

**ILOŚCIOWA OCENA MOŻLIWOŚCI I DOKŁADNOŚCI WYZNACZANIA  
GRUBOŚCI WARSTW KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI DRÓG  
Z ZASTOSOWANIEM APARATURY GEORADAROWEJ RAMAC/GPR**

**QUANTITATIVE EVALUATION OF THE POSSIBILITY AND ACCURACY OF  
DETERMINATION OF ROAD STRUCTURE LAYERS THICKNESS WITH THE  
USE OF RAMAC/GPR GEORADAR EQUIPMENT**

**Lukasz Ortyl**

Katedra Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa, Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: Georadar, radargram, grubość warstwy konstrukcji nawierzchni drogowej

STRESZCZENIE: W artykule przedstawiono wyniki prac testowych, które wykonano georadarem RAMAC/GPR na nowobudowanym odcinku trasy drogowej o parametrach drogi ekspresowej. Ich celem była ilościowa ocena możliwości i dokładności wyznaczenia grubości warstw konstrukcji nawierzchni drogowych w sposób bezinwazyjny tj. z wykorzystaniem metody georadarowej. Pomiar georadarowy realizowano każdorazowo w trakcie formowania poszczególnych warstw konstrukcyjnych drogi dzięki czemu pozyskano unikalny i wysoce wiarygodny materiał badawczy. W procesie obliczeniowo-porównawczym wykorzystano informacje z częściowych odwiertów kalibracyjnych realizowanych przez wykonawcę drogi oraz z pomiarów geodezyjne (niwelacja) prowadzonych przez autora. W artykule położono również istotny nacisk na zagadnienie właściwego przetwarzania pozyskanych danych georadarowych w celu wyznaczenia grubości poszczególnych warstw konstrukcji nawierzchni drogowych. Jest to związane z tym, iż pomiar grubości warstw na radargramie nie może odbywać się w sposób bezpośredni ponieważ konstrukcję nawierzchni tworzą warstwy o różnych prędkościach fali czego nie można uwzględnić w bezpośrednim przetworzeniu obrazu georadarowego i uzyskany wynik będzie błędny. Proces prawidłowego zeskalowania wyników georadarowych możliwy jest jedynie w oparciu o wektoryzację i kalibrację poszczególnych rozpoznanych warstw konstrukcji nawierzchni drogi. Takie przekształcenie wymaga użycia odpowiednich zaawansowanych funkcji programów do postprocessingu danych radarowych a wtedy uzyskany wynik jest w pełni wiarygodny.

## **1. WPROWADZENIE**

Publikacje zagraniczne i nieliczne krajowe, przedstawiają możliwości stosowania metody georadarowej w zakresie prac inżynierskich realizowanych w dziedzinie drogownictwie. W Stanach Zjednoczonych, jak podaje Federalna Administracja Autostrad (Federal Highway Administration), aż 33 drogowe agencje stanowe stosują pomiary georadarowe w zakresie kontroli warstw nawierzchni i drogowych obiektów inżynierskich (Morey, 1998). W Finlandii metodę georadarową uznano za oficjalny sposób kontroli dróg.

W Szwecji, Wielkiej Brytanii i innych krajach Europy Zachodniej metoda georadarowa rekomendowana jest w kontroli jezdni istniejących i realizowanych (Saarenketo i Scullion, 2000), (Hugenschmidt, 2002). Pomiar georadarowy stanowi zazwyczaj część składową szeregu pomiarów służących ocenie stanu nawierzchni. Wyniki pomiarów georadarowych porównywane są z rezultatami innych technik takich jak np. FWD (Falling Weight Deflectometr) czyli ugięciomierz dynamiczny.

Na podstawie pomiarów georadarowych lokalizowane są miejsca zmian w przebiegu warstw konstrukcji nawierzchni drogowej oraz szacowana jest ich grubość. Zagadnienie wyznaczenia rzeczywistej grubości warstw jest zadaniem trudnym w realizacji.

Producenci aparatury georadarowej często oferują gotowe systemy pomiarowe, które zostały przygotowane bezpośrednio do pracy w zakresie badania stanu konstrukcji nawierzchni drogowych np. RoadScan system firmy Geophysical Survey Systems, Inc. Systemy te dedykowane są dla jednostek publicznej administracji drogowej. Są to systemy mobilne umieszczone na samochodach i służą przede wszystkim badaniom długich odcinków drogowych. W kraju zagadnieniem tym zajmują się obecnie nieliczne jednostki posiadające na swym wyposażeniu aparaturę georadarową między innymi Laboratorium Drogowe w Poznaniu (aparatura RAMAC/GPR, anteny gruntowe 500 MHz i 1000 MHz), oraz Instytut Badawczy Dróg i Mostów (Penetroradar ARC a od niedawna także system firmy Geophysical Survey Systems, Inc., anteny powietrzne). Często jednak istnieje potrzeba wykonania rozpoznania dróg na mniejszą skalę gdzie prace mogą wykonać firmy posiadające niemobilne jednostki radarowe. Jednakże stopień szerszego udostępniania wyników opracowań i oceny skuteczności metody w zakresie badań konstrukcji jezdni, przez wcześniej wymienione instytucje krajowe, jest niezadowolający. Problem jest o tyle istotny iż firm takich pojawia się na rynku krajowym coraz więcej i dysponują one sprzętem georadarowym różnych producentów.

Generalna zasada realizacji pomiarów georadarowych na drogach i ich interpretacji pozostaje niezmienna bez względu na typ i rodzaj aparatury georadarowej. Oczywiście różny rodzaj aparatury georadarowej (producent, rodzaj stosowanych anten) będzie miał pewien wpływ na uzyskany wynik rozpoznania warstw konstrukcji nawierzchni drogowych. Natomiast oprócz parametrów sprzętu pomiarowego istotny aspekt w procesie odpowiedniego przetwarzania i interpretacji wyników rozpoznania warstw konstrukcji nawierzchni drogowej stanowi właściwy dobór procedur i parametrów filtracji obrazów georadarowych oraz doświadczenie i wiedza interpretatora. Zagadnienie to omówiono szeroko w pozycji Ortyl, 2007a.

Inny aspekt pomiarów georadarowych na drogach to zagadnienie wyznaczenia grubości poszczególnych warstw konstrukcji nawierzchni. W celu właściwej oceny grubości warstw nawierzchni drogowych wykonywane są odwierty kontrolne, na podstawie których kalibrowany jest wynik pomiaru radarowego. Zdaniem jednej z brytyjskich firm o bardzo dużym doświadczeniu w stosowaniu metody georadarowej w drogownictwie dokładność lokalizacji warstw zwięzłych to 8% a dla warstw niezwiązanych 15% ich grubości (na podstawie materiałów firmy Aperio). Wyniki te odnoszą się do pomiarów realizowanych systemem firmy Geophysical Survey Systems, Inc. SIR 10H i anteny ekranowanej gruntowej 900 MHz. Skuteczność metody georadarowej szacowano na 80-90% pod warunkiem posiadania odwiertów kalibracyjnych. Odwierty te realizuje się na testowanych odcinkach; w obszarze miejskim co 5 km, w obszarze zamiejskim, co 10 km.

W roku 2000 firma Aperio realizowała pomiary georadarowe we współpracy z Laboratorium Drogowym z Poznania na odcinku autostrady A4 Kraków - Katowice.

Opracowanie wykonane na Uniwersytecie w Kentucky (Willett i Rister, 2002) dla anteny 1000 MHz, tzw. powietrznej i systemu SIR 10B tej samej firmy podaje dokładność pomiaru grubości warstw przy wykorzystaniu częścię stosowanych odwiertów kalibracyjnych na poziomie nawet 3%. W artykule tym prezentowane są również wyniki uzyskane w ramach prac tym sprzętem innych jednostek badawczych, takich jak Teksas Transportation Institute. Infrasense Inc. prezentuje wyniki bliższe wynikom firmy Aperio tj. około 8% dla warstw zwięzłych.

Niniejszy artykuł stanowi odniesienie do tych problemów i jest kontynuacją badań opisanych w pozycji Ortyl, 2007a w ujęciu ilościowym. Prezentuje wyniki pomiarów, które zrealizowano georadarem RAMAC/GPR CU II oraz ich opracowanie dla oceny możliwości i dokładności wyznaczania grubości warstw konstrukcji nawierzchni dróg. Pomiary georadarowe realizowano w trakcie formowania poszczególnych warstw konstrukcyjnych drogi dzięki czemu pozyskano unikalny i wysoce wiarygodny materiał badawczego. Przedstawiono równocześnie metodykę przetwarzania ilościowego danych georadarowych w zakresie drogownictwa.

## **2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA BUDOWY KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI DROGOWYCH**

Konstrukcja jezdni jest to układ warstw ułożonych na naturalnym lub ulepszonym podłożu gruntowym (Kukielka i Szydło, 1986). Służy ona przejmowaniu i przenoszeniu obciążeń pochodzących od pojazdów i innych czynników zewnętrznych tak, aby zapewnić trwałość drogi. Konstrukcja danej drogi będzie zależna od kategorii ruchu. W naszym kraju wyróżnia się 6 takich kategorii (Piłat i Radziszewski, 2004). W ramach tych kategorii występuje kilka rodzajów typowych konstrukcji drogowych. Pomimo tej różnorodności prezentują one pewien ogólny schemat (Rys. 1).

Warstwa ścieralna		Nawierzchnia
Warstwa wiążąca		
Podbudowa zasadnicza	Podbudowa	Podłoże
Podbudowa pomocnicza		
Podłoże ulepszone		

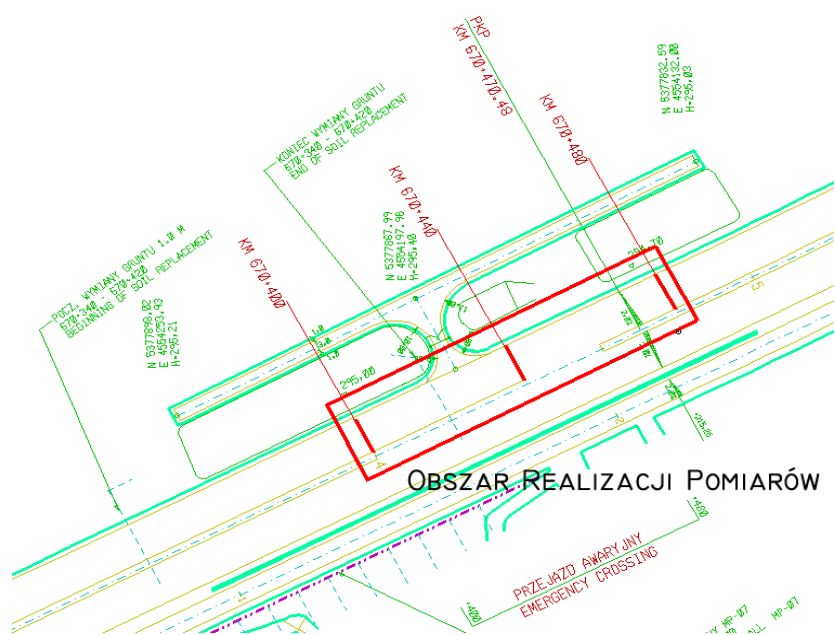
Rys. 1. Schemat konstrukcji nawierzchni (wg. Piłat i Radziszewski, 2004)

Konstrukcję nawierzchni tworzy warstwa ścieralna, warstwa wiążąca oraz podbudowa. Warstwa ścieralna jest to wierzchnia warstwa nawierzchni, poddana bezpośredniemu oddziaływaniu ruchu i czynników atmosferycznych. Warstwa wiążąca jest warstwą znajdującą się między warstwą ścieralną a podbudową zapewniającą lepsze rozłożenie naprężeń w nawierzchni i przekazywanie ich na podłoże. Podbudowa drogi składa się z części zasadniczej i pomocniczej. Podbudowa zasadnicza może zawierać warstwę wzmacniającą nawierzchnie oraz warstwę wyrównawczą korygującą nierówności warstw podbudowy pomocniczej. Podbudowa pomocnicza poza funkcją wzmocnienia nośności drogi spełnia dodatkowo funkcje zabezpieczenia nawierzchni przed działaniem wody, mrozu i migracji cząstek podłoża poprzez tzw. warstwy: mrozoochronną,

odsączającą i odcinającą. Ostatnią warstwę tworzy podłoże, które może być naturalne lub ulepszone, jeśli warstwa naturalna nie spełnia wymagań określonych dla podłoża. Poszczególne warstwy nawierzchni oraz podłoża ulepszonego realizowane są z zastosowaniem różnych materiałów określonych w projekcie technicznym drogi. Podłoże ulepszone bardzo często budowane jest z popiołów lotnych, lekkich kruszyw i żużłów. Podbudowa może być zrealizowana z materiałów bitumicznych (zazwyczaj beton asfaltowy), kruszyw (naturalne, łamane, żużel wielkopieczowy, tłuczeń kamienny), spoiw hydraulicznych (wapno, cement, popioły lotne) oraz betonu. Warstwa wiążąca i ścierna wykonywana jest z mieszanek mineralno-asfaltowych (beton asfaltowy, mastyks grysowy, asfalt lany).

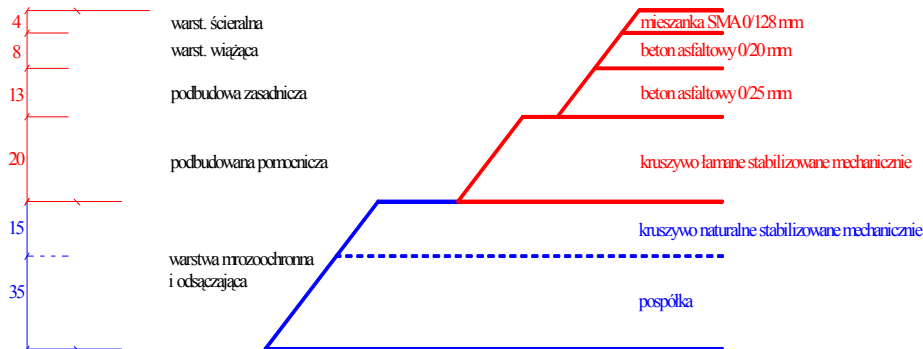
### 3. CHARAKTERYSTYKA BAZY TESTOWEJ

Pomiary testowe zrealizowano na nowobudowanym odcinku drogi krajowej S7 Myślenice – Pcim w 2006. Zakres prac na tym odcinku obejmuje budowę drogi dwujezdniowej o parametrach drogi ekspresowej (kategoria ruchu KR 5). Inwestycja obejmowała odcinek 16,2 km, w tym obwodnicy Lubnia o długości 4,0 km, trzech węzłów drogowych dwupoziomowych (Stróża, Pcim, Lubień), ponad 80 obiektów mostowych, 6,5 km murów oporowych, prawie 20 km dróg dojazdowych, 5 skrzyżowań dwupoziomowych oraz urządzeń ochrony środowiska. Rejon realizacji prac testowych obejmował odcinek pojedynczego pasa jezdni długości 80 m od 670+400 do 670+480 kilometrażu drogi (Rys. 2).



Rys. 2. Lokalizacja obszaru testowego

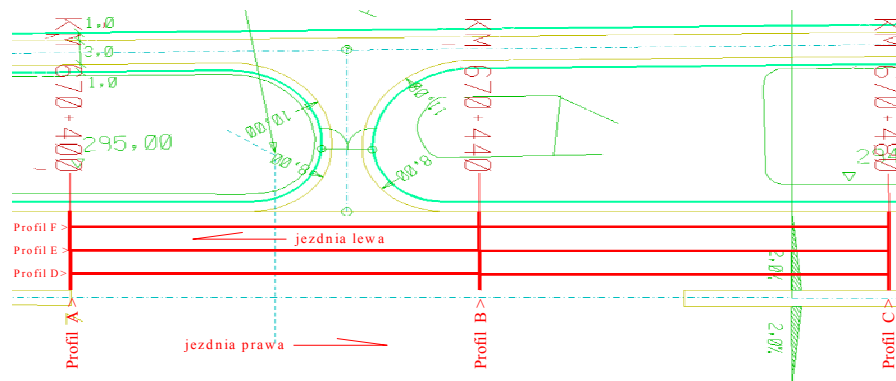
Na całej długości inwestycji droga S7 posiada projektową konstrukcję nawierzchni przedstawioną na Rys. 3.



Rys. 3. Konstrukcja nawierzchni głównej drogi S7

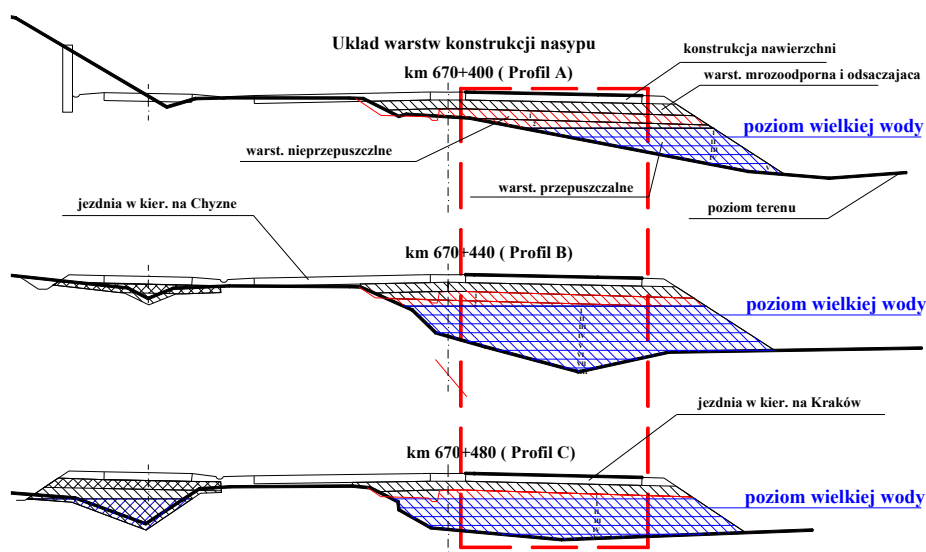
W zakresie odcinka testowego warstwa mrozoodporna i odsączająca, wykonane są w całości z żużla wielkopieczowego o frakcji 0/150, który posiada właściwości wyższe niż proponowana w projekcie pospółka. Warstwa ta nie leży bezpośrednio na rodzimym gruncie. W znacznym zakresie budowanej drogi realizowane jest odhumusowanie i formowanie nasypu. Nasyp ten stanowi podłoże ulepszone pod konstrukcję nawierzchni. Ze względu na bardzo bliskie sąsiedztwo rzeki Raby, podłoże ulepszone formowane jest z warstw przepuszczalnych do 0,5 m ponad tzw. poziom wielkiej wody, czyli najwyższy stan rzeki notowany na tym obszarze w ciągu ostatnich 100 lat. Warstwy podłoża ulepszonego nad poziomem wielkiej wody formowane są z warstw nieprzepuszczalnych. Warstwy przepuszczalne formowane są z żużla wielkopieczowego o frakcji 0/350 lub pospółki 0/60 -0/80. Warstwa nieprzepuszczalna to żużel 0/16. Jak wynika z opisu, materiał tworzący nasyp drogi wykonany jest z podobnego materiału a różniącego się jedynie grubością ziaren.

Na odcinku testowym pomiary doświadczalne wykonano na trzech profilach poprzecznych i podłużnych. Sytuacyjny rozkład profili pomiarowych realizowanych na odcinku testowym przedstawiono na Rys. 4.

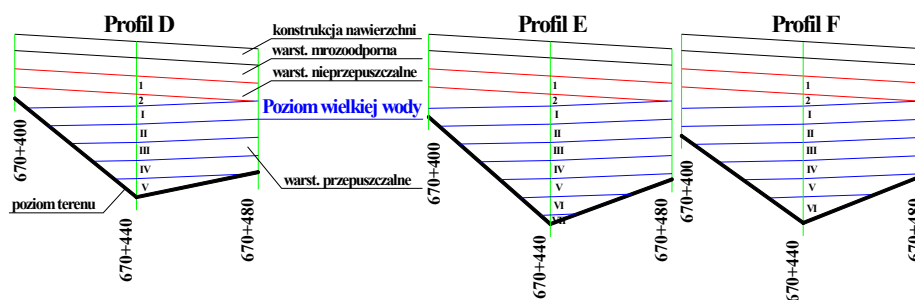


Rys. 4. Rozkład, oznaczenie i kierunek profili georadarowych na odcinku testowym

Profile poprzeczne A, B, C realizowano dokładnie na kilometrażu 670+400, 670+440 i 670+480. Szerokość pojedynczego pasa jezdni wynosi w przypadku tej drogi 10 m. Profile podłużne D, E, F wykonano odpowiednio na 2, 5 i 8 metrze licząc od wewnętrznej krawędzi jezdni. Na Rys. 5 przedstawiono poszczególne przekroje poprzeczne i rozkład warstw konstrukcji nasypu od podłoża naturalnego poprzez podłoże ulepszone aż do konstrukcji nawierzchni. Na Rys. 6 przedstawiono poszczególne przekroje podłużne i rozkład warstw konstrukcji nasypu od podłoża naturalnego poprzez podłoże ulepszone aż do konstrukcji nawierzchni.



Rys. 5. Rozkład Układ warstw konstrukcji nasypu na profilach poprzecznych w obszarze prac testowych



Rys. 6. Układ warstw konstrukcji nasypu na profilach podłużnych w obszarze prac testowych

Każda z wyróżnionych na przekrojach warstw podbudowy posiada pełną grubość 0,5 m a konstrukcja nawierzchni 0,45 m. W obszarze realizacji pomiarów głębokość podłoża

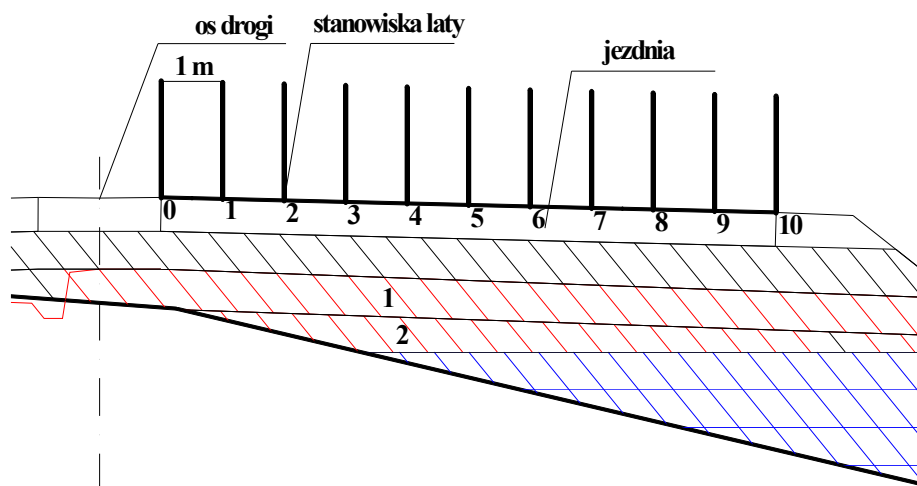
naturalnego względem górnego poziomu nawierzchni jest zmienna i przyjmuje wartości w przedziale od 1,5 m do 5 m.

#### **4. PROBLEMATYKA BADAWCZA, METODYKA DOŚWIADCZEŃ I ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW**

Różnorodność materiałów z których zbudowana jest konstrukcja nawierzchni drogowej determinuje możliwości stosowania metody radarowej w ich identyfikacji i pomiarze grubości. Przedstawione w pracy Ortyl, 2007a wyniki oceny jakościowej wskazały na wysoką skuteczność rozpoznania warstw z wykorzystaniem anteny 1000 MHz. W oparciu o pomiar georadarowy wykonany anteną 1000 MHz dokonano ilościowej oceny wyznaczenia grubości rozpoznanych warstw metodą georadarową. Najważniejsze parametry nastawcze pomiaru anteną 1000 MHz to: częstotliwości próbkowania sygnału 20000MHz, interwał zapisu śladów 3 cm, liczbie złożów dwukrotna okno czasowe 25 ns.

Pomiar grubości warstw na radargramie nie może odbywać się w sposób bezpośredni ponieważ konstrukcję nawierzchni tworzą warstwy o różnych prędkościach, fali czego nie można uwzględnić w bezpośrednim przetworzeniu obrazu radarowego i uzyskany wynik będzie błędny. Proces prawidłowego zeskalowania wyników radarowych możliwy jest jedynie w oparciu o wektoryzację i kalibrację poszczególnych rozpoznanych warstw konstrukcji drogi. Takie przekształcenie wymaga użycia odpowiednich zaawansowanych funkcji programów do postprocessingu danych radarowych. W wyniku wektoryzacji otrzymuje się czas rejestracji poszczególnych granic w danym obrazie, a następnie po uwzględnieniu właściwej prędkości w danej warstwie generowany jest wektorowy obraz konstrukcji nawierzchni drogi. Prędkość fali w danym ośrodku wyznacza się z wykorzystaniem odwiertów kontrolnych. Z odwiertu kontrolnego wyznacza się grubość danej warstwy a na podstawie radargramu wyznacza różnicę czasu jaki potrzebowała fala na przebycie tej odległości. Pomiar wykonany z zastosowaniem kalibracji poprzez odwierty kontrolne wykonane w całości poprzez wszystkie warstwy konstrukcji nawierzchni jest metodą najpewniejszą w aspekcie wyznaczenia właściwej prędkości fali w ośrodku. Na odcinku testowym autor nie dysponował możliwością pozyskania wyników takich odwiertów kontrolnych. Co prawda na odcinku realizacji pomiarów georadarowych wykonawca realizował odwierty kontrolne ale były one realizowane dla każdej warstwy bitumicznej osobno, w różnych miejscach obszaru testowego. Wykonawca nie realizuje odwiertów kontrolnych dla warstwy kruszywa łamanego. Problem rozwiązano poprzez zastosowanie pomiarów geodezyjnych a wyniki odwiertów kontrolnych realizowanych przez wykonawcę korelowały z wynikami uzyskanymi z niwelacji. Na profilu testowym A każdorazowo wykonywano pomiar niwelacyjny na powierzchni nowo wykonanej warstwy. Pomiar wykonywano niwelatorem kodowym DNA 03 i łąką kodową teleskopową w odniesieniu do zastabilizowanego jednoznacznie reperu odniesienia. Pomiar realizowano w odstępach metrowych licząc od początkowego punktu pasa całej jezdni (Rys. 7) uzyskując tym samym 11 punktów kalibracyjnych. Pomimo wykorzystania sprzętu pomiarowego o wysokiej precyzji, dokładność takich pomiarów grubości warstw nie jest szczególnie wysoka ponieważ trudno było zachować jednoznacznie to samo miejsce przyłożenia łąki po kolejno powstających warstwach. Uzyskany wynik pozwala jednak na uzyskanie kontroli grubości warstw a nie posługiwanie się jedynie wartością projektową,

która jak pokazują wartości uzyskane dla warstwy kruszywa łamanego nie zawsze zostaje zachowana.



Rys. 7. Schemat rozmieszczenia punktów pomiaru niwelacyjnych na pasie jezdni

W ten sposób uzyskano rzeczywiste grubości  $h_{Nk}$  wykonanych i rozpoznawanych w zapisie radarowym warstw konstrukcji jezdni. Symbol  $N$  oznacza numer warstwy:

- 1 - mieszanka SMA i beton asfaltowy 0/20
- 2 - beton asfaltowy 0/25
- 3 - kruszywo łamane

natomiast symbol  $k$  oznacza profil miejsca realizacji pomiaru  $k = 0, \dots, 10$ .

Uzyskane grubości wymienionych warstw rozpoznawanych na radargramie profilu A zestawiono w 0.

Tabela 1. Zestawienie grubości warstw konstrukcji jezdni w profilu testowym A wyliczone z pomiarów niwelacyjnych

$N/k$	$h_{Nk}$ [m]										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,125	0,124	0,128	0,124	0,127	0,120	0,121	0,126	0,124	0,125	0,128
2	0,137	0,134	0,139	0,135	0,130	0,128	0,118	0,119	0,115	0,115	0,136
3	0,164	0,202	0,217	0,212	0,207	0,188	0,169	0,201	0,190	0,194	0,202

Uzyskane wyniki dla dwóch pierwszych warstw korelują z wynikami odwiertów kalibracyjnych, które autor uzyskał od wykonawcy. W odwiertach dla warstwy SMA i BA 0/20 otrzymano wynik 0,049 m i 0,72 m czyli łącznie 0,121 m a dla BA 0/25 0,14 m. Uzyskane wyniki mieszczą się w zakresie odchyłki dopuszczalnej przewidzianej dla warstw bitumicznych, która wynosi  $\pm 0,01$  m (Gocał, 2005). Na podstawie radargramów wykonywanych na profilu A po realizacji kolejnej warstwy konstrukcji jezdni wyznaczono w punktach kontrolnych czas  $t_{(N/N+1)k}$  rejestracji wszystkich rozpoznanych na danym obrazie granic. Wyniki zestawiono w 0.



Tabela 2. Zestawienie czasu rejestracji poszczególnych granic warstw wyznaczonych na radargramach profilu A realizowanego po ułożeniu kolejnych warstw konstrukcji jezdni

N/k	$h_{Nk}$ [m]										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,125	0,124	0,128	0,124	0,127	0,120	0,121	0,126	0,124	0,125	0,128
2	0,137	0,134	0,139	0,135	0,130	0,128	0,118	0,119	0,115	0,115	0,136
3	0,164	0,202	0,217	0,212	0,207	0,188	0,169	0,201	0,190	0,194	0,202

Na podstawie wyznaczonych niwelacyjnie grubości warstw i różnic czasu  $\Delta t_{Nk}$  pomiędzy rejestracjami kolejnych granic obliczono prędkość fali w poszczególnych warstwach z zależności:

$$v_{Nk} = \frac{2 \cdot h_{Nk}}{\Delta t_{Nk}} \quad (1)$$

gdzie:

$$\Delta t_{Nk} = t_{(N/N+1)k} - t_{(N-1/N)k} \quad (2)$$

Wyniki obliczeń prędkości uzyskanych w zakresie każdego z punktów kalibracyjnych profilu A otrzymanych po ułożeniu kolejnej warstw zestawiono w 0. Ostateczną wartość prędkości fali w danej warstwie wyliczono jako średnią z 11 obserwacji. Jej wartość oraz odchylenie standardowe zestawiono w dwóch ostatnich kolumnach 0. W przypadku pomiaru na warstwie 1 dla granicy 2/3 otrzymano dwa zdecydowanie rozbieżne wyniki wyliczonej prędkości (pogrubienie), które odrzucono przy obliczeniach wartości średniej.

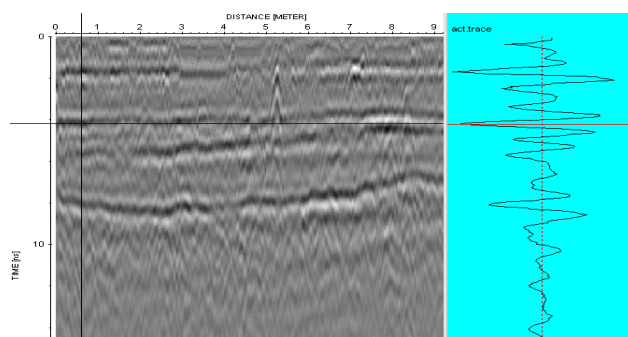
Tabela 3. Zestawienie prędkości fali w poszczególnych warstwach wyznaczonej na punktach kalibracyjnych w profilu A

N		$v_{Nk}$ [m/ns]										$v_N$ [m/ns]	$\sigma_v$ [m/ns]	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			10
warst. 3	gran. 3/4	0,121	0,124	0,118	0,119	0,123	0,121	0,120	0,118	0,124	0,121	0,116	0,120	±0,003
warst. 2	gran. 2/3	0,137	0,138	0,143	0,135	0,144	0,147	0,147	0,148	0,149	0,149	0,140	0,143	±0,005
	gran. 3/4	0,107	0,102	0,110	0,109	0,105	0,102	0,101	0,104	0,101	0,097	0,116	0,105	±0,005
warst. 1	gran. 1/2	0,135	0,138	0,138	0,133	0,137	0,147	0,148	0,140	0,133	0,148	0,136	0,139	±0,006
	gran. 2/3	0,107	0,127	<b>0,140</b>	0,117	0,126	0,112	0,116	<b>0,139</b>	0,133	0,114	0,119	0,117	±0,007
	gran. 3/4	0,096	0,100	0,104	0,111	0,0111	0,096	0,94	0,103	0,101	0,099	0,011	0,102	±0,006

Na podstawie zestawionych wyników zauważa się, iż przybycie kolejnej warstwy konstrukcji wpływało na czas rejestracji granic warstw już występujących. Zmiany czasu rejestracji w przypadku warstwy 2 i 3 powodowały spadek wartości prędkości w stosunku

do pomiaru bezpośredniego na danej warstwie o około 0,02 m/ns. Wynik ten jest bardzo ważną informacją ponieważ wskazuje, iż kalibracja wyników poprzez jakiegokolwiek dane tabelaryczne powoduje wzrost błędów wyznaczenia głębokości. W procesie oceny grubości jakiegokolwiek struktur warstwowych rejestrowanych w pomiarze georadarowym konieczna jest realizacja odwiertów kontrolnych, na podstawie których obliczona zostanie prędkość kalibracyjna poszczególnych ośrodków.

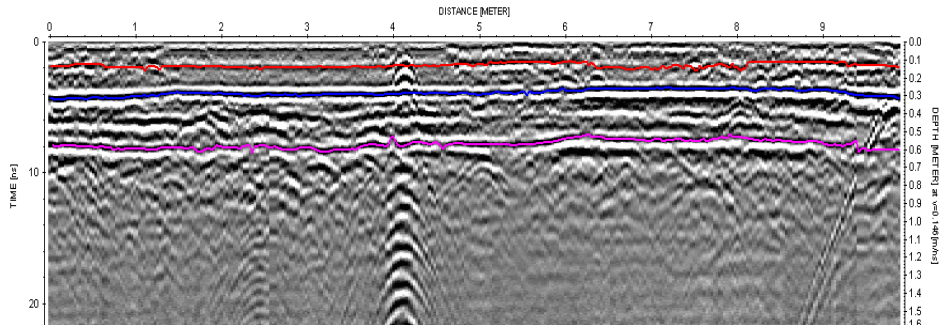
Wartości prędkości poszczególnych warstw uzyskane na profilu A w pomiarze wykonanym na powierzchni ścieralnej wykorzystano do kalibracji pozostałych radargramów. Dla wszystkich profili wykonanych na warstwie ścieralnej wykonano wektoryzację rozpoznanych warstw. Wektoryzację warstw przeprowadzono w oparciu o kryterium maksymalnej mocy sygnału w falce będącej zapisem momentu rejestracji granicy poszczególnych warstw (Rys. 8).



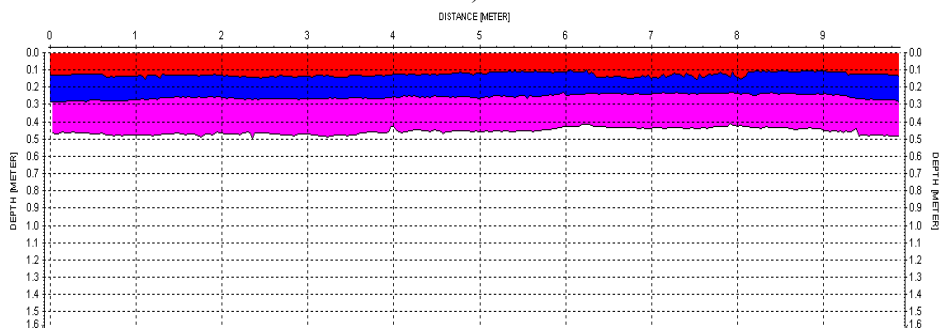
Rys. 8. Rozkład amplitudy sygnału w zakresie rejestrowanych granic na przykładzie pojedynczej trasy

Poprzez kalibrację danych z użyciem wspomnianych prędkości uzyskano model przebiegu i grubości warstw na każdym z profilowanych przekrojów drogi. Wyniki przedstawiono w postaci obrazów zestawionych na Rys. 9. Kolor czerwony oznacza warstwę SMA i BA 0/20 (warstwa ścieralna i wiążąca), niebieski BA 0/25 (podbudowa zasadnicza) a fioletowy warstwę kruszywa łamanego.

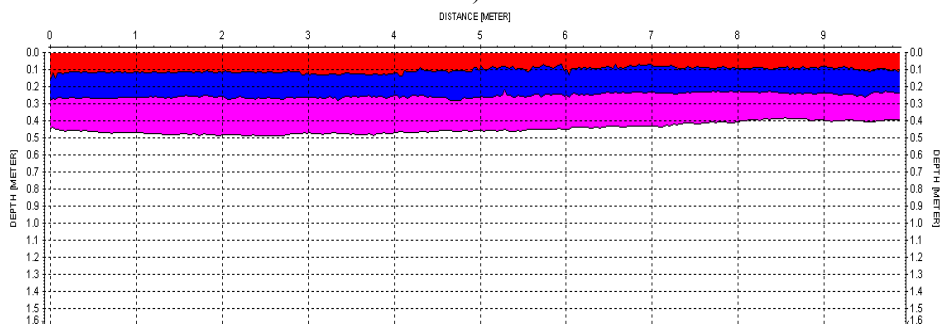
*Ilościowa ocena możliwości i dokładności wyznaczania grubości warstw konstrukcji nawierzchni dróg z zastosowaniem aparatury georadarowej RAMAC/GPR*



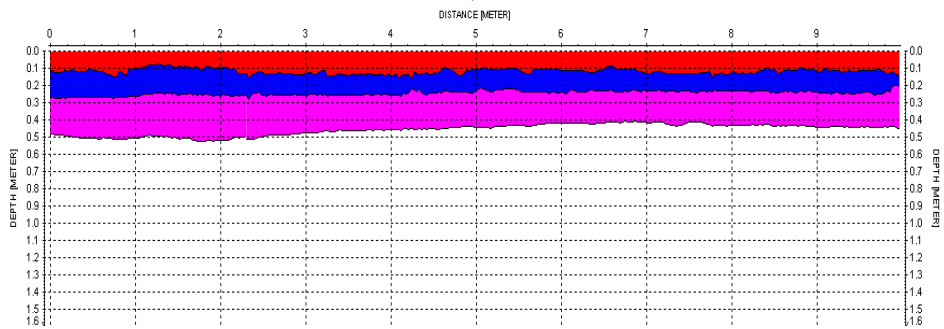
a)



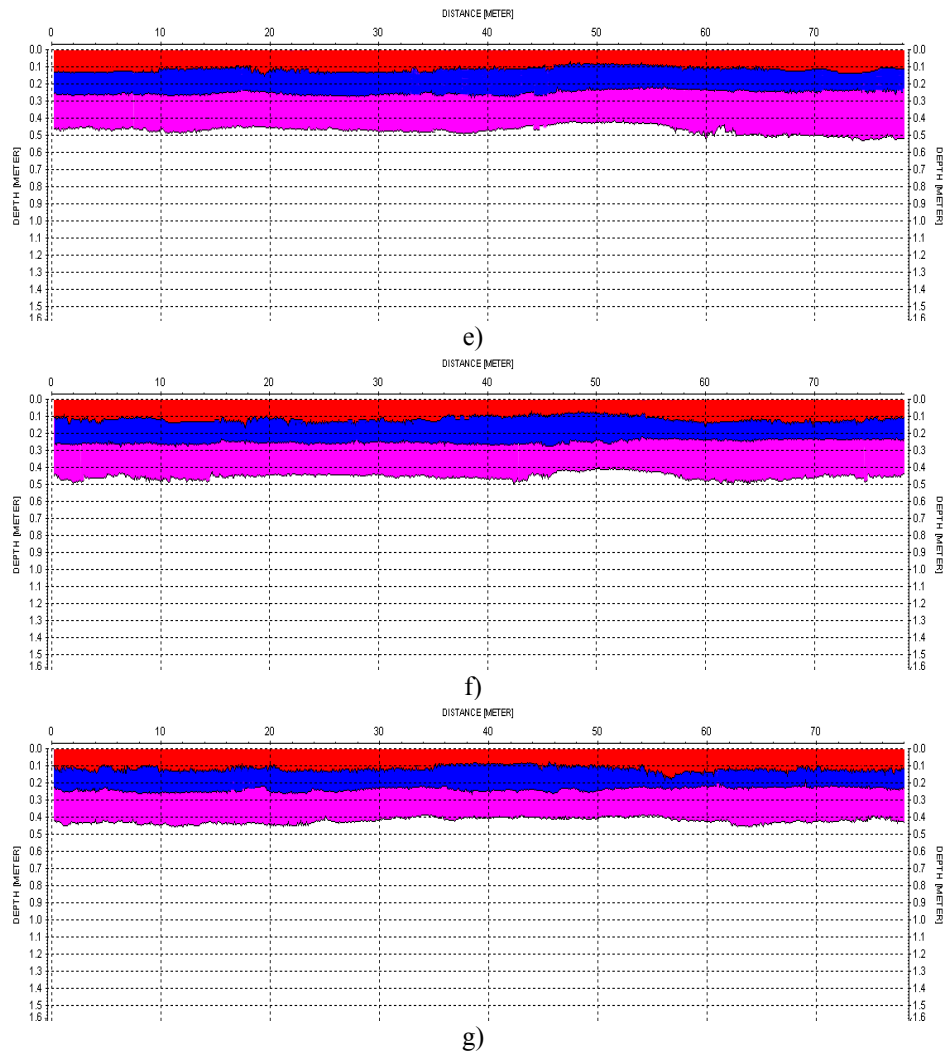
b)



c)



d)



Rys. 9. Zestawienie modelu przebiegu i grubości warstw wyznaczonych anteną 1GHz na profilach wykonanych na poziomie warstwy ścierniczej:  
a) przykład typowego wyniku wektoryzacji warstw,  
b) profil A,  
c) profil B,  
d) profil C,  
e) profil D,  
f) profil E,  
g) profil F

Przedstawione w formie graficznej wyniki pomiarów warstw konstrukcji nawierzchni uzyskane metodą georadarową wykazują zmienny charakter ich grubości. Jest to widoczne w zakresie pojedynczych profili jak i wzajemnie na kolejnych przekrojach. Ilościową ocenę wyników przeprowadzono na podstawie liczbowego zapisu rezultatów wektoryzacji i kalibracji pomiarów. Wykorzystując funkcje programu ReflexW informacje te zapisano w pliku tekstowym stanowiącym raport o głębokości rejestracji poszczególnych granic na każdym śladzie w profilu. Na podstawie pozyskanych wartości liczbowych dokonano porównania grubości i głębokości występowania danej warstwy w punktach wspólnych profili poprzecznych i podłużnych, uzyskując tym samym 27 punktów kontrolnych. Punkty wspólne dla profili poprzecznych to 2, 5, 8 metr, zaś na profilach podłużnych to początek, koniec i punkt na 40 m długości profilu. Dla pomiarów podłużnych pomimo poprawnej kalibracji kółka pomiarowego odnotowano niedomiar długości rzędu 2% na 1 mb profilu. Dane skorygowano zgodnie z zasadami przedstawionymi w pozycji Gocał i inni, 2007. Autor nie jest w stanie ocenić przyczyn niedomiaru zwłaszcza, że kółko pomiarowe w pomiarach testowych przedstawionych w pozycji Gocał i inni, 2007 wykazywało wysoką powtarzalność wyniku a dla profili poprzecznych długości 10 m wartość niedomiaru była zaniedbywalna.

W 0 zestawiono wartości głębokości przebiegu  $d_{(N/N+1)m}$  i grubości warstw  $h_{PNm}$  odczytane na poszczególnych punktach wspólnych profilu. Symbol  $m$  oznacza nazwę profilu od A do E. Dokładnie wartość ta jest średnią arytmetyczną wyznaczoną na podstawie danych uzyskanych w zakresie 5 kolejnych śladów w rejonie punktu przecięć profili. Powtarzalność rejestracji na poszczególnych punktach przecięć oceniono na podstawie wartości różnic  $\Delta d$  i  $\Delta h$ , które również zestawiono w 0.

Tabela 4. Zestawienie głębokości przebiegu i grubości warstw oraz ich różnic uzyskanych na punktach przecięcia profili poprzecznych i podłużnych

	$h_{PNm}$ [cm]		$\Delta h$ [cm]	$d_{(N/N+1)m}$ [cm]		$\Delta d$ [cm]	$h_{PNm}$ [cm]		$\Delta h$ [cm]	$d_{(N/N+1)m}$ [cm]		$\Delta d$ [cm]
	Pr. A	Pr. D		Pr. A	Pr. D		Pr. A	Pr. E		Pr. A	Pr. F	
1	13,3	13,0	0,3	13,3	13,0	0,3	12,0	10,7	1,3	12,0	10,7	1,3
2	11,9	11,7	0,2	25,2	24,8	0,4	13,5	14,3	-0,8	25,5	25,5	0,0
3	20,7	21,0	-0,3	45,9	45,8	0,1	19,4	18,8	0,6	44,8	43,8	1,0
	Pr. B	Pr. D		Pr. B	Pr. D		Pr. B	Pr. E		Pr. B	Pr. F	
	A	D		A	D		A	E		A	E	
1	11,4	11,4	0,0	11,4	11,4	0,0	9,6	10,0	-0,4	9,6	10,0	-0,4
2	14,1	14,3	-0,2	25,5	25,7	-0,2	15,7	15,7	0,0	25,3	25,3	0,0
3	22,3	21,4	0,9	47,8	47,1	0,7	19,7	20,0	-0,3	45,0	45,3	-0,3
	Pr. C	Pr. D		Pr. C	Pr. D		Pr. C	Pr. E		Pr. C	Pr. F	
1	9,8	11,3	-1,5	9,8	11,3	-1,5	10,4	10,7	-0,3	10,4	10,7	-0,3
2	15,2	12,8	2,4	25,0	24,1	0,9	11,7	12,3	-0,6	22,1	23,0	-0,9
3	26,1	27,1	-1,0	51,0	51,2	-0,2	21,6	20,7	0,9	43,7	43,6	0,1

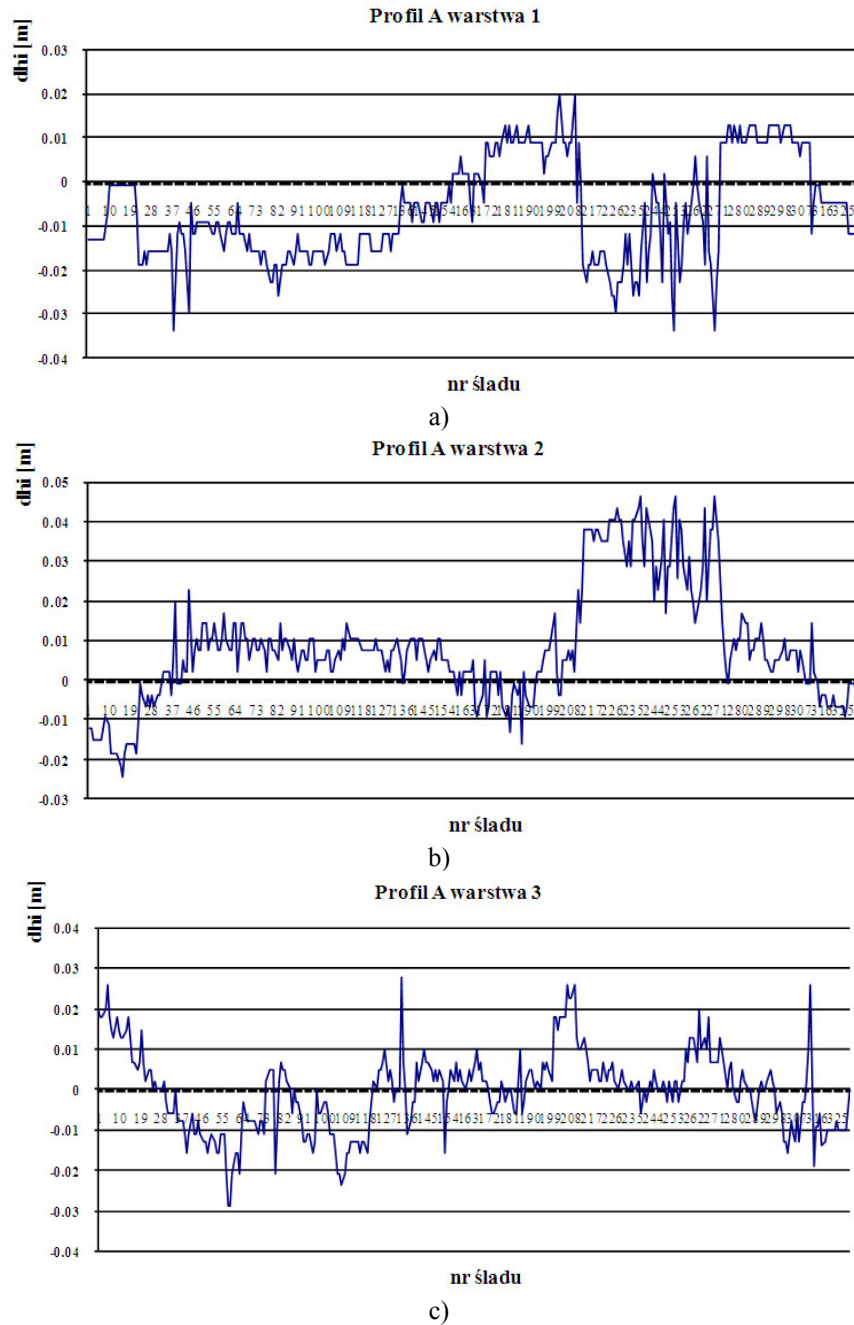
Na podstawie bezwzględnych wartości uzyskanych różnic wyznaczono wartość średnią  $\Delta d_{sr}$  i  $\Delta h_{sr}$ , która dla grubości warstw wyniosła 0,01 m dla głębokości 0,006 m. Uzyskany wynik wskazuje na wysoką powtarzalność rezultatów profilowań radarowych uzyskanych dla danego miejsca na dwóch niezależnych profilach pomiarowych. Potwierdza to stabilność pracy systemu w zakresie pomiaru czasu rejestracji, którą wykazano w publikacji Ortyl, 2007b.

W kolejnym kroku ocenie poddano dokładność rejestracji anteną 1000 MHz grubości warstw w zakresie całych profili. Uzyskane w wyniku wektoryzacji i kalibracji wartości odniesiono do wartości projektowych. Zgodność wartości projektowych ze stanem rzeczywistym potwierdziły w przypadku warstwy 1 i 2 zarówno pomiary niwelacyjne jak również odwierty kontrolne, które wykonawca zrealizował. Jak pokazują wyniki pomiarów niwelacyjnych grubość warstwy kruszywa łamanego już nie jest tak dobrze zachowana i odbiega od wartości projektowej. Z tego względu nie jest zaskoczeniem tak duża zmienność przebiegu tej warstwy w zapisie radarowym. Zmiany te wynikają przede wszystkim z braku płaskości na poziomie dolnym, na styku z warstwą mrozoochronną. Góra warstwy jest układana z pomocą rozkładarki, za którą kontrolowana jest jej równość w stosunku do rzędnej wysokościowej właściwej dla warstwy ścieralnej w tym miejscu drogi. Dokładność wykonania tej warstwy w zakresie rzędnej wysokościowej szacowana jest na poziomie  $1 \div 2$  cm (Gocał, 2005).

Dla wszystkich obserwacji wyznaczonych w zakresie poszczególnych profili (profile poprzeczne  $\sim 330$  śladów, profile podłużne  $\sim 2660$ ) obliczono grubość średnią  $h_{srNm}$  każdej warstwy oraz różnice  $\Delta h_i$  pomiędzy grubością projektową  $h_t$  warstwy a grubością wyznaczoną z pomiaru georadarowego  $h_i$ . Otrzymano tym samym wartości błędów pozornych:

$$v_i = \Delta h_i = h_t - h_i \quad (3)$$

Wartości różnic grubości warstw uzyskanych z pomiaru georadarowego względem wartości projektowych profilu zaprezentowano na wykresach przedstawionych na Rys. 10. Ze względu na dużą ilość danych wyniki przedstawiono jedynie dla danych z profilu A.



Rys. 10. Zestawienie różnic pomiędzy grubością projektową warstwy i grubością z pomiaru radarowego: a) Profil A warstwa 1, b) Profil A warstwa 2, c) Profil A warstwa 3

Na podstawie otrzymanych różnic dla każdego profilu obliczono odchylenie standardowe pomiaru grubości  $\sigma_{Nm}$ . Wartości  $h_{srNm}$  i  $\sigma_{hiNm}$  zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Zastawienie średnich grubości warstw  $h_{srNm}$  i  $\sigma_{Nm}$  dla każdego profilu oraz błędów średnich charakteryzujących odchylenie uzyskanych z pomiaru grubości poszczególnych warstw względem wartości projektowej

N/k	A		B		C		D		E		F	
	$h_{srNm}$ [m]	$\sigma_{hiNm}$ [cm]	$h_{srNm}$ [cm]	$\sigma_{hiNm}$ [cm]	$h_{srNm}$ [cm]	$\sigma_{hiNm}$ [cm]	$h_{srNm}$ [cm]	$\sigma_{hiNm}$ [cm]	$h_{srNm}$ [cm]	$\sigma_{hiNm}$ [cm]	$h_{srNm}$ [cm]	$\sigma_{hiNm}$ [cm]
1	0,127	±0,013	0,103	±0,023	0,117	±0,016	0,114	±0,016	0,116	±0,018	0,117	±0,017
2	0,122	±0,016	0,141	±0,016	0,121	±0,020	0,129	±0,013	0,127	±0,022	0,114	±0,023
3	0,200	±0,010	0,195	±0,023	0,212	±0,027	0,220	±0,030	0,200	±0,020	0,184	±0,024

## 5. WNIOSKI

Uzyskane anteną 1000 MHz systemu RAMAC/GPR wyniki profilowań konstrukcji drogi pozwalają sformułować następujące wnioski:

- średnia grubość poszczególnych warstw konstrukcji drogi rozpoznawana pomiarem przyjmuje wartości zbliżone do projektowych w granicach tolerancji wykonania danej warstwy,
- uzyskany wynik pomiaru grubości warstw bitumicznych około 12 –13 cm jest w przypadku tej anteny realizowany z błędem średnim na poziomie ±0,017 m czyli 14% grubości projektowej,
- w przypadku warstwy kruszywa łamanego grubości 20 cm średni błąd wynosi ± 0,022 m co stanowi około 10% grubości projektowej warstwy,
- z przyczyn technicznych uzyskane wyniki odniesiono do wartości projektowej, a nie do wartości rzeczywistej, która sama w sobie zmienia swoją grubość na poziomie 6% ÷ 10% procent.

## 6. LITERATURA

- Gocał J., 2005. Geodezja inżynierska – przemysłowa cz II, *Uczelniane Wydawnictwo Naukowe – Dydaktyczne, AGH, Kraków*
- Gocał J., Ortyl Ł., Sołtys M., 2007. The investigation of selected factors that influence the situational accuracy of georadar measurements, *Geodesy, photogrammetry and monitoring of environment Polish Academy of Sciences – Cracow Branch; 43 Opis część. wg okł. — Na s. red. ISSN 0079-3299. — S. 31–41*
- Hugenschmidt J., 2002. One – to – one comparison between radar results and reality on a concrete bridge, *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International conference on Ground Penetrating Radar, Santa Barbara pp. 427-432*
- Kukielka J. i Szydło A., 1986. Projektowanie i budowa dróg, *Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa*
- Morey R., 1998. Ground penetrating radar for evaluating subsurface conditions for transportation facilities, *Synthesis of Highway Practice 255, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Academy Press*



Ortyl Ł., 2007a. An evaluation of the possibility of road structure layers detection with the use of RAMAC-GPR georadar equipment, *Geodesy, photogrammetry and monitoring of environment Polish Academy of Sciences – Cracow Branch; 43*). — Opis część. wg okł. — Na s. red. ISSN 0079-3299. — S. , [3]. — Bibliogr. s. 63.

Ortyl Ł., 2007b. Badanie przydatności metody georadarowej w geodezyjnej inwentaryzacji struktur i obiektów podpowierzchniowych. *Rozprawa doktorska, AGH Kraków*.

Piłat J., Radziszewski P., 2004. Nawierzchnie asfaltowe, *Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa*

Saarenketo T., Scullion T., 2000. Road evolution with ground penetrating radar, *Journal of Applied Geophysics, no. 43, pp. 119-138*

Willett D. A. i Rister B., 2002. Ground Penetrating Radar pavement layer thickness evaluation, *Research Raport, University of Kentucky*

Artykuł finansowany z badań statutowych AGH nr 11.11.150.005

#### **QUANTITATIVE EVALUATION OF THE POSSIBILITY AND ACCURACY OF DETERMINATION OF ROAD STRUCTURE LAYERS THICKNESS WITH THE USE OF RAMAC/GPR GEORADAR EQUIPMENT**

KEY WORDS: GPR, radargram, road structure, layers thickness

SUMMARY: The article presents results of an experimental work on the evaluation of the possibility of road structure layers detection with RAMAC/GPR equipment. Test work was carried out on the section of the road with the high-speed road parameters, which was under construction. The goal of the experimental work was the quantitative evaluation of the possibility and accuracy of determination of road structure layers thickness. The GPR measurements, carried out during the forming process of individual construction layers, gave a unique and reliable research material, which – because of the way of getting it – provided a basis for the work during the road operation. In the analytical and comparative process, information from partial calibration boreholes made by the road contractor and from geodetic measurement (levelling) made by author was used. Special emphasis was put in the paper on proper processing of GPR data. Measurement of the layer thickness cannot be carried in a direct way on radargrams because the roadway structure consists of layers of various wave velocities, which cannot be taken into account in direct processing of the GPR image. The process of correct scaling of GPR results is possible only through the vectorization and calibration of particular road structure layers. That conversion requires employing suitable advanced functions of GPR post-processing software, and then the obtained result can be fully reliable.

Dr inż. Łukasz Ortyl  
e-mail: lukasz.ortyl@agh.edu.pl  
tel. +12 6172299