzielczość polowego pomiaru refleksyjności: pięciokrotne gęste skanowanie (50 skanów na metr, z uśrednieniem w oknie 0.5 m) wzdłuż jednego, dokładnie tego samego profilu, przy kalibracji powtarzanej bezpośrednio przed każdym pomiarem.

Wyniki testu (antena GSSI, 2.2 GHz) pokazane są na Rysunku 3.3. Widać na nim, że niestabilność pomiaru bezwzględnej wartości refleksyjności jest na poziomie 0.01,

lokalne fluktuacje w skali metrowej o wartościach kilkusetnych nie są powtarzalne w kolejnych pomiarach, ale lokalna anomalia o wartości relatywnej -0.015 jest już bardzo dobrze widoczna. Wielokrotny pomiar wzdłuż tego profilu został powtórzony ze skrajnie wysoką gęstością skanowania kilkuset skanów na metr, ale jak widać problem stabilności pojedynczego profilowania jest tu nadal obecny pomimo istotnie lepszego obrazowania szczegółów przebiegu refleksyjności (Rysunek 3.4).



Rysunek 3.4 Testy stabilności i rzeczywistej rozdzielczości polowego pomiaru refleksyjności: kilkakrotne gęste skanowanie (500 skanów na metr, z uśrednieniem w oknie 0.5 m) wzdłuż tego samego profilu, przy kalibracji powtarzanej bezpośrednio przed każdym pomiarem.

Wnioski co do trybu skanowania są następujące. Skanowanie należy prowadzić z możliwie najwyższą gęstością. Uśrednianie uzyskiwanych danych wzdłuż profilu trzeba przeprowadzać w na tyle szerokim oknie, żeby obejmowało ono kilkadziesiąt do kilkuset pomiarów. Pomiar należy powtarzać jeśli potrzebna jest precyzja określania refleksyjności lepsza niż 0.02, interpretując anomalie powtarzające się w wynikach.

### 4 Wykonanie pomiarów radarowych, pomiarów promieniowania podczerwonego oraz pobranie próbek nawierzchni wytypowanych odcinków badawczych

W ramach pracy wykonano planowany zestaw pomiarów terenowych na wytypowanym odcinku badawczym. Odcinek ten wybrano w uzgodnieniu z administracją dorgową. Jest to odcinek nowej nawierzchni o ustabilizowanej konstrukcji, bez żadnych powazniejszych znamion uszkodzeń. Jedyne uszkodzenia, które można zaobserwować wizualnie to niewielki zmiany i niejednorodności tekstury nawierzchni.

Na odcinku wykonano pomiary radarowe GPR, a na ich podstawie dokonano lokalizacji i odwiertów rdzeni warstw asfaltowych. Jako dodatkowe badanie przeprowadzono pomiar promieniowania nawierzchni w podczerwieni IR. Wyniki pomiarów GPR w formie echogramów, zestawienie grubości warstw asfaltowych wraz ze szczególowymi zdjeciami rdzeni asfaltowych oraz materiał fotograficzny z pomiarów IR dołączono do nininiejszego sprawozdania w formie elektronicznej. Szczegóły pomiarów wraz z omawianymi przykładami zamieszczono w odpowiednich rozdziałach niniejszego sprawozdania.

#### 4.1 Pomiar refleksyjności na wybranym odcinku badawczym

W celu weryfikacji poglądów, co do perspektyw oceny stopnia zagęszczenia warstwy ścieralnej poprzez pomiar refleksyjności wybrano odcinek, na którym występowały trudności technologiczne w trakcie jego układania. Wstępne rozpoznanie georadarowe (Rysunek 4.1) pokazało, że refleksyjność wzdłuż tego odcinka (Rysunek 4.2) wykazuje dużą zmienność lokalną oraz, że występują istotne różnice pomiędzy pasami ruchu, a szczególnymi anomaliami wyróżnia się warstwa ścieralna pasa awaryjnego. Odcinek składa się z dwóch części ułożonych w różnych latach, z użyciem istotnie odmiennej (w sensie refleksyjności) mieszanki MMA w warstwie ścieralnej. Granica między tymi częściami jest zlokalizowana na dystansie 4000 m. W miejscu tym ma miejsce dosyć nagła zmiana pikietażu, dlatego do celów badawczych przyjęto lokalny dystans (narastający przeciwnie do pikietażu). Najciekawsze ujemne anomalie refleksyjności występują w nowszej części odcinka (x<4000m) na dystansach 2000 do 3700m jezdni prawej (pas awaryjny) i od 2000 do około 3000m jezdni lewej (pas awaryjny i pas szybkiego ruchu), zaś bardzo lokalne obniżenia refleksyjności mają miejsce na pasie szybkiego ruchu lewej jezdni wzdłuż całej jego nowszej części (0 do 4000m). Ten bardzo szczególny i ciekawy obraz dawał nadzieję na powiązanie znacznych obniżeń refleksyjności (o 0.02 aż do 0.04) z niedogęszczeniami warstwy ścieralnej. Na tej podstawie zdecydowano się na opróbowanie badanego odcinka wierceniami ze zwróceniem uwagi na obszary anomalne wraz z ich nie-anomalnym otoczeniem, czyli tak, aby umożliwić dalsze badanie ewentualnych korelacji przenikalności elektrycznej (mierzonej laboratoryjnie kilkoma metodami) z materiałowymi własnościami warstwy ścieralnej (określanymi także w drodze badań laboratoryjnych), jak zawartość wolnych przestrzeni oraz gęstość objętościowa, gęstość masy i gęstość frakcji skalnej. Pomiar na lewym (szybkim) pasie lewej jezdni był wykonany jako pierwszy i został on powtórzony na końcu sesji, aby uchylić obawy związane z niestabilnością pracy anteny w początkowej fazie jej pracy w pierwszej fazie sesji. Test taki daje w szczególności miarę powtarzalności wyników i poziomu stabilności oznaczenia refleksyjności.



Rysunek 4.1 Zestawienie echogramów georadarowych uzyskanych w wyniku pomiarów wzdłuż czterech profili na każdej z dwóch jezdni badanego odcinka drogowego.



Rysunek 4.2 Rozkłady refleksyjności zmierzone wzdłuż czterech profili na każdej z dwóch jezdni badanego odcinka drogowego.

#### 4.2 Pomiary nawierzchni w podczerwieni (IR)

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono dodatkowe pomiary kamerą termowizyjną mające wstępnie określić charakter i przydatność tej techniki pomiarowej w ocenie niejednorodności zagęszczenia. Uzyskane wyniki miały być elementem wspomagającym pomiary GPR, dlatego obie metody poddano analizie porównawczej.

Pomiary IR wykonano w kilku wariantach, to jest zdjęcie pionowe nad miejscem pobrania próbki oraz zdjęcia panoramiczne z odległości 2,5m, 5m, 10m i 15 m od miejsca pobrania próbki (Rysunki 4.3 i 4.4).



Rysunek 4.3 Przykładowe zdjęcie pionowe IR miejsca poboru próbki 1A



Rysunek 4.4 Przykład zdjęcia panoramicznego IR z odległości 10m od miejsca poboru próbki 3

Przedstawione przykłady obrazów nawierzchni wskazują na małą przydatność tego typu pomiaru do oceny jednorodności zagęszczenia. Na analizowanych obrazach rejestrowano niewielkie zmiany jednorodności rozkładu temperatur, które związane są głównie z niewielkimi zmianami tekstury nawierzchni. Widać to choćby na Rysunku 4.4, na którym można zaobserwować niejednorodności i różnice między emisją nawierzchni w śladach kół i między śladami. Zupełnie nieprzydatnym okazują się zdjęcia wykonywane nad miejscem poboru próbki. Obraz nawierzchni wykonany pionowo nad badanym miejscem (Rysunek 4.3) jest zniekształcony przez emisję kamery i nie można rozpoznać żadnych istotniejszych zmian w strukturze nawierzchni, co z kolei nie pozwala na przeprowadzenie próby korelacji z wynikami badań GPR i badaniami laboratoryjnymi.

Uzyskane przykłady mogą mieć znaczenie poglądowe. Przykładem jest tu sekcja próbki 11 (Rysunek 4.5), na której widać wyraźnie różnicę w emisji ciepła miedzy pasem ruchu powolnego, a pasem ruchu szybkiego. Niejednorodność na tej sekcji obserwowana jest także w pomiarach GPR. Nie jest jednak możliwe na tyle precyzyjne skorelowanie obrazu IR z echogramem, aby można było poprawnie oszacować zależność między tymi dwiema metodami.



Rysunek 4.5 Przykład zdjęcia panoramicznego IR z odległości 10m od miejsca poboru próbki 11 wraz ze zdjęciem cyfrowym

#### 5 Laboratoryjna ocena podstawowych parametrów próbek warstw asfaltowych z odcinków badawczych

W ramach badań laboratoryjnych wykonano oznaczenia podstawowych parametrów warstwy ścieralnej:

- 1) gęstość [kg/m<sup>3</sup>],
- 2) gęstość objętościowa [kg/m<sup>3</sup>],
- 3) gęstość mieszanki mineralnej [kg/m<sup>3</sup>],
- 4) zawartość wolnych przestrzeni %(v/v),
- 5) zawartość lepiszcza %(m/m),
- 6) zawartość lepiszcza %(v/v),
- 7) zawartość kruszywa % (m/m),
- 8) zawartość kruszywa % (v/v).

Wyniki tych badań posłużyły do porównania z rezultatami pomiarów przeprowadzonych w terenie przy pomocy GPR oraz badań radarowych i badań perkometrem (Rysunek 5.1) wykonanych w warunkach laboratoryjnych. Szczegółowe wyniki badań wraz z metodami pomiaru przedstawiono w Załączniku 3.



Rysunek 5.1 Perkometr z sondą dedykowaną do pomiaru próbek o średnicy 10 cm

Badania laboratoryjne pobranych z pakietu asfaltowego rdzeni były nastawione na szczegółowe rozpoznanie przestrzennego rozkładu przenikalności elektrycznej na powierzchni wybranych rdzeni. Przedmiotem zainteresowania była przede wszystkim warstwa ścieralna, ale dokonano także rozpoznania możliwości tej metody w odniesieniu do całego pakietu. Metoda skanowania powierzchni bocznej rdzenia (Rysunek 5.2) za pomocą perkometru daje bardzo interesujący wgląd w niejednorodność rozkładu przenikalności mieszanki mineralno-asfaltowej w skalach przestrzennych rządu pojedynczych centymetrów i pozwala na próby powiązania tych niejednorodności z własnościami materiałowymi ośrodka. Laboratoryjne wyznaczanie przenikalności powierzchniowej przeprowadzono kilkoma metodami w celu dalszych badań ich korelacji wzajemnej, korelacji z pomiarem refleksyjności obserwowanej w terenie oraz związku z własnościami materiałowymi warstwy ścieralnej. Mierzone laboratoryjnie przenikalności powierzchniowe są głównym przedmiotem badania korelacji, ponieważ należy poszukiwać korelacji z własnościami materiałowymi określanymi na tych samych



Rysunek 5.2 Skanowanie powierzchni bocznej próbki przy pomocy perkometru

# 5.1 Skanowanie rozkładu przenikalności elektrycznej na powierzchni rdzenia

Aby zilustrować metodologię badania przestrzennego rozkładu przenikalności w rzeczywistej mieszance mineralno asfaltowej pakietu, zostały przedstawione poniżej dwa przykłady analizy mapy rozkładu przenikalności na bocznej powierzchni rdzenia wiertniczego w przypadku rdzenia bez poważnych niedogęszczeń C12B oraz w przypadku rdzenia z bardzo poważnymi niedogęszczeniami C03. Metoda skanowania powierzchni bocznej rdzenia, za pomocą perkometru dostarcza map o rozdzielczości przestrzennej około 3 cm.

# 5.1.1 Charakterystyka rozkładu przenikalności elektrycznej obserwowanej na powierzchni bocznej rdzenia 3A.

a. Warstwa ścieralna (Rysunek 5.3)

- Brak wyraźnych oznak wiążących wyraźną enklawę obniżonej i podwyższonej przenikalności elektrycznej z obserwowanymi na powierzchni próbki cechami fizycznymi warstwy. Można jednak stwierdzić, że ta niezbyt rozległa, lokalna anomalia obniżonej przenikalności nie jest wywołana obecnością wolnych przestrzeni.
- Obserwowana enklawa obniżonej przenikalności może być potencjalnie wiązana z większym udziałem lepiszcza oraz przewagą drobnego kruszywa, bez udziału wyraźnie większych ziaren, tak jak to ma miejsce w pozostałej części warstwy.

- Wyższa przenikalność w obszarze otaczającym anomalię może być wiązana z widocznymi tam, kilkoma ziarnami kruszywa bazaltowego, wyróżniającymi się wyraźnie większymi rozmiarami.
- b. Warstwa wiążąca
- Zasadniczo wyższą przenikalność w tej części próbki można wiązać z występowaniem tutaj skupisk ciasno przylegających do siebie ziaren kruszywa, w których w sposób istotny przeważają duże ziarna. Potencjalnie ta podwyższona wartość może zatem wiązać się ze zmniejszeniem udziału lepiszcza na rzecz szkieletu skalnego.
- Enklawa o niższej przenikalności występuje w obszarze spągowym warstwy i można ją bezpośrednio wiązać z występowaniem niewielkich, pojedynczych, oddzielonych od siebie wolnych przestrzeni o średnicy około 4mm.
- c. Warstwa podbudowy I
- Tak jak w poprzednio, wyższą przenikalność w tej części próbki można wiązać z obecnością licznych ziaren kruszywa o znacznych rozmiarach.
- W obszarze tym można zauważyć także relatywne obniżenia przenikalności w miejscach, gdzie dużych ziaren brakuje.
- Strefa (wydłużona w poziomie enklawa) o niższej przenikalności występuje w części, gdzie obserwuje się koncentrację ziaren, zarówno mniejszych frakcji jak i większych, czyli tak jak w strefach o podwyższonej przenikalności. Strefa ta może być wiązana z cechami warstwy nie widocznymi na powierzchni, jak na przykład odmienny typ litologiczny kruszywa ukrytego tuż pod powierzchnią boczną rdzenia, który nie zawsze może być rozpoznany w trakcie oceny wizualnej. Tuż pod powierzchnią boczną może także występować enklawa uboga w kruszywo (z przewagą lepiszcza), co potencjalnie jest sugerowane przez ciemną plamę lepiszcza na powierzchni bocznej, która występuje jednak nieco niżej niż centrum anomalii przenikalności. Występowanie tej strefy blisko spągu warstwy mogłoby sugerować większą zawartość wolnych przestrzeni związanych z ewentualnym niedogęszczeniem spągowym warstwy, jednak wizualna ocena próbki zdecydowanie nie potwierdza takiego przypuszczenia.
- d. Warstwa podbudowy II
- Tak jak w poprzednio przypadkach wyższą przenikalność w tej części próbki można wiązać ze strefami występowania nielicznych, ale bardzo dużych ziaren kruszywa.
- Strefę o niższej przenikalności obserwuje się w miejscach, gdzie przeważa lepiszcze, a średnie i duże ziarna kruszywa są nieliczne.



Rysunek 5.3 Wyniki mapowania przenikalności na powierzchni rdzenia CO3A (po prawej), zestawione z panoramiczną fotografią jego powierzchni (pośrodku) oraz z wykresem uśrednionego głębokościowego rozkładu przenikalności (po lewej). Skale pionowe podają głębokość w centymetrach, zaś skala pozioma mapy to dystans kątowy mierzony po obwodzie, a skala pozioma lewego wykresu oraz legendy barw po prawej, to przenikalność uśredniona po obwodzie.

# 5.1.2 Charakterystyka rozkładu przenikalności elektrycznej obserwowanej na powierzchni bocznej rdzenia 12B.

- a. Warstwa ścieralna (Rysunek 5.4)
- Brak wyraźnych oznak wiążących enklawy obniżonej przenikalności elektrycznej z obserwowanymi na powierzchni próbki cechami fizycznymi warstwy.
- b. Warstwa wiążąca
- W stropie warstwy występują dwa obszary o nieco wyższej przenikalności, w których daje się zaobserwować bądź to obecność kilku większych ziaren kruszywa, bądź enklawę o większym skupieniu ziaren, z ciasną zwartą strukturą szkieletu mineralnego. Charakterystyczne jest tu to że strefa wyższej przenikalności generalnie rozciąga się w stropie warstwy, co sugeruje jej związek z nieco lepszym zagęszczeniem warstwy, oczekiwanym w jej górnej części.
- Dwie enklawy o niższej przenikalności zlokalizowane są w części spągowej warstwy, co wiązać można z charakterystycznym dla technologii układania warstw niedogęszczeniem. Wizualne objawy tego uszkodzenia znaleźć można w na powierzchni bocznej próbki w postaci licznych kawern i pustek, częstokroć znacznie większych od średniej wielkości ziarna mieszanki mineralnej.
- c. Warstwa podbudowy I i II
- Charakterystyczną cechą wspólną obu warstw są strefy podwyższonej i obniżonej przenikalności rozciągające się w obu warstwach w sposób bardzo zbliżony. Zwraca uwagę położenie stref o wyższej przenikalności w obszarach stropowych warstw i jednocześnie przeciwległe położenie stref o obniżonej przenikalności w obszarach spągowych. Taki rozkład stref należy wiązać z wizualnym zróżnicowaniem organizacji szkieletu mieszanki mineralnej. W stropach warstw obserwujemy uporządkowany, dobrze zagęszczony układ ziaren z ich ciasnym wypełnieniem i dopasowaniem. W strefach spągowych mamy do czynienia z klasycznym defektem spągu warstwy, któremu towarzyszy brak drobnych i średnich frakcji kruszywa wraz z brakiem lepiszcza, z czym wiąże się zwiększona zawartość wolnych przestrzeni, co razem składa się na typowy obraz niedogęszczenia.



Rysunek 5.4 Wyniki mapowania przenikalności na powierzchni rdzenia C12B (po prawej), zestawione z panoramiczną fotografią jego powierzchni (pośrodku) oraz z wykresem uśrednionego głębokościowego rozkładu przenikalności (po lewej). Skale pionowe podają głębokość w centymetrach, zaś skala pozioma mapy to dystans kątowy mierzony po obwodzie, a skala pozioma lewego wykresu oraz legendy barw po prawej, to przenikalność uśredniona po obwodzie.

# 5.1.3 Analiza map rozkładu przenikalności powierzchni bocznej rdzeni 3A i 12B.

Najważniejszym czynnikiem wpływającym na przenikalność elektryczną mieszanki mineralno-asfaltowej jest typ litologiczny użytego w niej kruszywa. W analizie map rozkładu przenikalności na bocznych powierzchniach rdzeni efekt ten uwidacznia się zauważalnym często podwyższeniem przenikalności w pobliżu dużych ziaren lub skupisk mniejszych ziaren kruszywa bazaltowego. Oba bowiem rdzenie pochodzą z nowej części odcinka badawczego i zawierają kruszywo mieszane, złożone z kilku typów litologicznych. Kruszywa bazaltowego jest jednak w warstwie ścieralnej tego odcinka niewiele (w odróżnieniu od części starszej), a odróżnianie typów przy oględzinach rdzenia nie jest zadaniem prostym, dlatego zagadnienie zależności przenikalności od typu kruszywa zostało lepiej rozpoznane innymi metodami. Natomiast analiza map rozkładu zwraca uwagę na kilka innych ważnych cech lokalnych zmian przenikalności związanych z bardzo dużą niejednorodnością materiałową mieszanki.

Kluczowe znaczenie w obserwowanej wartości przenikalności elektrycznej ma organizacja szkieletu mineralnego. W strefach koncentracji, ciasno przylegających ziaren (szczególnie ziaren dużych i średnich), dobrze wypełniających dostępną przestrzeń, będziemy obserwować wyższą przenikalność. Podwyższenie takie obserwuje się także w obszarach o mniejszym wypełnieniu mieszanką mineralną, w których jednak występują bardzo duże, choć nieliczne ziarna kruszywa. Natomiast w strefach, gdzie przeważa lepiszcze, zaś brakuje tam skupień średnich i dużych ziaren, a tym samym stopień wypełnienia przestrzeni ziarnami jest znacznie mniejszy, będziemy obserwować obniżoną przenikalność elektryczną. Podobnie z obniżeniem przenikalności spotykamy się w przypadku obszarów, w których występują choćby pojedyncze, niewielkie wolne przestrzenie.

Wyraźne zmiany w rejestrowanych wartościach przenikalności elektrycznej obserwowane są wewnątrz warstw uszkodzonych, w których obserwuje się segregację kruszywa i niedogęszczenie spągowej części warstwy. W warstwach tych zwraca uwagę pionowo uporządkowane położenie obszarów: stropowego, o dobrym zagęszczeniu i spągowego o zagęszczeniu niedostatecznym. Rozdziałowi temu towarzyszy różnica w lokalnej organizacji szkieletu mineralnego (obecność średnich i drobnych frakcji kruszywa w stropie, a brak ich w spągu), postrzegana także jako segregacja kruszywa w niedogęszczonej warstwie. Na taki, wizualnie zidentyfikowany, stan szkieletu mineralnego nakłada się dosyć dokładnie mapa rozkładu przenikalności elektrycznej, w której strefy wyższej przenikalności pokrywają się z obszarami dobrze zagęszczonymi i odwrotnie, strefy o niższej przenikalności zlokalizowane są w obszarach, gdzie ma miejsce niedogęszczenie i tym samym wysoka zawartość wolnych przestrzeni. Z tym ostatnim parametrem należy bezpośrednio wiązać obniżone wartości przenikalności elektrycznej, niższą przenikalność niż spoiwo i materiał mineralny.

Anomalie rozkładu przenikalności mają rozmiary pionowe rzędu pojedynczych centymetrów, zaś ich typowa rozciągłość pozioma sytuuje się w pobliżu decymetra do kilkunastu centymetrów. Mają one zatem owalny, wyraźnie spłaszczony kształt o rozciągłości poziomej, który jest jak nietrudno zgadnąć skutkiem rozściełania i zagęszczania przez wałowanie. Wartości anomalii są duże, odzwierciedlając duże kontrasty pomiędzy komponentami mieszanki (Tabela 5.1). Zwraca przy tym uwagę, że anomalie związane z niedogęszczeniami wcale nie należą do największych. Równie dużą, jeśli nie większą kompetencję w kształtowaniu lokalnej wartości przenikalności, mają skupienia ziaren kruszywa i oczywiście zmiany jego składu mineralnego.

	Gęste skupiska kruszywa		Obszary ubogie w średnie i duże ziarna		Obszary niedogęszczeń	
próbka	3A	12B	3A	12B	3A	12B
amplituda	1,0	2,0	-2,0	-2,5	-1,	-1,5
	1,0	1,0	-1,5	-1,5	0	-1,5
Rozmiar w pionie [cm]	6,8	3,5	3,0	3,1	2,	2,1
	2,2	2,1	2,1	1,9	0	2,2
Rozmiar w poziomie	7,5	7,0	16,0	7,5	6,	7,0
[cm]	6,5	9,0	7,0	6,5	0	7,0

Tabela 5.1 Zestawienie charakterystycznych amplitud znaczących anomalii przenikalności oraz ich charakterystycznych wymiarów poziomych i pionowych, jakie odnotowano przy analizie map powierzchni bocznej rdzeni C03 i C12B.

Jeśli idzie o szczególnie tutaj interesującą warstwę ścieralną, to niedogęszczenia na badanym odcinku okazały się w niej niezbyt licznie reprezentowane mając w większości bardzo małe wartości. Sugeruje to, że powodem wyraźnych (stabilnie oznaczonych i mających znaczne wartości) anomalii refleksyjności na badanym odcinku są inne czynniki niż zawartość wolnych przestrzeni. Powyższe analizy pokazują, że lokalnie, w skalach centymetrowych, struktura materiału jest bardzo niejednorodna (anomalie przenikalności o amplitudzie ±2, tabela), co dopuszcza już z racji samej niejednorodności budowy ośrodka, występowanie znacznych fluktuacji w skalach decymetrowych (pomiar georadarowy), a nawet większych. Inną ważną konstatacją w odniesieniu do warstwy ścieralnej jest to, że typowe niedogęszczenia nie są własnością obejmującą w równomierny sposób całą głębokość warstwy, ale że są one skoncentrowane zdecydowanie w spągu warstwy. Oznacza to, że tak rozumiany spadek przenikalności, nie będzie powodował zmiany refleksyjności obserwowanej przez anteny wysokiej częstotliwości (np. 2GHz), gdyż refleksyjność wiąże się ze skokiem przenikalności jaki dokonuje się tuż przy powierzchni, włączając najpłytsze wnętrze ośrodka do głębokości nie większej niż około ósma część lokalnej długości fali (czyli około 0.5 cm). Użycie dłuższych fal spowoduje natomiast zaburzenie refleksu powierzchniowego przez refleks pierwszego horyzontu miedzy warstwowego. Innymi słowy, próby detekcji niedogęszczenia spągowego wymagają użycia bardziej zaawansowanych metod interpretacji sygnału refleksyjnego.

Analizy map rozkładu przenikalności mają również pewne interesujące dylematy. Jeśli pominąć możliwe lokalne błędy dosyć trudnego i żmudnego pomiaru, wydaje się, że lokalnie mamy do czynienia z relatywnie nielicznymi przypadkami anomalii (zwykle obniżeń wartości) trudnymi do powiązania z widocznymi oznakami na powierzchni rdzenia. Trzeba wtedy pamiętać, że pomiar ten pokazuje rozkład przenikalności wygładzony w skali około 3 cm, a charakterystyczna głębokość sondowania ma wartość około 2 cm. W związku z tym duże ziarna, skupiska ziaren, enklawy zdominowane przez lepiszcze oraz kawerny czasem mogą być ukryte przed oglądem pod boczną powierzchnią rdzenia, a mimo to mają wpływ na wartość pomiaru, jeśli są umiejscowione płytko. Jedynie poważne niedogęszczenia spągowe są własnością trudną do ukrycia, gdyż mają formę rozległą. Inną trudnością interpretacyjną pozostaje typ litologiczny kruszywa, który często jest bardzo trudny do oceny wizualnej, a jeśli idzie najdrobniejsze frakcje kruszywa (mączkę wypełniającą), to typu tego wizualnie ocenić nie można w ogóle, bez pomocy szlifu mikroskopowego. Biorąc pod uwagę wszystkie te bez wątpienia obecne trudności, wyniki korelacji map przenikalności z fotografiami powierzchni należy uznać za bardzo znaczące.

# 5.1.4 Analiza uśrednionego rozkładu głębokościowego przenikalności elektrycznej w warstwie ścieralnej rdzenia

Mapowanie powierzchni bocznej rdzenia (Rysunek 5.5) umożliwia oszacowanie średniej przenikalności odpowiadającej danej głębokości (czarna linia przerywana) przez uśrednienie pomiarów wokół obwodu rdzenia (krzywe szare). Krzywa średnia jest o tyle trudna do interpretacji, że przedstawia ona nie przenikalność średnią w funkcji głębokości, ale jej przebieg wygładzony w skali około 3 cm. W celu przybliżonego odtworzenia rozkładu rzeczywistego, należy przeprowadzić modelowanie. Jednym z możliwych modeli jest model progu. Zakłada on (krzywa fioletowa) liniowy rozkład przenikalności z głębokością w warstwie tuż pod powierzchnią oraz liniowy rozkład o innym nachyleniu w głębszej części warstwy ścieralnej. W miejscu styku obu tych zakresów zakłada się ciągłość przebiegu, czyli równość obu funkcji liniowych, natomiast na samej powierzchni ośrodka (głębokość 0 cm) rozkład nie jest ciągły dając swobodę wielkości skoku wartości dokonującego się na powierzchni. Parametry modelu są dopasowywane tak, aby jak najlepiej przybliżyć za pomocą krzywej modelu wygładzonego (krzywa zielona), krzywą pomiaru uśrednionego (krzywa czarna przerywana).

Podpowierzchniowa warstwa przejściowa okazała się potrzebna w konstrukcji modelu, gdyż alternatywne modele miały w wielu przypadkach trudności z precyzyjnym przybliżeniem pomiaru w pobliżu powierzchni górnej rdzenia. Jej fizyczny sens niekoniecznie musi odpowiadać rzeczywistej stratyfikacji przenikalności tuż przy górnej powierzchni pakietu asfaltowego, gdyż potencjalnie ta formalna warstwa modelu może działać jako kompensacja milimetrowego błędu w głębokościowej synchronizacji pomiarów, może ona kompensować nie do końca jeszcze rozpoznane własności metody albo też kompensować skutki silniej niejednorodności rdzenia, obecnej wbrew założonej w metodzie modelowania warstwowości budowy pakietu. Niemniej jednak, wyniki modelowania górnych cześci 12 wybranych rdzeni (zakres warstwy ścieralnej) wskazuja w sposób systematyczny, że adekwatna szerokość potrzebnej do wymodelowania wyników pomiaru strefy przejściowej, to około 0.5 cm (czyli istotnie więcej niż ewentualna pomyłka w synchronizacji), a głębokościowy gradient przenikalności w tej strefie jest zawsze dodatni (mimo swobody określenia skoku na powierzchni). Może to oznaczać, że stratyfikacja przenikalności tuż pod powierzchnią jest faktem fizycznym. Natury tego zjawiska należałoby się doszukiwać w procesie układania nawierzchni, gdzie lokalną gładkość i płaskość o precyzji 1 mm uzyskuje się w wyniku wałowania. Proces ten powoduje powierzchni wyciskanie do góry lepiszcza przy zmieszanego z najdrobniejszymi frakcjami kruszywa, jednak duże ziarna opierając się swymi górnymi krawędziami o powierzchnię walca, są powstrzymywane. W wyniku takiego przebiegu zagęszczania najwyższa, podpowierzchniowa warstewka ośrodka o grubości rzędu połowy charakterystycznej średnicy największej frakcji kruszywa, jest zubożona o wysoko-przenikalną elektrycznie frakcję gruboziarnistą, na rzecz mieszaniny lepiszcza z frakcją drobno-ziarnistą o dużo mniejszej przenikalności.

Inną ciekawą obserwacją jest tutaj to, że gradient przenikalności w zasadniczej części warstwy ścieralnej ma zwykle uchwytny znak, ale na badanym odcinku równie często mamy do czynienia ze znakami dodatnimi, jak i ujemnymi. Właściwość tą (brak preferencji gradientu ujemnego) należy wiązać z brakiem wyraźnej tendencji do niedogęszczeń w warstwie ścieralnej.





Rysunek 5.5 Wyniki skanowania górnych części wybranych rdzeni. Uśrednione rozkłady głębokościowe przenikalności (przerywane krzywe czarne) pokazane zostały na tle ośmiu pomiarów profilowych (krzywe szare) na bocznej powierzchni każdego rdzenia. Średni rozkład pomierzonej przenikalności został wymodelowany (krzywe zielone) w celu lepszego zilustrowania rozkładu rzeczywistego (linie fioletowe) wykazującego obecność progu w górnej części warstwy ścieralnej, na głębokości rzędu kilku milimetrów do jednego centymetra.

#### 5.1.5 Wyznaczanie przenikalności powierzchniowej rdzeni

Ze względu na małe rozmiary strefy przejściowej wartość przenikalności dopasowanego modelu w miejscu progu pomiędzy strefą przejściową, a zasadniczą, wewnętrzną częścią warstwy ścieralnej może być przyjmowana jako oszacowanie kontrastu przenikalności na powierzchni pakietu poprawione ze względu na gradient pionowy. Jednak jest to oszacowanie mniej stabilne, niż te jakie dają prostsze modele warstwy ścieralnej bez strefy przejściowej (model stałej wartości przenikalności w warstwie). Modelu takiego można użyć do interpretowania uzyskanego pomiaru przenikalności aż do głębokości 4 cm (Rysunek 5.6).



Rysunek 5.6 Przykład modelu zakładającego stałą podatność w warstwie ścieralnej.

Porównując wyniki uzyskane za pomocą takiego modelowania w przypadku 12 wybranych rdzeni (Rysunek 5.7) możemy stwierdzić, że dobrze korelując są one jednak w sposób systematyczny mniejsze od przenikalności średniej mierzonej w połowie warstwy ścieralnej z użyciem gęstego opróbowania. Modelowanie zastosowane do płytszej warstwy podpowierzchniowej daje jeszcze niższe wartości przenikalności. Powodem jest zapewne opisana wcześniej strefa przypowierzchniowego obniżonej wartości przenikalności.



Rysunek 5.7 Porównanie korelacyjne średniej przenikalności mierzonej w połowie warstwy ścieralnej ze średnią wartością górnej cztero-centymetrowej warstwy rdzenia oszacowaną przez dopasowanie modelu stałej przenikalności.

Metody pomiaru oparte o mapowanie powierzchni rdzenia prowadzą do rozpoznania złożonych szczegółów przestrzennego rozkładu przenikalności uświadamiając złożony sens refleksyjności powierzchniowej. Otwierają one tym samym możliwości zdefiniowania przenikalności powierzchniowej na wiele sposobów i pokazują powody dużej dyspersji wyników takiego pomiaru. W związku z tym badano równolegle wiele modeli przypowierzchniowego rozkładu przenikalności definiujących w różny sposób przenikalność powierzchniową. Aczkolwiek modelowanie pozwala nam badać szczegóły rozkładu nie zmienia to faktu, że wyniki oszacowania przenikalności tą metodą mają dużą niepewność wynikającą z niejednorodności ośrodka, a sam pomiar jest nadzwyczaj żmudny.

Inna, alternatywna metoda określania przenikalności powierzchniowej oparta jest o amplitudę rozpraszania fali przez rdzeń. Pozwala ona na oszacowanie przenikalności powierzchniowej poprzez użycie do pomiaru tej samej anteny, którą prowadzi się pomiary polowe. Wyniki zaś wydają się być nieco bardziej adekwatne wykazując interesujące korelacje z pomiarami własności materiałowych warstwy ścieralnej.

### 6 Ocena zależności między wynikami z badań laboratoryjnych a pomiarem zawartości wolnych przestrzeni przy pomocy techniki radarowej

Kluczowym czynnikiem rządzącym przenikalnością elektryczną mieszanki mineralnoasfaltowej jest typ mineralny występującego w niej kruszywa. Kruszywo stanowi bowiem kluczowy pod względem ilościowym składnik. Materiały skalne używane w mieszankach mają przenikalność zmieniającą się od wartości około 5 (granity) do wartości rzędu 10 (bazalty). Przenikalności te mają dużą zmienność także w ramach jednego typu skały, a nawet w materiale pochodzącym z jednego odsłonięcia zmienność to może być zaskakująco duża. Własność ta uwidacznia się w pomiarach średniej przenikalności warstwy ścieralnej poszczególnych rdzeni badanego odcinka. Starsza część nawierzchni ma istotnie wyższą przenikalność warstwy ścieralnej (7.6 do 8.3), niż część nowsza (6.1 do 7.8). O ile w części starszej w warstwie ścieralnej dominuje zdecydowanie kruszywo bazaltowe, to część nowsza ma w warstwie ścieralnej mieszanine skał o wybujałej różnorodności typów litologicznch, na którą składają się zarówno bazalty, jak i skały granitoidowe i osadowe. Różnorodność ta przekłada się na znacznie wiekszą zmienność przenikalności w nowszej części nawierzchni, gdyż skład litologiczny użytego rumoszu skalnego jest ze swej natury niekontrolowany. Jak się okazuje wpływ zawartości wolnych przestrzeni na wartość przenikalności elektrycznej, choć jest zauważalny ma w praktyce nieco mniejsze znaczenie, a obserwowane zmiany przenikalności wydają się być zdominowane przez skład litologiczny frakcji mineralnej (Rysunek 6.1).

W wynikach oznaczania udziału frakcji warstwy ścieralnej zwraca uwagę dobra kontrola relatywnej wagowej zawartości lepiszcza i kruszywa, będąca przedmiotem szczególnej troski technologicznej. Skoro zatem zawartość wolnych przestrzeni nie jest kluczowym czynnikiem rządzącym wartością przenikalności elektrycznej, lepiszcza jest zaś w mieszance niewiele (kilka procent) i ma ono także zapewne dosyć stabilny skład i przenikalność, to jedynym czynnikiem (jeśli wykluczyć wilgotność) pozostaje skład rzędzie mineralny kruszywa oraz w drugim ewentualnie jego własności granulometryczne. Próby korelacji podatności mierzonej w połowie warstwy ścieralnej z zawartością pustek w warstwie ścieralnej i z gęstością masy kruszywa wydają się potwierdzać powyższy punkt widzenia (Rysunek 6.2). Korelacja z pustkami jest niezauważalna. Systematyczne przesunięcie pomiędzy grupą pomiarów odcinka starszego, a pomiarami odcinka nowszego wynika jedynie z różnych typów litologicznych kruszywa.



Rysunek 6.1 Próba korelacji zawartości pustek w warstwie ścieralnej z przenikalnością mierzoną w połowie warstwy.



Rysunek 6.2 Próba korelacji gęstości materiału kruszywa w warstwie ścieralnej z przenikalnością mierzoną w połowie warstwy (rysunek lewy) i z przenikalnością oszacowaną przez modelowanie górnych czterech centymetrów rdzenia.

Natomiast korelacja z pustkami wewnątrz grup, ma tendencję do dodatniego znaku, czyli jest dokładnie przeciwna niż oczekiwana. Korelacja przenikalności z gęstością materiału

samego kruszywa wydaje się dowodzić, że różnica pomiędzy grupami dokładnie odpowiada tendencji jaka jest właściwa skałom magmowym. Jednak gęstość kruszywa również nie jest czynnikiem, który wyjaśniłby zmienność podatności wewnątrz dwóch grup pomiarów.

Porównanie gęstości masy kruszywa z przenikalnością oszacowaną dla górnych 4 cm rdzenia, wydaje się nawet nieco lepiej pasować do korelacji sugerowanej przez zmiany typu litologicznego kruszywa, ale pomiar ten miał znacznie mniejszą statystykę (tylko 12 rdzeni) i nie wydaje się, żeby zmieniał on poprzednie spostrzeżenia. Należy też zaznaczyć, że sugerowana korelacja gęstości z przenikalnością jest jedynie wstępnym odpowiadającym skałom magmowym, a skały osadowe obecne w warstwie ścieralnej odcinka nowszego wcale nie muszą jej podlegać. Dylematem określania przenikalności powierzchniowej metodą skanowania jest ogromny rozrzut wyników związany z niejednorodnością ośrodka oraz to, że skanowanie powierzchni bocznej rdzenia daje oszacowanie odpowiadające jedynie wąskiej strefie przy-krawędziowej rdzenia, które ze względu na dużą niejednorodność (widoczną w rozrzucie) jest mało precyzyjnym oszacowaniem średniej przenikalności na powierzchni górnej. Wprawdzie istnieje potencjalnie możliwość skanowania płaskiej powierzchni górnej, ale osiągnięcie interesującej precyzji wymaga dużej gładkości i płaskości, czyli dokładnego szlifowania górnej powierzchni.

Istotne nowe przesłanki pojawiają się za przyczyną oszacowań przenikalności na podstawie amplitudy rozpraszania. Pomiar tą metodą jest szczególnie bliski pomiarom polowym, gdyż można użyć dokładnie tej samej anteny, a przedmiotem pomiaru jest stropowa część warstwy ścieralnej. Unikamy w ten sposób poważnych rozbieżności pomiędzy metodami pomiarów, związanych z dużą odmiennością geometrii układu pomiarowego, niejednorodnością materiału, różnicą częstotliwości, czy odmiennością podstaw fizycznych metod. Podobnie jak pomiar polowy pakietu, amplituda rozpraszania daje oszacowanie średniej przenikalności elektrycznej stropu rdzenia w jego pierwszym centymetrze (do około 2 cm, antena 2GHz), wprawdzie bez rozpoznania stratyfikacji przypowierzchniowej, ale za to przedmiotem rozpoznania jest cała powierzchnia rdzenia, a nie jak w przypadku skanowania perkometrem wąski obszar przy-krawędziowy. Pomiar wykonany na próbce może być przedmiotem porównania korelacyjnego z wynikiem laboratoryjnych pomiarów własności materiałowych wykonanych na tej samej próbce. Tak oznaczona przenikalność ma zauważalną korelację zarówno z zawartościami wolnych przestrzeni jak i z gęstością materiału kruszywa (Rysunek 6.3).



Rysunek 6.3 Współzależność przenikalności oszacowanej za pomocą amplitudy rozpraszania z zawartością pustek i gęstością materiału kruszywa w warstwie ścieralnej.

Chociaż metoda ta jest najbardziej obiecująca, wymaga zapewne modernizacji sprzętowej, gdyż precyzja pomiarów w widoczny sposób jest ograniczona problemami ze stabilnością pracy anteny. Niepewność tych pomiarów jest jednak nadal wysoka nie pozwalając na przejrzyste zilustrowanie omawianych współzależności. Na podstawie sugerowanych kierunków korelacji i charakterystycznych wariacji zawartości pustek i gęstości kruszywa, można jednak orzec, że przewidywana zmienność przenikalności wywołana zmianami gęstości kruszywa (tj. zróżnicowaniem litologicznym) jest dwukrotnie większa niż zmienność związana z pustkami.

Z tego powodu zmiany refleksyjności nie koniecznie są skutecznym przejawem zawartości pustek warstwie ścieralnej, gdyż zapewne odzwierciedlają lepiej zróżnicowanie litologiczne kruszywa. Wyjątkiem mogą być nowe nawierzchnie o dobrze określonym typie litologicznym kruszywa (np. wyłącznie bazaltowym, pochodzącym z jednego kamieniołomu). Interesującym spostrzeżeniem w badanym przypadku jest specyficzny, unikalny układ anomalii refleksyjności w postaci dużych (rozpiętość 0.02 do 0.04 lub więcej) wahań w skalach dziesiątków metrów na znacznych odcinkach, które potencialnie same w sobie moga być manifestaciami niedogeszczenia. Warto zwrócić uwagę na to, że odcinek nowszy, na którym układ taki występuje, charakteryzuje się znacznymi (nawet do 8%) i zasadniczo większymi zawartościami pustek niż odcinek starszy (do 3.5%), gdzie takiego obrazu nie obserwujemy. Jeden opisywany przypadek nie jest jednak wystarczającą motywacją takiego kryterium i potrzebne jest udokumentowanie związku występowania takich anomalii z niedogęszczeniami w kilku innych przypadkach oraz dalsze studia materiałowe nad rzeczywistym związkiem zawartości pustek i litologią kruszywa z obserwowaną przenikalnością i refleksyjnością mieszanki mineralno-asfaltowej w celu oszacowania rzeczywistego wpływu (i relatywnego udziału) obu tych kluczowych czynników rządzących wynikami pomiarów refleksyjności.

#### 7 Podsumowanie

Przedstawiona w niniejszej pracy analiza wskazuje, że technika radarowa posiada potencjał do stosowania i wykorzystania w ocenie jednorodności zagęszczenia wierzchnich warstw asfaltowych. Wydaje się, że pomiar stałej dielektrycznej może być wykonany z precyzją wystarczającą do poprawnego wyznaczenia zmienności zagęszczenia w mierzonym profilu i jednocześnie lepszą niż to przedstawiono w dotychczasowych badaniach. Niemniej konieczne jest poszerzenie wiedzy z tego zakresu o nowe zagadnienia, które wynikają z wniosków wyciągniętych na podstawie przeprowadzonych badań. Jednym z tych istotnych wniosków jest to, że zawartość wolnych przestrzeni nie jest kluczowym czynnikiem rządzącym wartością przenikalności elektrycznej. Elementem istotnie kształtującym parametry elektryczne jest skład rzędzie ewentualnie mineralnv kruszywa oraz w drugim iego własności granulometryczne. Próby korelacji podatności mierzonej w połowie warstwy ścieralnej z zawartością pustek w warstwie ścieralnej i z gęstością masy kruszywa potwierdzają słabą korelację w tym zakresie.

Najważniejszym czynnikiem wpływającym na przenikalność elektryczną mieszanki mineralno-asfaltowej jest typ litologiczny użytego w niej kruszywa. W analizie map rozkładu przenikalności na bocznych powierzchniach rdzeni efekt ten uwidacznia się podwyższeniem przenikalności w pobliżu dużych ziaren lub skupisk mniejszych ziaren kruszywa bazaltowego. Kluczowe znaczenie w obserwowanej wartości przenikalności elektrycznej ma organizacja szkieletu mineralnego. W strefach koncentracji, ciasno przylegających ziaren (szczególnie ziaren dużych i średnich), dobrze wypełniających dostępną przestrzeń, będziemy obserwować wyższą przenikalność. Podwyższenie takie

obserwuje się także w obszarach o mniejszym wypełnieniu mieszanką mineralną, w których jednak występują bardzo duże, choć nieliczne ziarna kruszywa.

Wyraźne zmiany w rejestrowanych wartościach przenikalności elektrycznej obserwowane są wewnątrz warstw uszkodzonych, w których obserwuje się segregację kruszywa i niedogęszczenie spągowej części warstwy. W warstwach tych zwraca uwagę pionowo uporządkowane położenie obszarów: stropowego, o dobrym zagęszczeniu i spągowego o zagęszczeniu niedostatecznym. Rozdziałowi temu towarzyszy różnica w lokalnej organizacji szkieletu mineralnego (obecność średnich i drobnych frakcji kruszywa w stropie, a brak ich w spągu), postrzegana także jako segregacja kruszywa w niedogęszczonej warstwie oraz często związana z tym wysoka zawartość wolnych przestrzeni. Z tym ostatnim parametrem należy bezpośrednio wiązać obniżone wartości przenikalności elektrycznej, gdyż powietrze zawarte w wolnych przestrzeniach ma diametralnie różną, niższą przenikalność niż spoiwo i materiał mineralny.

Istotne nowe przesłanki pojawiają się dzięki szacowaniu przenikalności na podstawie amplitudy rozpraszania. Pomiar tą metodą jest bliski pomiarom polowym, gdyż można użyć dokładnie tej samej anteny, a przedmiotem pomiaru jest stropowa część warstwy ścieralnej. Pomiar wykonany na próbce może być przedmiotem porównania korelacyjnego z wynikiem laboratoryjnych pomiarów własności materiałowych wykonanych na tej samej próbce. Tak oznaczona przenikalność ma zauważalną korelację zarówno z zawartościami wolnych przestrzeni jak i z gęstością materiału kruszywa (Rysunek 7.1).



Rysunek 7.1 Współzależność przenikalności oszacowanej za pomocą amplitudy rozpraszania z zawartością pustek i gęstością materiału kruszywa w warstwie ścieralnej.

W odniesieniu do badań prowadzonych w terenie kluczowym wydaje się przyjęty sposób próbkowania. Skanowanie należy prowadzić z możliwie najwyższą gęstością, natomiast uśrednianie uzyskiwanych danych wzdłuż profilu trzeba przeprowadzać w na tyle szerokim oknie, żeby obejmowało ono kilkadziesiąt do kilkuset pomiarów. Pomiar

należy powtarzać kilkukrotnie jeśli potrzebna jest precyzja określania refleksyjności lepsza niż 0.02, interpretując anomalie powtarzające się w wynikach.

Pomiar w podczerwieni jest trudny do przeprowadzenia. Znaczący wpływ na końcowy wynik pomiaru ma tu temperatura otoczenia oraz nasłonecznienie. Dlatego rejestrację IR powinno się prowadzić nocą, w warunkach stabilnej temperatury i przy braku emisji źródeł zewnętrznych. Na obecnym etapie rejestracja obrazu rozkładu temperatury nawierzchni może stanowić jedynie materiał poglądowy, wspomagający ocenę jednorodności powierzchni nawierzchni. O ile na odcinkach eksploatowanych metoda jest mało skuteczna, a wyniki trudne w analizie o tyle na odcinkach nowo wybudowanych, nie oddanych do eksploatacji metoda IR może okazać się skutecznym narzędziem oceny zagęszczenia, znacznie lepiej korelując na takich odcinkach z pomiarami GPR i badaniami laboratoryjnymi.

Należy podkreślić, że przeprowadzona badania i analizy pozwoliły lepiej zrozumieć zjawiska zachodzące w warstwach nawierzchni poddanych działaniu fal elektromagnetycznych. Szczególne istotne są tu wnioski dotyczące czynników mających wpływ na charakterystykę podatności elektrycznej, które pozwalają z kolei stwierdzić, że najprecyzyjniejsze określenie jednorodności zagęszczenia nawierzchni będzie możliwe jedynie na nawierzchniach nowych, jeszcze nie oddanych do ruchu. Na odcinkach użytkowanych uzyskiwane dane zniekształcane są często przez defekty i uszkodzenia nawierzchni, w ten sposób uniemożliwiając niemal całkowicie jakąkolwiek ocenę jednorodności.

Przeprowadzone badania uwidoczniły też skalę problemów pozostających wciąż do rozwiązania w zakresie chociażby takich zagadnień jak oszacowanie wpływu własności materiałowych mieszanki mineralno asfaltowej na obserwowany, przestrzenny rozkład podatności elektrycznej, analiza kształtu sygnałów refleksyjnych GPR pod kątem wyznaczania stałej dielektrycznej czy badanie stratyfikacji i niejednorodności pakietu warstw asfaltowych w kontekście uzyskiwanego obrazu parametrów dielektrycznych.

#### **Bibliografia**

**A-CUBED** General state of the art review of ground probing radar [Book Section]. - Ontario : A-CUBED, 1983.

**Al-Qadi II [et al.]** In-place hot-mix asphalt density estimation using groundpenetrating radar [Article] // Journal of the Transportation Research Board. -Washington : Transportation Research Record, National Academy of Sciences, 2010. -19-27 : Vol. 2152.

**Apkarian H and Piascik R J** Testing and trial deployment of a cost-effective and realtime asphalt pavement quality indicator (density and moisture-content monitor) system // Annual progress report. - [s.l.] : IDEA, 1997.

**Benedetto A and Fattorini F** GPR signal processing in the frequency domain for detection of moisture variability in pavement structure [Conference] // MAIREPAV6. - Torino : Politecnico di Torino, 2009.

**Burati J L and Elzoghbi G B** Correction of nuclear density results with core densities. -[s.l.] : Transportation Research Board, 1987. - Vol. Transportation Research Record.

**Colagrande S [et al.]** Ground penetrating radar assessment for flexible road pavement degradation [Conference] // MAIREPAV6. - Torino : Politecnico di Torino, 2009.

**Daniels J** Graund Penetrating Radar fundamentals // Appendix to Reprot to United States Environmental Protection Agency. - 2000.

**Ji-tong Sun, Xiu-jun Guo and Xiao-wei Zhang** Reserch on dielectric properties of asphalt concrete with GPR [Conference] // 14th International Conference on Ground Penetrating Radar. - Shanghai : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012.

**Karczewski Jerzy** Zarys metody georadarowej [Book]. - Kraków : Wydawnictwa AGH, 2007.

Leng Z, Al-Qadi I and Lahouar S Development and validation for in situ asphalt mixture density prediction models [Article] // NDT&E. - [s.l.] : Elsevier Ltd, 2011. - 4; 369-375 : Vol. 44.

**Lichtenecker K and Rother K** Deduction of the logarithmic mixture law from general principles [Book]. - 1931. - Vols. Phys. Z. 32, 255-260.

**Lytton R L** System identification and analysis of subsurface radar signals, US Patent no. 5384715, Houston, TX: Texas A&M University, Licensed to Lyric Technologies, Inc.; 1995 [Patent]. - USA, Patent no. 5384715, Houston TX: Texas A&M University, Licensed to Lyric Technologies, Inc., 1995.

**Moorman Brian** Ground-penetrating radar applications in paleolimnology [Conference]. - Dordrecht : Kuwer Academic Publishers, 2001.

Morawski Tadeusz and Gwarek Wojciech Teoria pola elektromagnetycznego [Book]. - Warszawa : WNT, 1985.

**Morey Rexford** Ground penetrating radar for evaluating subsurface conditions for transportation facilities // NCHRP Synthesis 255. - Washington : Transportation Research Board, 1998.

**Olhoeft G and Capron D** Petrophysical causes of elektromagnetic dispersion [Conference] // Proceedings of the Fifth Internationa Conference on Ground Penetrating Radar. - Waterloo : Waterloo Centre of Groundwater Research, 1994. - pp. vol 1 of 3: 145-152.

**Raju Gorur G.** Dielectrics in electric fields [Book]. - New York : MarcelDekker,Inc, 2003.

**Saarenketo T and Scullion T** Road evaluation with Ground Penetrating Radar [Journal] // Journal fo Applied Geophysics 43. - 2000. - pp. 119-138.

**Saarenketo T** Measurin electromagnetic properties of asphalt for pavement quality control and defect mapping. - 2000.

**Saarenketo T** Using ground penetrating radar and dielectric probe measurements in pavement density quality control [Article] // Journal of the Transportation Research Board. - [s.l.] : Transportation Research Record, 1997. - 34-41 : Vol. 1575.

Saarenketo Timo Elektrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys // Praca doktorska. - Oulu : University of Oulu, 2006.

**Scaffer J and Saxena A** The science and design of engeneering materials [Conference]. - [s.l.] : Richard D. Irwin, Inc, 1995.

**Sculion T and Saarenketo T** Ground Penetrating Radar Technique in Monitoring Defects in Roads and Highways [Conference] // Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP...-Orlando, Florida. : Compiled by Ronald S. Bell., 1995. - pp. pp 63–72..

**Sculion T** Perpetual pavements in texas: state of the practice [Report]. - Washington : Federal Highway Administration, 2006.

**Sebesta S and Sculion T** Application of Infrared Imaging and Ground Penetrating Radar for detecting segregation in hot-mix asphalt overlays // Transportation Research Board Paper. - 2002.

**Sihvola A** Self-consistency aspects of dielectric mixing theories [Article] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing . - 1989. - 27. - 403-415 : Vol. 4.

**Silvast M** Air void content measurement using GPR technology at Helsinki–Vantaa Airport: Runway no.3 [Report]. - Helsinki : Roadscanners, 2001.