

INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW
Zakład Diagnostyki Nawierzchni

SPRAWOZDANIE
z realizacji pracy pt.:
**„Ocena geotechniczna podłoża gruntowego techniką radarową
z szczególnym uwzględnieniem stanu hydrologicznego podłoża
gruntowego”.**

SPRAWOZDNIENIE KOŃCOWE

Zlecniodawca: Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad

Umowa nr 2190/2008 z dnia 11.08.2008 roku

Opracowali:

mgr inż. Jacek SUDYKA

dr inż. Cezary KRASZEWSKI

mgr inż. Przemysław HARASIM

wraz z zespołem:

Zakładu Diagnostyki oraz

Zakładu Geotechniki i Fundamentowania

Kierownik Zakładu

Diagnostyki Nawierzchni

mgr inż. Tomasz MECHOWSKI

Warszawa, listopad 2010

Spis treści

1	Wstęp.....	6
2	Przegląd istniejących zasad, metod badań i oceny podłoża gruntowego	7
2.1	Badania geofizyczne	8
2.2	Projektowanie geotechniczne w budownictwie	9
2.2.1	Ustalanie geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych	9
2.2.2	Ustalanie warunków gruntowo-wodnych podłoża nawierzchni drogowych	10
2.2.3	Projektowanie geotechniczne wg Eurokodu 7	11
2.3	Wnioski	13
3	Przegląd istniejących metod oceny podłoża gruntowego z wykorzystaniem techniki radarowej	14
3.1	Właściwości gruntów wpływające na jakość pomiarów radarowych.....	14
3.1.1	Przenikalność elektryczna	15
3.1.2	Przewodność	18
3.1.3	Magnetyczne parametry dielektryków	19
3.2	Rozdzielczość i głębokość penetracji.....	20
3.3	Metody pomiarowe	24
3.3.1	Profilowanie refleksyjne.....	26
3.4	Przetwarzanie danych.....	27
4	Opracowanie założeń do programu badań geotechnicznych i georadarowych... 	30
4.1	Główne założenia programu badań	30
4.1.1	Szczegółowy zakres badań geotechnicznych klasycznych.....	31
4.1.1.1	<i>Opracowanie dokumentacji geotechnicznej.....</i>	<i>32</i>
4.1.2	Zakres badań radarowych	32
5	Laboratoryjna ocena zdolności metody radarowej pod kątem możliwości pomiaru podstawowych cech dielektrycznych różnych rodzajów gruntów	33
5.1	Ocena wpływu zwiększonej wilgotności w gruntach na otrzymywany sygnał radarowy 33	
5.2	Analiza zdolności systemu pomiarowego oraz jego kalibracja na podstawie badań laboratoryjnych	40
5.3	Kalibracja systemu pomiarowego.....	43
6	Badania na wytypowanych odcinkach badawczych w okresie lato-jesień-zima-wiosna	44
7	Analiza porównawcza wyników badań podłoża gruntowego metodami klasycznymi i przy pomocy georadaru.	61
8	Opracowanie metodyki oceny geotechnicznej podłoża gruntowego z zastosowaniem techniki radarowej	68
9	Podsumowanie	70
	Bibliografia	72

Załącznik Wyniki badań geotechnicznych

Załącznik Echogramy z pomiarów radarowych

Spis ilustracji

Rysunek 2.1 Schemat wyboru wyprowadzonych wartości parametrów geotechnicznych	13
Rysunek 3.1 Diagram ilustrujący proces magazynowania/uwalniania energii, polaryzacja ładunków i powstawanie momentu dipolowego przy przejściu fali elektromagnetycznej przez materiał	17
Rysunek 3.2 Zjawisko relaksacji przenikalności wyidealizowanego dielektryka stratnego.	18
Rysunek 3.3 Diagram ilustrujący proces przewodzenia w materiale zawierającym ładunki wolne, takie jak aniony i kationy	19
Rysunek 3.4 Typowe wartości tłumienia fali w materiałach gruntowych i mieszankach magnetytu przy częstotliwościach 200-1200MHz.	20
Rysunek 3.5 Rozdzielczość pionowa Δv i pozioma Δh	21
Rysunek 3.6 Impulsy czasowe o szerokości $\frac{1}{2} W$	22
Rysunek 3.7 Rozdzielczość w funkcji częstotliwości emitowanej fali	24
Rysunek 3.8 Techniki pomiarowe GPR	25
Rysunek 3.9 Warianty ułożenia anten względem siebie i linii pomiarowej	26
Rysunek 3.10 Typowy schemat procesu przetwarzania sygnałów radarowych z pomiarów refleksyjnych	28
Rysunek 3.11 Określenie refleksu powierzchni przy pomocy testu podnoszenia wykonanego anteną groun-coupled o częstotliwości 200 MHz	29
Rysunek 4.1 Anteny typu groun-coupled	32
Rysunek 4.2 Pomiar z wykorzystaniem obu anten jednocześnie	33
Rysunek 5.1 Stanowisko badawcze	34
Rysunek 5.2 Pomiar piasku przed dolaniem wody	35
Rysunek 5.3 Pomiar po ustabilizowaniu się zwg na głębokości 59 cm	35
Rysunek 5.4 Pomiar po ustabilizowaniu się zwg na głębokości 39 cm	36
Rysunek 5.5 Pomiar po ustabilizowaniu się zwg na głębokości 20 cm	36
Rysunek 5.6 Pomiar po ustabilizowaniu się zwg na głębokości 0 cm	37
Rysunek 5.7 Oscyloskop sygnału przed i po dolaniu wody do komór	38
Rysunek 5.8 Oscyloskop sygnału po ustabilizowaniu się zwg. na głębokości 59 cm oraz pojedynczy skan z pomiaru piasku suchego	38
Rysunek 5.9 Oscyloskop sygnału po ustabilizowaniu się zwg. na głębokości 39 cm oraz pojedynczy skan z pomiaru piasku suchego	39

Rysunek 5.10 Oscyloskop sygnału po ustabilizowaniu się zwg. na głębokości 27 cm oraz pojedynczy skan z pomiaru piasku suchego	39
Rysunek 5.11 Oscyloskop sygnału po ustabilizowaniu się zwg. na głębokości 2 cm oraz pojedynczy skan z pomiaru piasku suchego	40
Rysunek 5.12 Ocena stabilności sygnału emitowanego przez pomiar sygnału tła	41
Rysunek 5.13 Ocena stabilności sygnału emitowanego	42
Rysunek 5.14 Test podnoszenia anteny nad blachą	42
Rysunek 5.15 Pręty $\varnothing$ 2mm na głębokości 0 cm i 50 cm.....	43
Rysunek 5.16 Ocena dokładności pomiaru - pomiar warstw piasku w stanie suchym, grubość warstwy 72 cm	43
Rysunek 6.1 Lokalizacja odcinka Płońsk	45
Rysunek 6.2 Profil geotechniczny odcinka Płońsk	45
Rysunek 6.3 Pomiary radarowe na odcinku Płońsk – seria I (lato).....	46
Rysunek 6.4 Pomiary radarowe na odcinku Płońsk – seria II (jesień)	47
Rysunek 6.5 Pomiary radarowe na odcinku Płońsk – seria III (zima)	48
Rysunek 6.6 Pomiary radarowe na odcinku Płońsk – seria IV (wiosna)	49
Rysunek 6.7 Lokalizacja odcinka Żąbki	50
Rysunek 6.8 Profil geotechniczny odcinka w Żąbkach	51
Rysunek 6.9 Pomiary radarowe na odcinku Żąbki -seria I (lato)	52
Rysunek 6.10 Pomiary radarowe na odcinku Żąbki -seria II (jesień)	53
Rysunek 6.11 Pomiary radarowe na odcinku Żąbki -seria III (zima)	54
Rysunek 6.12 Pomiary radarowe na odcinku Żąbki -seria IV (wiosna).....	55
Rysunek 6.13 Lokalizacja odcinka Soczewka	56
Rysunek 6.14 Profil geotechniczny odcinka Soczewka	56
Rysunek 6.15 Pomiary radarowe na odcinku Soczewka – seria I (lato)	57
Rysunek 6.16 Pomiary radarowe na odcinku Soczewka – seria II (jesień)	58
Rysunek 6.17 Pomiary radarowe na odcinku Soczewka – seria III (zima)	59
Rysunek 6.18 Pomiary radarowe na odcinku Soczewka – seria IV (wiosna)	60
Rysunek 7.1 Pomiary radarowe na odcinku Płońsk– echogram wraz z interpretacją	61
Rysunek 7.2 Pomiary radarowe na odcinku Płońsk– echogram wraz z profilem geotechnicznym i naniesioną na niego interpretacją danych GPR.....	62
Rysunek 7.3 Pomiary radarowe na odcinku Żąbki– echogram wraz z interpretacją	63

Rysunek 7.4 Pomiary radarowe na odcinku Ząbki– echogram wraz z profilem geotechnicznym i naniesioną na niego interpretacją danych GPR.....	64
Rysunek 7.5 Pomiary radarowe na odcinku Soczewka – echogram wraz z interpretacją	65
Rysunek 7.6 Pomiary radarowe na odcinku Soczewka – echogram wraz z profilem geotechnicznym i naniesioną na niego interpretacją danych GPR.....	66
Rysunek 7.7 Odcinek remontowanego dojazdu do przejazdu kolejowego w koło Nasielska	67
Rysunek 7.8 Pomiary radarowe anteną 400MHz na odcinku Nasielsk – echogram wraz z profilem geotechnicznym i naniesioną na niego interpretacją danych GPR.....	68

Spis tabel

Tabela 3.1 Typowe wartości stałej dielektrycznej i przewodności wybranych materiałów geologicznych przy częstotliwości anteny 100 MHz (Jol, 2009)	16
---	----

1 Wstęp

Celem badań geotechnicznych jest uzyskanie informacji na temat budowy oraz warunków hydrologicznych podłoża gruntowego. Dostarczone wyniki badań muszą być na tyle dokładne, aby można było na ich podstawie dokonać wyboru odpowiedniej technologii wzmocnienia podłoża. W tym miejscu można postawić pytanie: czy dotychczasowa metodyka badawcza jest wystarczająca i czy wobec wciąż rozszerzającej się oferty nowoczesnych, nieinwazyjnych metod pomiarowych jej wyniki mogą być precyzyjniejsze. Odpowiedzią na te pytania może być technika radarowa jako jedna z wielu technik pomiarowych NDT (z ang. Non-Destructive Testing), zdobywająca coraz większą popularność i uznanie wśród naukowców.

Poznając teorię i zasady funkcjonowania techniki radarowej, jak i zakres podstawowych pomiarów, rutynowo prowadzonych w wielu ośrodkach badawczych, można uznać, że jest to metoda relatywnie prosta. Tak jest w istocie kiedy oceniamy przydatność metody w pomiarach obiektów jednorodnych w czasie i przestrzeni. Jednak kiedy mamy do czynienia z obiektem tak zmiennym jak podłoże gruntowe dochodzimy do wniosku, że nie jest to metoda łatwa. Tym nie mniej to właśnie georadary stają się coraz częściej wykorzystywanym narzędziem wspomagającym klasyczne metody oceny podłoża, a ich niewątpliwą zaletą jest szybkość, precyzja oraz zakres informacji zawartej w zapisie sygnałów fal elektromagnetycznych. Zalety te pozwalają na uzupełnienie w sposób szczegółowy informacji o układzie warstw podłoża między odwiertami geotechnicznymi.

Celem pracy jest opracowanie metodyki oceny geotechnicznej podłoża gruntowego dla nawierzchni istniejących i nowych odcinków dróg z zastosowaniem techniki radarowej. Jednym z podstawowych celów będzie analiza możliwości zastosowania techniki radarowej w ocenie hydrologicznej podłoża gruntowego. W ramach niniejszej pracy przewiduje się wykonanie badań laboratoryjnych jak i terenowych, a uzyskane rezultaty i doświadczenia będą podstawą opracowania metodyki pomiarowej dającej optymalne rezultaty w ocenie właściwości podłoża gruntowego dla celów budownictwa drogowego.

2 Przegląd istniejących zasad, metod badań i oceny podłoża gruntowego

Do prawidłowego zaprojektowania każdej budowli niezbędna jest wiedza o podłożu, na którym dany obiekt ma być posadowiony. Dane te są potrzebne do zapewnienia projektowanej budowli odpowiedniej nośności (wytrzymałość) i użytkowania (trwałość), tzw. stany graniczne.

W przypadku dróg mamy do czynienia z nośnością konstrukcji nawierzchni dostosowaną do odpowiedniego obciążenia ruchem (kategorią KR) oraz trwałością, odpornością na powstawanie kolein, czy innych odkształceń trwałych w nawierzchni i odpornością na działanie mrozu. Budowla powinna być dostosowana do warunków gruntowo-wodnych, ale należy także brać pod uwagę także zmienność poziomu wód gruntowych.

W projektowaniu geotechnicznym używa się obliczeniowych parametrów geotechnicznych dla poszczególnych gruntów (wydzielonych warstw geotechnicznych), które uzyskuje się z parametrów charakterystycznych przez pomnożenie przez współczynnik bezpieczeństwa γ_m uwzględniający rozrzut statystyczny wyników. Parametry do obliczeń tworzy się z parametrów charakterystycznych, które są wyznaczane bezpośrednio w badaniach laboratoryjnych lub polowych (metoda A) lub pośrednio, na podstawie miarodajnych zależności korelacyjnych między parametrami fizycznymi lub wytrzymałościowymi a innym parametrem (metoda B) wg Polskiej Normy „Posadowienie bezpośrednie budowli”¹.

Przez ustalanie geotechnicznych warunków posadowienia obiektów budowlanych rozumie się zespół czynności zmierzających do określenia przydatności gruntów na potrzeby budownictwa, wykonywanych w terenie i w laboratorium. Prawidłowość zaplanowania badań oraz metody ich wykonania regulują odpowiednie przepisy krajowe.

Prawidłowe rozpoznanie podłoża jest zadaniem bardzo złożonym i skomplikowanym, gdyż zaplanowanie badań, nawet z częstotliwością wg odpowiednich instrukcji i dokumentów niesie pewne ryzyko, że ośrodek gruntowy może być nieciągły, a ilość punktów badawczych może się okazać niewystarczająca. Rozmieszczenie i głębokość punktów badawczych podawana w Eurokod 7-Projektowanie geotechniczne Część 1², Eurokod 7-Projektowanie geotechniczne Część 2³, Rozporządzeniu o posadawianiu obiektów budowlanych⁴, Rozporządzeniu o drogach publicznych⁵, i Instrukcji badań

¹ PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie

² PN-EN 1997-1 Eurokod 7 Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne

³ PN-EN 1997-2 Eurokod 7 Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego

⁴ ROZPORZĄDZENIE MINISTRA SPRAW WEWNĘTRZNYCH I ADMINISTRACJI z dnia 24 września 1998 r. Dziennik Ustaw Nr 126 Poz. 839 w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych.

podłoża gruntowego⁶, to informacje ogólne, nieprecyzujące dokładnie ilości miejsc, a ich lokalizacja często zależy od doświadczenia planującego badania. Bardzo przydatnymi metodami uzupełniającymi w tym przypadku są badania geofizyczne, pozwalające na śledzenie ciągłe ośrodka gruntowego, co daje możliwość bardziej precyzyjnego wytypowania punktu badawczego.

2.1 Badania geofizyczne

Geofizyka, ze względu na wykorzystywane metody pomiaru zajmuje się badaniem pól fizycznych, fizycznych właściwości Ziemi oraz poznawaniem jej budowy. Podstawowe metody nauk o Ziemi dzielą się na następujące dziedziny: geoelektryka, geofizyka otworowa, grawimetria, magnetometria, sejsmika, sejsmika górnicza, sejsmologia, sejsmologia górnicza. Badania geofizyczne wykorzystywane są między innymi w geotechnice i geologii, hydrogeologii, badaniach złóż kopalnianych i ochronie środowiska. Większość badań geofizycznych, np. magnetometryczne, grawimetryczne, termometryczne czy elektrooporowe są badaniami otworowymi, wykonywanymi w otworze wiertniczym w celu ustalenia profilu geotechnicznego (tzw. profilowanie). Są to metody pracochłonne, wymagające przygotowań i dużego doświadczenia w interpretacji danych. Obecnie najczęściej stosowane są badania:

- elektrooporowe (geoelektryczne), wykorzystujące różnice w oporach różnych gruntach przydatne do ustalania rodzaju gruntów i ich wilgotności - tą metodą można ustalić (z pewnym przybliżeniem) warstwy gruntów różniących się między sobą granulometrią, składem mineralnym i wilgotnością,
- izotopowe (radiometryczne), wykorzystujące promienie γ stosowane zwykle do badania gęstości i wilgotności gruntów cienkich warstw przypowierzchniowych np. aparat TROXLER (bardzo dużą niedogodnością tych badań są wymagania BHP ze względu na szkodliwe promieniowanie),
- sejsmiczne, wykorzystujące zjawiska rozchodzenia się fali uderzeniowej w gruncie, jedną z odmian tego rodzaju technik pomiarowych jest badanie FWD,
- georadarowe (GPR) - są to szybkie i precyzyjne badania nieinwazyjne, niewymagające szczególnego nadzoru i kłopotliwych wymagań BHP; interpretacja badań jest trudna i wymaga sporego doświadczenia.

Z wyżej przedstawionych metod badań, do rozpoznania warunków wodno-gruntowych dla celów drogowych najlepiej nadaje się georadar, który jest urządzeniem mobilnym, pozwalającym na badanie „nieinwazyjne” długich odcinków bez konieczności wykonywania otworów. W zależności od zastosowanej anteny i częstotliwości badanie GPR może być dopasowane do odpowiedniej głębokości rozpoznania (płytsze i głębsze) i

5 ROZPORZĄDZENIE MINISTRA TRANSPORTU I GOSPODARKI MORSKIEJ z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. (Dz. U. Nr 43, poz. 430)

6 Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych. GDDKiA, Warszawa 1998

odpowiedniej rozdzielczości (dokładności). GPR może być wykorzystywany do planowania badań do opracowania dokumentacji geotechnicznej, jak również do monitorowania i badania zjawisk występujących w podłożu gruntowym i ich rozwój w czasie, przydatnych do opracowywania różnego rodzaju ekspertyz.

2.2 Projektowanie geotechniczne w budownictwie

Obecny stan zaawansowania technik geofizycznych badań podłoża nie pozwala na określenie dokładnych parametrów gruntów, na podstawie, których można prawidłowo zaprojektować posadowienie obiektu czy drogi. Współcześnie stosowane metody projektowania tradycyjne oraz nowoczesne numeryczne, np. MES, MRS a ostatnio wprowadzony w Polsce Eurokod 7-Projektowanie geotechniczne Część 1 i 2 wymagają znajomości parametrów gruntów wyznaczonych w badaniach konwencjonalnych, bezpośrednich lub pośrednich laboratoryjnych i polowych. Pomimo, że obecnie obowiązujące przepisy i zalecenia dot. badań podłoża gruntowego (omówione dalej) przewidują stosowanie badań geofizycznych, brak jest jednak norm oraz przepisów szczegółowych jak badać i oceniać wyniki tych badań. Ten stan potrwa jeszcze dłuższy czas, a prace nad stosowaniem geofizycznych metod badań podłoża powinny być kontynuowane wspólnie z badaniami tradycyjnymi wg obecnych przepisów. Sukces prawidłowego zaprojektowania zależy przede wszystkim od dokładności rozpoznania ośrodka gruntowego, często nieciągłego i skomplikowanego. Tu mogą się okazać pomocne badania geofizyczne, które wskażą miejsca, gdzie należy podłoże zbadać. Badania te są zdolne wskazać strefy nieciągłości (pęknięcia), podziemne obiekty i urządzenia.

2.2.1 Ustalanie geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych

Sposób szczegółowego ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych ujęty jest w Rozporządzeniu o posadowieniu obiektów budowlanych oraz w powołanych tam Polskich Normach. W celu ustalenia geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych wykonuje się analizę i ocenę dokumentacji geotechnicznej, geologiczno-inżynierskiej i hydrogeologicznej, danych archiwalnych oraz innych danych dotyczących badanego terenu i jego otoczenia.

W zależności od potrzeb należy:

- 1) przygotować program badań geotechnicznych w terenie na potrzeby projektowanego obiektu,
- 2) wykonać badania geotechniczne w terenie obejmujące w szczególności:
 - a) małośrednicowe sondowania próbnikami przelotowymi,
 - b) sondowania dynamiczne i statyczne,
 - c) badania presjometryczne i dylatometryczne,
 - d) badania georadarowe i elektrooporowe,

- e) badania dynamiczne gruntów,
- f) odkrywki fundamentów,
- g) badania wodoprzepuszczalności gruntów i konstrukcji ziemnych,
- h) badania wód gruntowych i ich oddziaływania na konstrukcję,
- i) badania na poletkach doświadczalnych,
- 3) wykonać badania geotechniczne w laboratorium, obejmujące w szczególności:
 - a) badania fizyczno-mechanicznych i dynamicznych właściwości gruntów,
 - b) badania chemicznych właściwości gruntów i wód gruntowych,
 - c) badania próbek gruntów ulepszonych i materiałów zastosowanych do ulepszania podłoża gruntowego.

2.2.2 Ustalanie warunków gruntowo-wodnych podłoża nawierzchni drogowych

Sposób ustalania warunków gruntowo-wodnych dla nawierzchni drogowych podaje Załącznik nr 4 Rozporządzenia o drogach publicznych oraz przywołane tam Polskie Normy. Zakres badań podłoża drogowych budowli ziemnych jest następujący:

W celu określenia stanów granicznych nośności i przydatności do użytkowania drogowej budowli ziemnej powinny być przeprowadzone badania i ocena parametrów geotechnicznych zgodnie z Polskimi Normami i przepisami odrębnymi, takimi jak Katalogi Typowych Konstrukcji Nawierzchni^{7,8} i Instrukcja badań podłoża gruntowego. W celu dokonania oceny podłoża, oprócz podstawowych badań geotechnicznych powinny być przeprowadzone badania specjalistyczne, w szczególności:

- 1) badania potrzebne do oceny przydatności gruntu podłoża budowli ziemnej, zgodnie z Polskimi Normami,
- 2) badania wysadzinowości gruntu: kapilarności biernej H_{kB} , wskaźnika piaskowego WP , pęcznienia liniowego,
- 3) wskaźnika nośności CBR ,
- 4) ocena zagęszczenia: maksymalna gęstość objętościowa ρ_{ds} , wskaźnik zagęszczenia I_s , moduły odkształcenia: pierwotny (E_1) i wtórny (E_2),
- 5) właściwości gruntów antropogenicznych.

Wyżej wymieniony zakres badań wymaga przeprowadzenia badań polowych, pobrania próbek i wykonania badań laboratoryjnych. Warunki charakteryzujące podłoże gruntowe do zaprojektowania nawierzchni drogowej przedstawia się w postaci warunków wodnych (poziom zwierciadła wody gruntowej) oraz warunków gruntowych (rodzaj

7 Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych, GDDP, IBDiM - 1997 r

8 Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych, GDDP, IBDiM - 2001 r

gruntu i jego właściwości wysadzinowe), na podstawie których określa się tzw. grupę nośności podłoża Gi.

2.2.3 Projektowanie geotechniczne wg Eurokodu 7

Wprowadzony niedawno w Polsce Eurokod 7-Projektowanie geotechniczne podaje zasady projektowania geotechnicznego, planowania i wykonywania badań laboratoryjnych i terenowych. Jest to zupełna nowość, która zmienia sposób projektowania a Polska jest zobligowana do stosowania Eurokodu. Zostały nawet wprowadzone nowe nazwy gruntów i ich klasyfikacja wraz z normami PN EN ISO Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów^{9,10}, co oznacza zupełnie inne podejście do projektowania, wykonywania i oceny badań niż to było dotychczas. Dla przykładu, nie będzie gruntu o nazwie glina tylko iż !!!

Wynika z tego pilna potrzeba nowelizacji wszystkich Rozporządzeń, Katalogów i Instrukcji związanych z badaniami geotechnicznymi i projektowaniem.

Eurokod 7 wprowadza następujące postępowanie w celu dokonania oceny podłoża gruntowego.

Badania wstępne

Badania wstępne powinny być tak planowane, żeby otrzymać, zależnie od potrzeb, dane wystarczające do:

- oceny ogólnej stateczności i przydatności danego terenu;
- oceny przydatności danego terenu w porównaniu z terenami alternatywnymi;
- oceny dogodnego położenia budowli;
- oszacowania możliwych skutków oddziaływania proponowanych prac na otoczenie, to jest na sąsiadujące budynki, budowle i tereny;
- określenia złóż kruszyw;
- uwzględnienia możliwych metod posadowienia i ulepszania podłoża;
- planowania badań do celów projektowych i kontrolnych, łącznie z określeniem zasięgu podłoża, które może mieć znaczący wpływ na zachowanie się budowli.

Wstępne badania podłoża gruntowego powinny dać ocenę, w zależności od potrzeb, następujących danych:

- rodzaju gruntu lub skały;
- zwierciadła wód podziemnych albo profilu ciśnienia w porach gruntu;
- wstępnych właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych gruntu lub skały;

9 PN EN ISO 14688-1 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1. Oznaczanie i opis

10 PN EN ISO 14688-2 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2. Zasady klasyfikowania

- występowania agresywnej wody gruntowej lub gruntu, co może być niebezpieczne dla trwałości materiałów budowlanych.

W przypadkach, gdy badania wstępne nie dają niezbędnych informacji do oceny w fazie badań do celów projektowych należy przeprowadzić dodatkowe badania terenowe.

Badania terenowe

Badania terenowe w fazie projektowej, w miarę potrzeb, powinny obejmować:

- wiercenia i/lub wykopy (doły próbne obejmujące szyby i przekopy wstępne) w celu pobrania prób;
- pomiary wód gruntowych;
- badania polowe.

Przykłady badań polowych to:

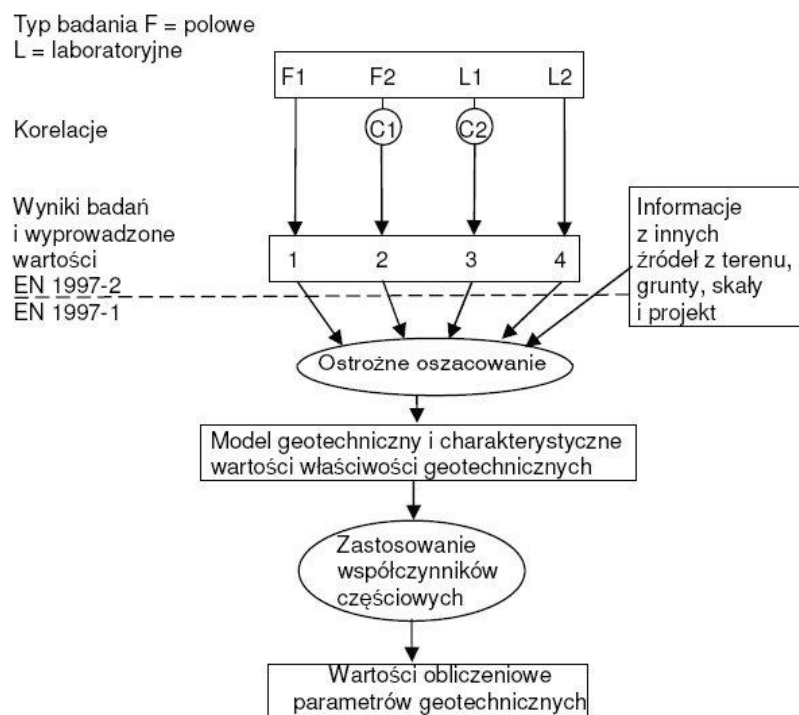
- sondowanie statyczne np. CPT, sondowanie dynamiczne SPT, WST, badania presjometrem, badania dylatometrem, badania za pomocą obciążenia płytą sztywną, badania polową sondą obrotową i badania przepuszczalności);
- pobieranie prób gruntów i skał do opisu gruntów lub skał i do badań laboratoryjnych;
- pomiary wody gruntowej w celu określenia zwierciadła wody gruntowej lub profilu ciśnienia w porach i ich zmian;
- badania geofizyczne (np. profilowanie sejsmiczne, georadar, pomiary oporności, pozyskiwanie danych z wnętrza otworu);
- badania wielkoskalowe, np. w celu wyznaczenia nośności podłoża albo nośności bezpośrednio na elementach takich jak kotwy.

Z otworów badawczych po pobraniu próbek zaleca się przeprowadzenie badań laboratoryjnych gruntów i skał w celu określenia parametrów geotechnicznych każdej warstwy. Próby do badań powinny być wybrane w taki sposób, żeby badania były w przybliżeniu równo rozłożone na całej powierzchni i na całej głębokości warstwy odpowiednio do potrzeb dokumentacji. Badania laboratoryjne próbek gruntów zgodnie z Eurokodem 7-Projektowanie geotechniczne należy wykonywać wg Specyfikacji Technicznych Badania laboratoryjne gruntów¹¹.

Proces projektowania geotechnicznego wg Eurokodu 7 składa się z kilku kolejnych faz (Rysunek 2.1); pierwsza obejmuje badania polowe i laboratoryjne, następna dotyczy określenia wartości charakterystycznych a ostatnia faza obejmuje projektowe obliczenia sprawdzające. Określanie wartości charakterystycznych i projektowanie obiektów budowlanych podano w Eurokodzie 7 Projektowanie geotechniczne Część 1 i 2. Jako uzupełniające mogą być stosowane inne uznane w świecie metody badawcze, na przykład metody geofizyczne. W Polsce brak jest doświadczeń z tego typu badaniami, a

¹¹ ISO/TS 17892-1÷12 Badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – cz. 1÷12

instrukcje stosowania każdy kraj dostosowuje do swojej specyfiki, co wymaga realizacji dużych projektów badawczych.



Rysunek 2.1 Schemat wyboru wyprowadzonych wartości parametrów geotechnicznych

Z powyższego rysunku wynika, że do projektowania brać należy parametry obliczeniowe, wynikające z wartości charakterystycznych pomnożonych przez współczynniki częściowe. Wartości charakterystyczne, to konkretne parametry geotechniczne ustalone w wyniku badań lub miarodajnych korelacji wg norm lub instrukcji szczegółowych.

2.3 Wnioski

Z przeprowadzonego przeglądu aktualnie obowiązujących w Polsce zasad i metod badania podłoża gruntowego do celów budowlanych wynika, że podstawowymi parametrami gruntów do projektowania geotechnicznego wg modelu fizycznego Coulomba-Mohra, a ostatnio coraz częściej wg teorii stanu naprężeń i odkształceń są parametry pomierzone metodą bezpośrednią w terenie i w laboratorium na pobranych próbkach, tzw. stałe materiałowe. Stosowanie opisanych zasad ustalania warunków gruntowo-wodnych niesie możliwość nie uwzględnienia nieciągłości ośrodka gruntowego, z uwagi na wykonywanie badań punktowych z odpowiednią częstotliwością. Bardzo pomocnym narzędziem są metody geofizyczne, zwłaszcza georadar (GPR), który daje ciągły obraz ośrodka gruntowego. Stosując różne anteny o różnych częstotliwościach można obrazować podłoże do różnej głębokości. Jest to metoda bezinwazyjna, bardzo przydatna zwłaszcza, gdy badany teren jest przykryty np. posadzką lub nawierzchnią drogową i nie ma potrzeby rozbierania nawierzchni, co jest

konieczne przy innego rodzaju badaniach geofizycznych. Na obecnym etapie zaawansowania największą niedogodnością badań geofizycznych jest niejednoznaczność interpretacji, co nakazuje prowadzić prace badawcze w celu opracowania miarodajnych metod oceny wyników badań.

Obecne metody projektowania w Europie (Eurokod 7-Projektowanie geotechniczne) bazują na parametrach określonych tradycyjnie, a metody geofizyczne, np. GPR powinny być stosowane wspólnie z tymi metodami z trzech względów:

- jako narzędzie do precyzyjnego zaprogramowania lokalizacji punktów badawczych do badań klasycznych,
- jako narzędzie sprawdzające prawidłowość wykonanego rozpoznania tradycyjnie,
- jako narzędzie kontroli i monitorowania związanego z utrzymaniem,

Wykorzystanie do badań podłoża gruntowego systemu GPR, zwłaszcza w geotechnice drogowej, gdzie odcinki wymagające rozpoznania są rzędu kilometrów, znacznie uprości lokalizację punktów badawczych. Ograniczy to liczbę badań do absolutnego minimum, ale wystarczającego do prawidłowego i pewnego zaprojektowania budowli zgodnie z obowiązującymi przepisami. Metoda GPR najbardziej pasuje do specyfiki drogowej, w odróżnieniu od pozostałych metod geofizycznych, które bardziej się sprawdzają w badaniach małych obszarów, np. pod budynki, lub przy bardzo głębokich rozpoznaniach np. kopalin. Metoda GPR powinna być w Polsce szerzej stosowana, a zdobyte doświadczenie powinno zaowocować opracowaniem instrukcji stosowania systemu GPR dostosowanego do polskiej specyfiki oraz podającego jednoznaczną interpretację badań.

3 Przegląd istniejących metod oceny podłoża gruntowego z wykorzystaniem techniki radarowej

Przytaczając różne metody pomiarowe wykorzystujące technikę radarową nie można pomijać czynników mających pośredni lub bezpośredni wpływ na jakość uzyskiwanych wyników. Oprócz samej konfiguracji sprzętowej, rodzaju zastosowanych anten oraz przyjętego sposobu pomiaru ważne są także właściwości obiektu oraz proces przetwarzania uzyskanych danych.

W niniejszym rozdziale, oprócz technik pomiarowych GPR, przedstawiono również podstawowe właściwości podłoża gruntowego mające wpływ na jakość uzyskiwanych danych oraz wybrane sposoby przetwarzania zarejestrowanych obrazów radarowych.

3.1 Właściwości gruntów wpływające na jakość pomiarów radarowych

Pozyskanie informacji na temat badanego podłoża gruntowego ma istotne znaczenie już przed podjęciem pomiaru. Dobre przygotowanie operatora w tym względzie pozwala mu na odpowiednie dobranie sprzętu i rodzaju zastosowanej techniki pomiarowej oraz na właściwe zestawienie procedur przetwarzania i interpretacji danych. Efekty złego przygotowania od razu widoczne są w zarejestrowanych danych, a problemy z tym związane często zwielokrotniają nakład pracy operatora w trakcie obróbki

zarejestrowanych sygnałów. Między innymi z tych powodów należy poznać charakter badanego obiektu oraz jego właściwości mogące ograniczać zastosowanie techniki radarowej.

Materiały podłoża gruntowego często opisywane są jako dielektryki, z przenikalnością i przewodnością elektryczną luźno określanymi jako „właściwości dielektryczne”. Termin „dielektryk” opisuje grupę materiałów, w których występuje niewiele ładunków swobodnych, w wyniku czego bardzo słabo przewodzi prąd elektryczny. W rzeczywistości wszystkie materiały gruntowe posiadają pewną formę wolnych ładunków, takich jak elektrony i jony, i są one opisywane jako „dielektryki stratne”. Jeżeli w materiale istnieją jakiegokolwiek wolne ładunki to pod działaniem pola elektromagnetycznego (EM) będą przepływać przez materiał, a zjawisku temu towarzyszyć będzie tłumienie i straty energii. W skrajnych przypadkach materiał zawierający dużo wolnych ładunków będzie w rzeczywistości przewodnikiem, w którym większość energii EM stracona zostanie w procesie przewodzenia jako ciepło. Dlatego też metoda GPR jest nieefektywna w środowisku wysokiej przewodności np. przy wysokiej zawartości glin i w ocenie warunków zasolenia).

Z punktu widzenia metody radarowej przenikalność i przewodność elektryczna są ważnymi parametrami gruntów. Właściwości te w znacznym stopniu decydują o wielkości tłumienia fali elektromagnetycznej przechodzącej przez ośrodek i wpływają na zakres penetracji głębokościowej metody radarowej. Im większe tłumienie tym mniejsza głębokość pomiaru i odwrotnie, mniejsze tłumienie ośrodka pozwala uzyskać lepszą penetrację. Jak podaje między innymi (Campbell, 1990), (McNeill, 1980), (Saarenketo, 2006) przenikalność i przewodność elektryczna zależą od składu mineralnego, porowatości, wilgotności, składu chemicznego, temperatury ośrodka, a także od częstotliwości fali emitowanej w głąb ośrodka.

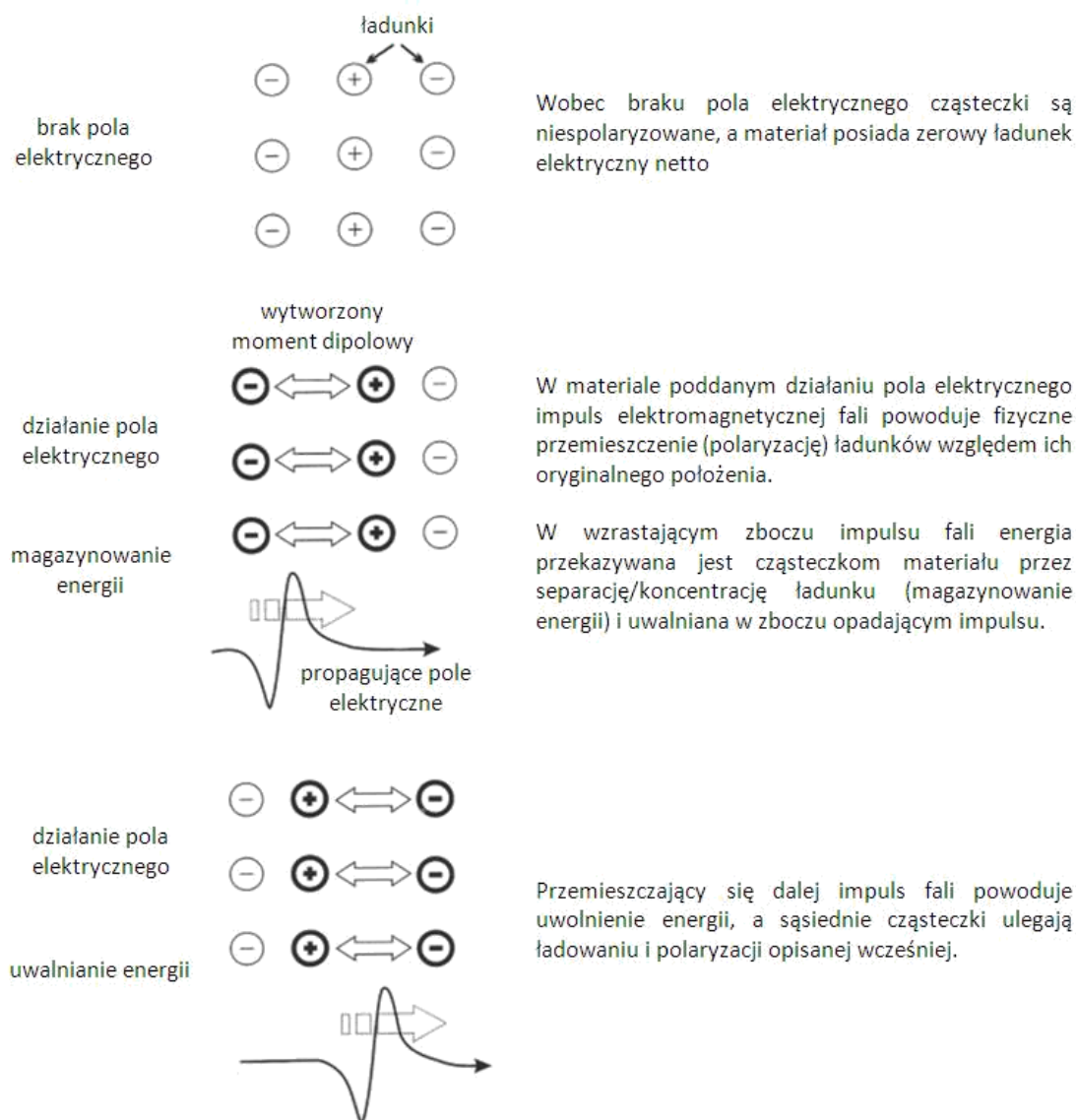
3.1.1 Przenikalność elektryczna

Przenikalność (ϵ) może być opisywana jako zdolność do ograniczania przepływu ładunków swobodnych lub jako stopień polaryzacji zachodzącej w materiale znajdującym się pod wpływem pola elektrycznego. Jest wielkością zależną od częstotliwości fali, złożoną z części rzeczywistej (magazynowanie) i urojonej (straty). Często liczbowe wyrażenie przenikalności jest upraszczane do stałej dielektrycznej, co jest wygodne w wstępnych obliczeniach prędkości i długości fali, natomiast w szczegółowej analizie danych jest to uogólnienie zbyt duże. W Tabeli 3.1 podano zakresy wartości względnej przenikalności materiałów gruntowych w warunkach naturalnych, zmierzonych przy częstotliwości fali 100MHz.

Tabela 3.1 Typowe wartości stałej dielektrycznej i przewodności wybranych materiałów geologicznych przy częstotliwości anteny 100 MHz (Jol, 2009)

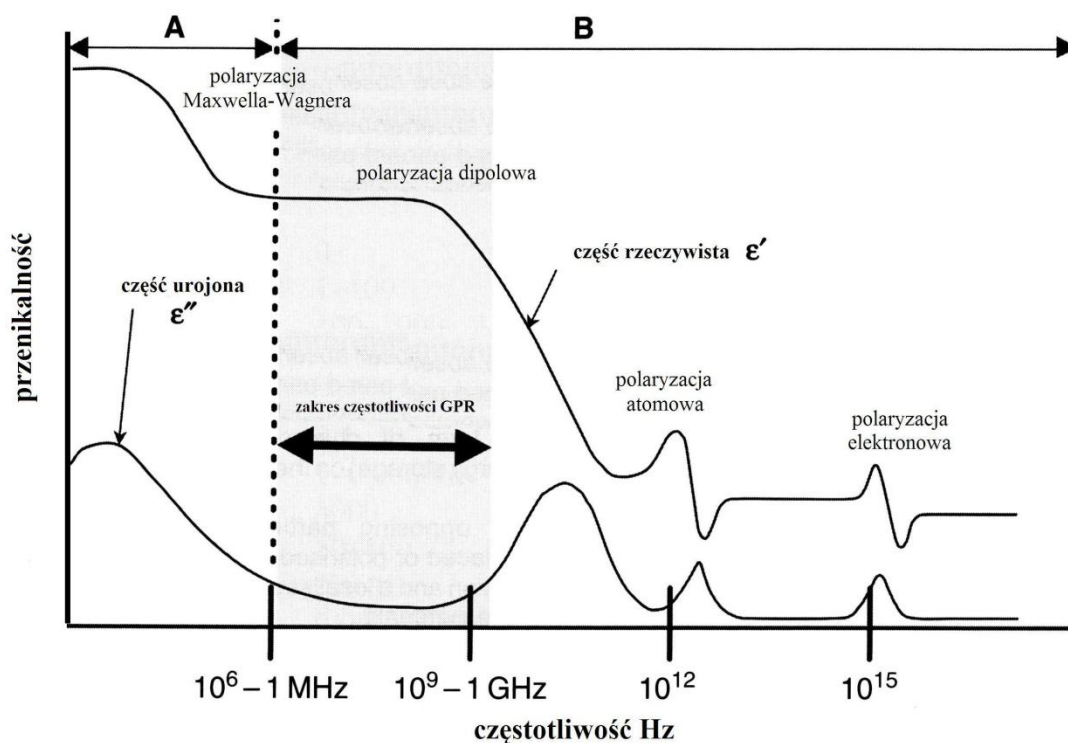
ośrodek	stała dielektryczna ϵ_r	przewodność σ [mS/m]
powietrze	1	0
glina - sucha	2-20	1-100
glina - mokra	15-40	100-1000
woda	78 (@25°C) - 80	0,1-10
lód z wody słodkiej	3	10-100
woda morska	81-88	4000
lód z wody morskiej	4-8	10-100
zmarzlina	2-8	0,1-10
granit - suchy	5-8	0,001-0,00001
granit – szczelinowaty i mokry	5-15	1-10
wapień - suchy	4-8	0,001-0,0000001
wapień - mokry	6-15	10-100
piaskowiec - suchy	4-7	0,001-0,0000001
piaskowiec - mokry	5-15	0,01-0,001
łupek - nasączony	6-9	10-100
piasek - suchy	3-6	0,0001-1
piasek - mokry	10-30	0,1-10
piasek – brzegowy, suchy	5-10	0,01-1
grunt – piaszczysty, suchy	4-6	0,1-100
grunt – piaszczysty, mokry	15-30	10-100
grunt – piaszczysto gliniasty, suchy	4-6	0,01-1
grunt – piaszczysto gliniasty, mokry	10-20-	10-100
grunt – gliniasty, suchy	4-6	0,1-100
grunt – gliniasty, mokry	10-15	100-1000
grunty (średnio)	16	5

Zjawiskiem obserwowanym w materiałach, przez które przenika fala elektromagnetyczna jest polaryzacja. Impuls elektromagnetycznej fali padającej, przechodzącej przez materiał powoduje fizyczne przemieszczenie (polaryzację) ładunków względem ich oryginalnego położenia (Rysunek 3.1). Jak podaje (Jol, 2009) w wzrastającym zboczu impulsu fali energia przekazywana jest cząsteczkom materiału przez separację/koncentrację ładunku (magazynowanie energii) i uwalniana w zboczu opadającym impulsu. W materiale indukowany jest moment dipolowy, którego gęstość jest proporcjonalna do siły pola elektrycznego, z stałą proporcjonalnością określaną jako przenikalność elektryczna. Zbocze wzrastające i opadające impulsu dostarcza energię do odseparowanych ładunków powodując ich drganie, co w efekcie prowadzi do promieniowania energii elektromagnetycznej. Energia ta jest poza fazą impulsu fali i prowadzi do spowolnienia przenikającej fali elektromagnetycznej. W ten sposób przenikalność jest bezpośrednio powiązana z prędkością rozchodzenia się fali w ośrodku.



Rysunek 3.1 Diagram ilustrujący proces magazynowania/uwalniania energii, polaryzacja ładunków i powstawanie momentu dipolowego przy przejściu fali elektromagnetycznej przez materiał (Jol, 2009)

Zależność częstotliwościowa procesu polaryzacji jest manifestacją zjawiska relaksacji przenikalności, gdzie zależny od czasu mechanizm przemieszczeń ładunków działa z różnym współczynnikiem w stosunku do zmiennego pola elektrycznego. Poniżej częstotliwości relaksacji cząsteczki są w stanie szybko reagować na zmienne pole elektryczne i pozostają w fazie z ich ładunkami, natomiast powyżej tej częstotliwości cząsteczki nie „nadążają” i pozostając większość czasu w ruchu wytwarzają straty energii, objawiające się jako ciepło. Zjawisko to jest bardzo ważne dla metody radarowej ze względu na polaryzację dipolową ładunków granicznych i/lub swobodnych (najczęściej wody). Poniżej przedstawiono diagram ilustrujący przenikalność wyidealizowanego dielektryka stratnego w zależności od częstotliwości fali z uwzględnieniem zjawiska relaksacji.



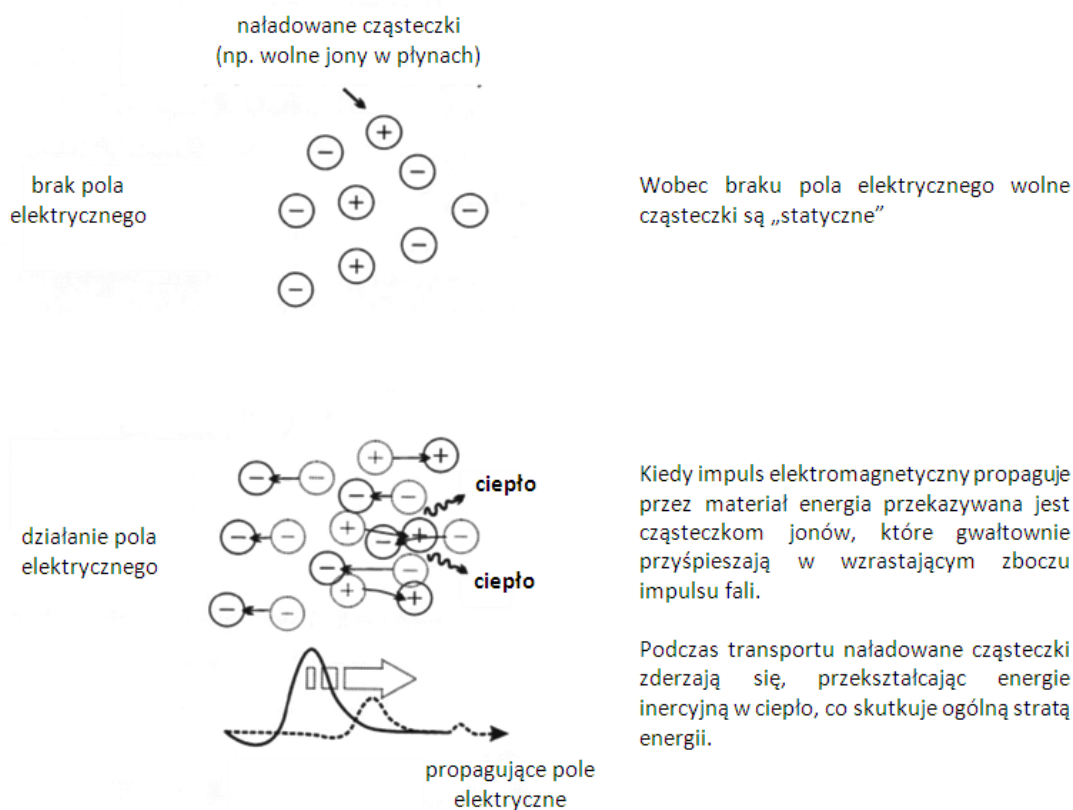
Rysunek 3.2 Zjawisko relaksacji przenikalności wyidealizowanego dielektryka stratnego.

Część A przedstawia obszar związany z polaryzacją ładunków wolnych i interakcje materiałowe, natomiast część B przedstawia obszar polaryzacji molekularnej i atomowej ładunków granicznych (Daniels, 2004)

3.1.2 Przewodność

Przewodność (σ) opisuje zdolność do przewodzenia prądu elektrycznego przez ruch ładunków swobodnych w materiale. W metalach ładunki to swobodne elektrony atomów, natomiast w cieczach są to ładunki rozpuszczonych anionów i kationów. Przemieszczające się ładunki zderzają się przypadkowo z innymi atomami, jonami lub elektronami, przez co wytwarzane jest ciepło jako strata energii (Rysunek 3.3). W niskich częstotliwościach GPR reakcja ładunków jest natychmiastowa i natężenie przewodności jest w fazie pola elektrycznego (Turner, i inni, 1994). W wyższych częstotliwościach inercyjny efekt przyspieszających ładunków powoduje opóźnienie ich fizycznej reakcji i natężenie przewodności jest poza fazą zmieniającego się pola elektrycznego.

Przewodność powinna być opisywana jako wartość złożona z części urojonej (część natężenia będącego poza fazą) i części rzeczywistej (stopień utraty energii), jednak ze względu na znikome oddziaływanie w zakresie częstotliwości radarowych część urojoną w wielu wypadkach pomija się.

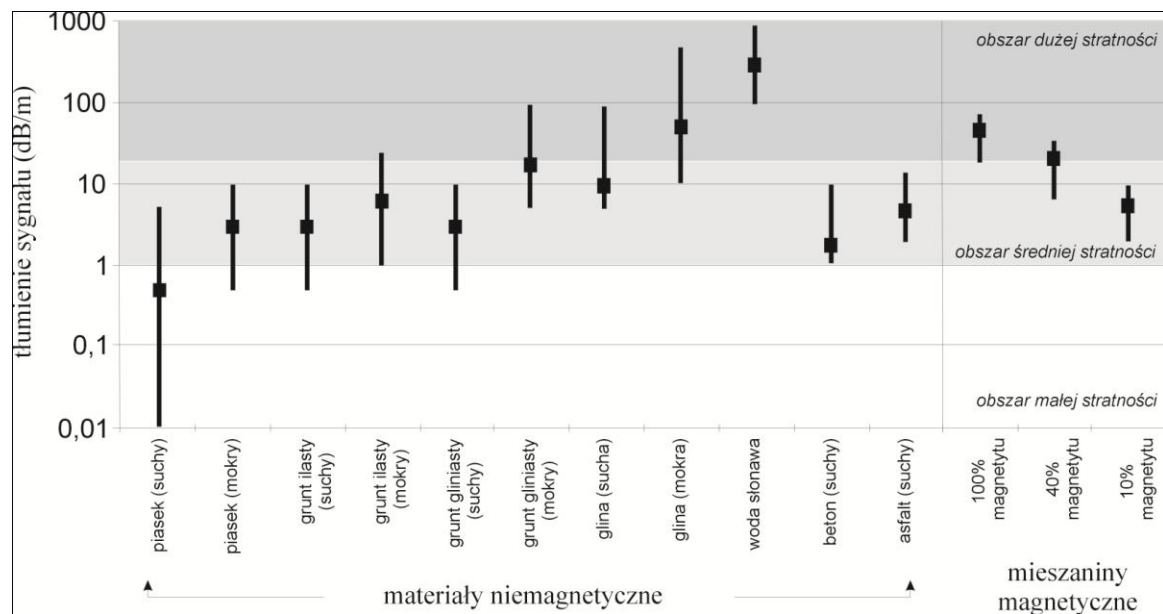


Rysunek 3.3 Diagram ilustrujący proces przewodzenia w materiale zawierającym ładunki wolne, takie jak aniony i kationy (Jol, 2009)

3.1.3 Magnetyczne parametry dielektryków

W większości wypadków magnetyzm materiałów ma niewielki wpływ na przenikającą falę radarową, a ich podatność magnetyczna (μ) często upraszczana jest do wartości w wolnej przestrzeni $1,26 \times 10^{-6}$ H/m. Istnieją jednak minerały ferromagnetyczne, których właściwości mogą znacząco wpływać na prędkość i tłumienie fali elektromagnetycznej. W większości materiałów pochodzenia geologicznego zawartość ferromagnetyków jest pomijalnie mała (zazwyczaj $< 2\%$), jednak spore ilości magnetytu, maghemitu i hematytu (kluczowe ferromagnetyki w materiałach naturalnych) można znaleźć w skałach wulkanicznych, bogatych w żelazo piaskach i gruntach. Mogą one powodować relaksacje i starty porównywalne z obserwowanymi podczas przenikalności (Olhoeft, i inni, 1993).

W praktyce radarowej właściwości magnetyczne uważa się za istotne jeżeli stanowią istotny udział w reakcji elektrycznej materiału. Z drugiej strony ciekawe wyniki zaprezentowano między innymi przez (Mattei, i inni, 2007) i (Cassidy, 2007), które wskazują, że relatywnie mała zawartość procentowa magnetytu (10%) może mieć znaczący wpływ na prędkość i tłumienie fali elektromagnetycznej. Na Rysunku 3.4 przedstawiono typowe wartości tłumienia fali w materiałach gruntowych i mieszankach magnetytu przy częstotliwościach 200-1200MHz.

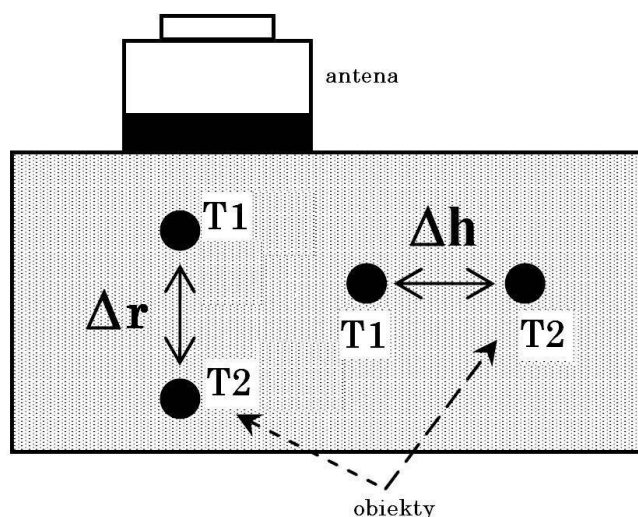


Rysunek 3.4 Typowe wartości tłumienia fali w materiałach gruntowych i mieszankach magnetytu przy częstotliwościach 200-1200MHz. Linie ciągłe oznaczają zakres tłumienia, natomiast kwadratowe znaczniki przedstawiają wartości typowe dla materiałów lub średnie dla magnetytów (Jol, 2009).

3.2 Rozdzielczość i głębokość penetracji

Rozdzielczość i głębokość penetracji georadaru ograniczone są przez częstotliwość anteny i właściwości dielektryczne materiałów gruntowych (Olhoeft, 1998), (Daniels, 2004). Te dwa czynniki wpływają na jakość uzyskiwanych danych, ale tylko jeden z nich, częstotliwość anteny, może być dobierany w zależności od rodzaju badania i kontrolowany podczas procesu zbierania danych.

Jednym z poważniejszych problemów związanych z techniką radarową jest zdolność rozróżnienia obiektów będących blisko siebie i położonych w tej samej linii lub płaszczyźnie. W przypadku gdy poszukiwane obiekty zlokalizowane są wzdłuż płaszczyzny pionowej, prostopadłej do kierunku badania zdolność ta nazywana jest rozdzielczością pionową, natomiast gdy obiekty zlokalizowane są wzdłuż płaszczyzny poziomej, równoległej do kierunku badania zdolność ta nazywana jest rozdzielczością poziomą (Rysunek 3.5).



Rysunek 3.5 Rozdzielczość pionowa Δr i pozioma Δh

Analizując możliwości techniki w zakresie rozdzielczości pionowej należy pamiętać o tym, że mamy do czynienia z impulsami fali elektromagnetycznej wysyłanymi w kierunku badanego ośrodka, który „generuje” fale odbite, rejestrowane przez urządzenia pomiarowe jako sygnały zbliżone kształtem do impulsu wysyłanego. Sygnały te mogą powracać z różnym opóźnieniem, zależnym od głębokości danego obiektu, co oznacza, że w niektórych wypadkach mogą się one nakładać. Wyjaśnienie tego zjawiska przedstawiono w formie graficznej na Rysunku 3.6.

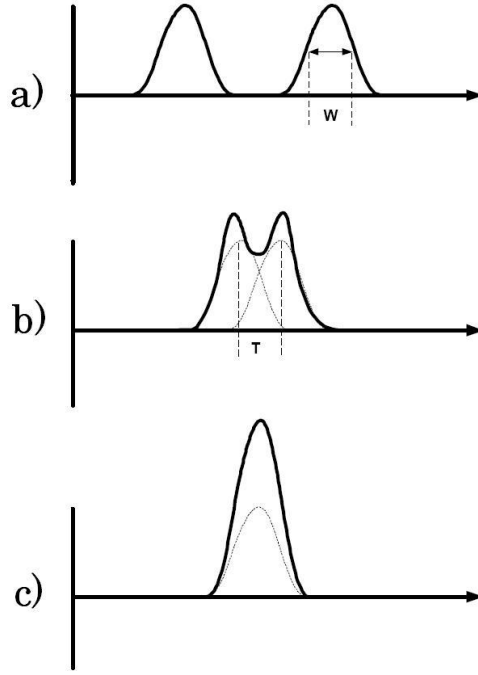
Jak podaje (Annan, 2001) jeżeli obserwujemy dwa obiekty T1 i T2, położone w jednej linii od punktu pomiaru, to różnica w czasie nadejścia impulsów odbitych będzie bezpośrednio związana z odległością między tymi obiektami. Czasy nadejścia impulsów odbitych od obiektów T1 i T2 można zapisać następująco:

$$t_1 = \frac{2d}{v} \quad (2.1)$$

$$t_2 = \frac{2d + 2\Delta r}{v} \quad (2.2)$$

gdzie:

d – głębokość położenia obiektu, v – prędkość fali.



Rysunek 3.6 Impulsy czasowe o szerokości $\frac{1}{2} W$; a) impulsy wyraźnie odseparowane gdy $T \gg W$, b) impulsy rozróżnialne do momentu gdy $T \approx W$, c) impulsy nakładające się (nierozróżnialne) gdy $T \ll W$

Różnica w czasie nadejścia impulsu może być wyrażona jako:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2\Delta r}{v} \quad (2.3)$$

przy czym wymagamy, aby różnica w czasie była większa niż połowa szerokości impulsu W , stąd:

$$\Delta r \geq \frac{Wv}{4} \quad (2.4)$$

Na podstawie wzoru (2.4) można stwierdzić, że rozdzielczość pionowa zależy od szerokości impulsu i prędkości fali w ośrodku.

W ten sam sposób możemy przeanalizować możliwości techniki radarowej pod kątem rozdzielczości poziomej. Czasy nadejścia impulsów odbitych od obiektów T_1 i T_2 można zapisać następująco:

$$t_1 = \frac{2d}{v} \quad (2.5)$$

$$t_2 = \frac{2(d^2 + \Delta h^2)^{\frac{1}{2}}}{v} \quad (2.6)$$

natomiast różnica w czasie nadejścia impulsu może być wyrażona jako:

$$\Delta t = \frac{2[(d^2 + \Delta h^2)^{\frac{1}{2}} - d]}{v} \quad (2.7)$$

W większości przypadków odległość obiektów od anteny jest znaczna w porównaniu z odległością pomiędzy tymi obiektami. Stąd można przyjąć, że :

$$\Delta t = \frac{\Delta h^2}{vd} \quad (2.8)$$

co z kolei wskazuje, że:

$$\Delta h \geq \sqrt{\frac{vdW}{2}} \quad (2.9)$$

Z powyższego wynika, że rozdzielczość pozioma zależy od prędkości fali w ośrodku, szerokości impulsu fali jak również od odległości obiektu od anteny.

Ponieważ szerokość impulsu W jest odwrotnie proporcjonalna do szerokości pasma impulsu odbieranego przez antenę B i do częstotliwości centralnej anteny f_c :

$$W = \frac{1}{B} = \frac{1}{f_c} \quad (2.10)$$

gdzie:

$$\lambda_c = \frac{f_c}{v} \quad (2.11)$$

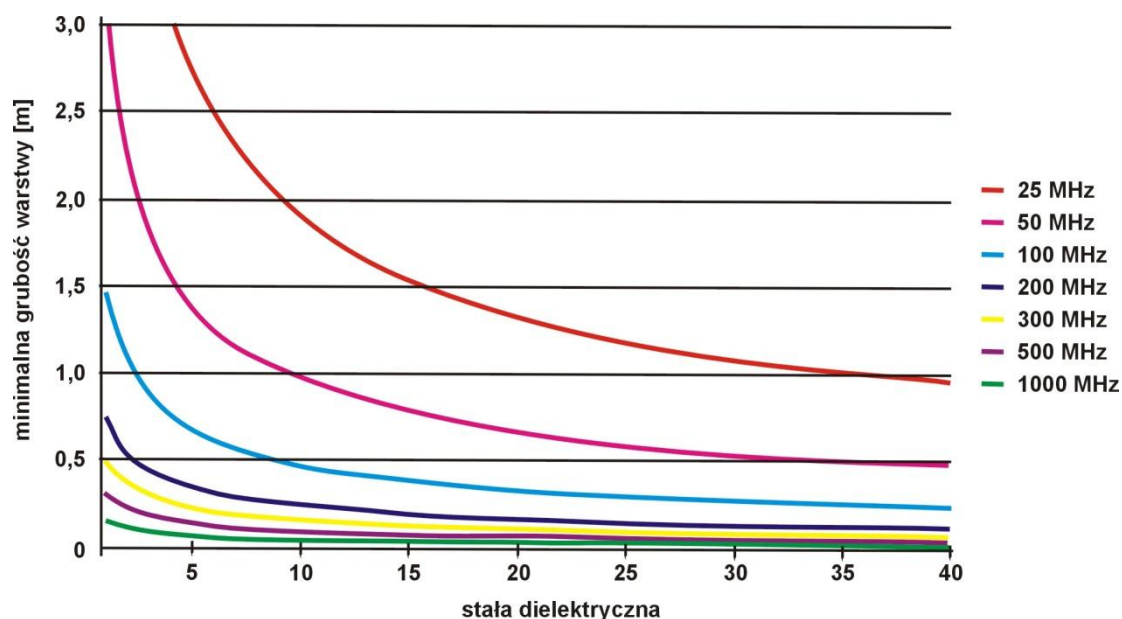
rozdzielczość pozioma może być wyrażona następująco:

$$\Delta h = \sqrt{\frac{d\lambda_c}{2}} \quad (2.12)$$

gdzie λ_c jest długością fali przy częstotliwości centralnej anteny.

Przedstawiona powyżej analiza dowodzi zależności między częstotliwością sygnału emitowanego przez antenę, głębokością penetracji techniki radarowej i rozdzielczością pomiaru. Na jej podstawie można stwierdzić, że wraz ze wzrostem częstotliwości emitowanej fali zmniejsza się głębokość penetracji, natomiast zwiększa się rozdzielczość pomiaru. W technice radarowej zależność ta ma ogromne znaczenie, szczególnie na etapie planowania pomiarów.

Jak wcześniej wspomniano rozdzielczość zależy od stałej dielektrycznej ośrodka. Zależność tą przedstawiono w formie graficznej (Rysunek 3.7), przygotowanej na podstawie (Morey, 1998), gdzie pokazano możliwe do zidentyfikowania, minimalne grubości warstw w zależności od częstotliwości emitowanej fali oraz stałej dielektrycznej ośrodka. Z przedstawionych danych wynika, że dla ośrodka o pewnej stałej dielektrycznej zastosowanie wyższej częstotliwości fali pozwala na identyfikację cieńszej warstwy. Analizując te dane należy pamiętać, że zostały one przygotowane przy założeniu, że możliwe jest zidentyfikowanie zarówno sygnału odbitego od górnej jak i od dolnej powierzchni badanej warstwy.



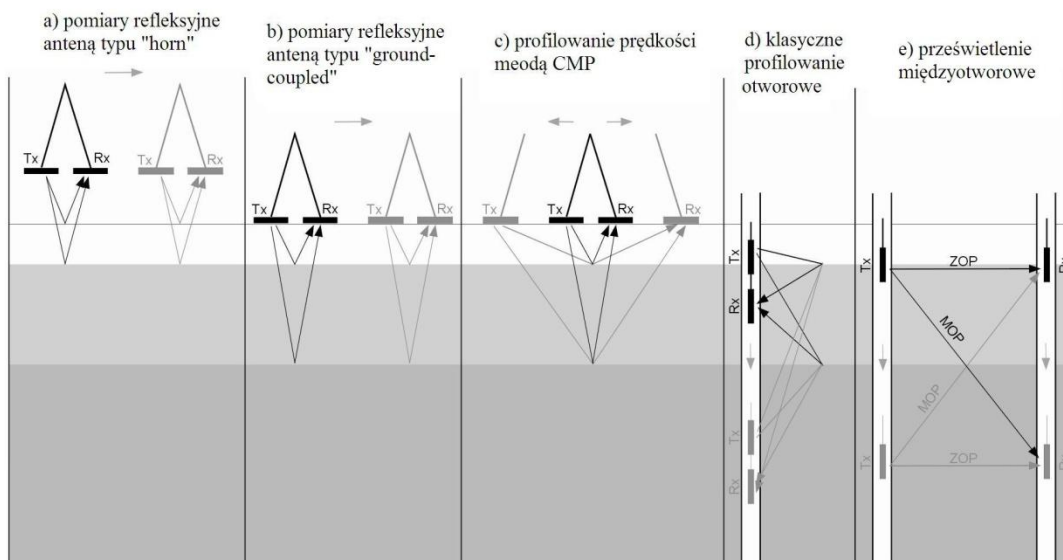
Rysunek 3.7 Rozdzielczość w funkcji częstotliwości emitowanej fali

3.3 Metody pomiarowe

Rozdzielczość i głębokość penetracji georadaru ograniczone są przez częstotliwość. Georadary GPR (z ang. Ground Penetrating Radar) znajdują zastosowanie w wielu szczegółowych badaniach podłoża gruntowego. Jak podają między innymi (Benedetto, i inni, 2002), (Conyers, 2004), (Karczewski, 2007), (Singh, 2006) technika radarowa może być wykorzystywana w badaniach układu warstw płytko zalegających w podłożu, lokalizacji obiektów (rury, kable, zbiorniki, miny itp.), archeologii, ocenie warunków hydrologicznych (np. pomiar głębokości występowania zwierciadła wody gruntowej) oraz biomonitoringu (np. ocena zanieczyszczeń w sąsiedztwie wysypisk śmieci). Zmienność właściwości podłoża gruntowego i związana z tym trudność interpretacji danych radarowych sprawia jednak, że bez względu na rodzaj podjętego badania, zastosowania te w większości wciąż uznawane są jako doświadczenia badawcze, a nie jako rutynowe pomiary.

W badaniach radarowych wyróżnia się kilka rodzajów metod pomiarowych (Karczewski, 2007) (Rysunek 3.8):

1. profilowanie refleksyjne,
2. profilowanie prędkości,
3. prześwietlanie,
4. profilowanie otworowe.



Rysunek 3.8 Techniki pomiarowe GPR: a) pomiary refleksyjne anteną typu „horn” i b) anteną typu „ground-coupled”, c) profilowanie prędkości metodą CMP (common midpoint), d) klasyczne profilowanie otworowe, e) prześwietlenie międzyotworowe (metoda ZOP - zero-offset profiling i metoda MOP - multiple-offset profile). Nadajnik anteny oznaczono (Tx), a odbiornik (Rx). Rysunek opracowano na podstawie (Jol, 2009)

Profilowanie refleksyjne (z ang. Common-Offset Reflection), ze względu na swe użytkowe właściwości, ma największe znaczenie w ocenie geotechnicznej podłoża, przydatnej w projektowaniu nowych i wzmacnianiu istniejących dróg. Dzięki niej można uzyskać informacje o układzie warstw płytko zalegających w podłożu gruntowym na badanym odcinku. W celu obliczenia rzeczywistej głębokości warstw należy określić prędkość fali przy pomocy innej metody pomiarowej lub danych o grubościach uzyskanych z odwiertów kalibracyjnych.

Metoda profilowania prędkości CMP (z ang. common midpoint) stosowana jest w celu oszacowania prędkości fali elektromagnetycznej w zależności od głębokości, co uzyskuje się przez równomierne oddalanie nadajnika i odbiornika od punktu wspólnego. Odmianą metody CMP jest metoda WARR (z ang. Wide-Angle Reflection and Refraction), w której jedna z anten pozostaje w miejscu, natomiast druga jest oddalana. Zaletą metody jest polepszenie stosunku sygnału do szumu (Fisher, i inni, 1992) oraz uzyskanie rozkładu prędkości fali w zależności od głębokości (Greaves, i inni, 1996).

Prześwietlanie i profilowanie otworowe można zaliczyć do jednej grupy metod pomiarowych, a swe nieco odmienne nazwy zawdzięczają rodzajowi badanego obiektu. W obu metodach stosuje się taką samą techniką pomiarową, polegającą na umieszczeniu nadajnika z jednej strony obiektu i odbiornika z drugiej (w przypadku profilowania będą to sąsiednie otwór w gruncie). Nadajnik może pozostać w jednym miejscu (metoda MOP – z ang. multiple-offset profile) lub też może być przesuwany równolegle z odbiornikiem (metoda ZOP – z ang. zero-offset profiling). Na podstawie uzyskanych danych można również określić prędkość fali oraz współczynnik tłumienia.

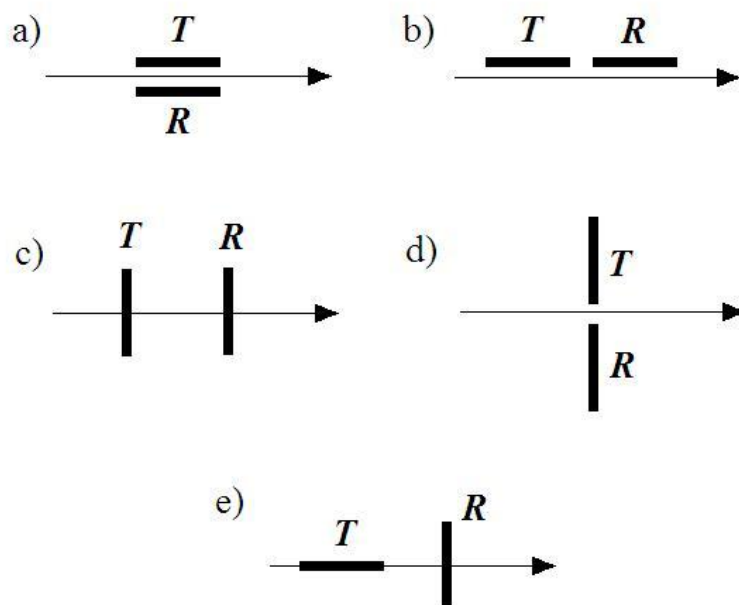
Ze względu na swą wysoką wydajność i największą dostępność w dalszej części przedstawiono jedynie metodę profilowania refleksyjnego.

3.3.1 Profilowanie refleksyjne

Najczęściej wykorzystywaną metodą oceny anomalii występujących w różnego rodzaju obiektach jest profilowanie refleksyjne (na świecie ok. 90% wszystkich pomiarów radarowych). Technika ta polega na jednoczesnym przesuwaniu nadajnika i odbiornika wzdłuż wyznaczonego profilu pomiarowego (Rysunek 3.8a i b). W każdej chwili pomiaru nadajnik i odbiornik znajdują się w tym samym położeniu i odległości względem siebie. Pomiary wykonywane są w pojedynczych profilach lub w zestawianych równoległe do siebie liniach, wykonywanych w pomiarach określonych powierzchni.

Celem pomiarów refleksyjnych jest mapowanie refleksów pochodzenia podpowierzchniowego. Zmiany w amplitudzie odbić oraz czas opóźnienia fali są wskaźnikami zmienności prędkości i tłumienia fali oraz impedancji ośrodka.

Parametrami definiującymi tego rodzaju pomiary są: częstotliwość centralna, szerokość okna czasowego, częstotliwość pomiaru, przesunięcie profilu pomiarowego oraz orientacja anteny. Jak podaje między innymi (Karczewski, 2007) standardowo obie anteny, nadawcza i odbiorcza, są ułożone równoległe do siebie, co powoduje polaryzację pola elektrycznego równoległe do dłuższej osi anten. Możliwe są też inne warianty ułożenia anten jak te prezentowane na Rysunku 3.9.



Rysunek 3.9 Warianty ułożenia anten względem siebie i linii pomiarowej (T- nadajnik, R – odbiornik, → - kierunek profilu)

Typowe częstotliwości centralne oferowanych na rynku anten mieszczą się w zakresie od 25 MHz do 4 GHz. Jak wcześniej wykazano (punkt 3.2) istnieje bezpośrednia zależność między częstotliwością emitowanej fali a możliwą do uzyskania

rozdzielczością. Istnieje też odwrotna zależność między częstotliwością a głębokością penetracji. Z powodu tych ograniczeń (Yelf, 2007) zaleca przed podjęciem pomiarów rozważenie następujących problemów:

1. rodzaj badanego obiektu (rozmiary, głębokość i skład),
2. właściwości dielektryczne badanych materiałów,
3. wymagana rozdzielczość,
4. czynniki zmniejszające penetrację (np. woda, glina itp),
5. ukształtowanie terenu (w badaniach terenu pod budowę nowego odcinka drogi),
6. warunki gruntowo-wodne.

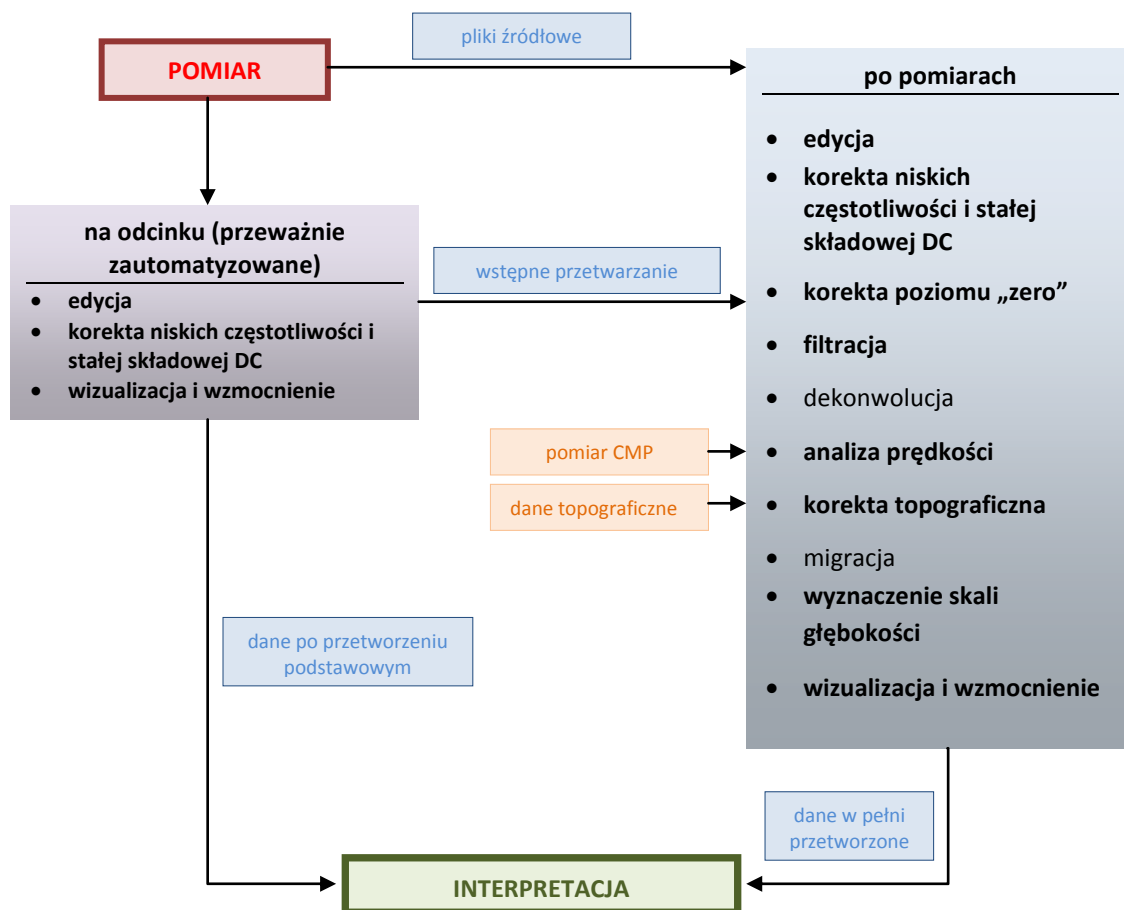
Wymienione powyżej czynniki są bardzo istotne, a odpowiednie dobranie częstotliwości centralnej do warunków pomiaru, właściwości obiektu i celu pomiarów pozwoli uzyskać wysoką jakość danych. Często pomiary radarowe wykonuje się bez pełnej wiedzy o badanym obiekcie, a to czy częstotliwość została odpowiednio dobrana można niejednokrotnie stwierdzić dopiero podczas pomiarów. Dlatego zaleca się przygotowanie do pomiarów również innych anten o wyższej i niższej częstotliwości.

3.4 Przetwarzanie danych

Spośród wszystkich kwestii związanych z techniką radarową przetwarzanie i analiza sygnałów jest najbardziej kontrowersyjnym elementem procesu, którego celem jest uzyskanie rzeczywistego obrazu badanej struktury. Dostępne dziś narzędzia często stwarzają pokusę stosowania zaawansowanych technik przetwarzania danych, aż do momentu uzyskania „odpowiedniego” obrazu. Tymczasem „odpowiedni” nie zawsze oznacza poprawny, a pytanie jak bardzo można rozszerzyć podstawowe techniki obróbki bez zniekształcania faktycznego obrazu struktury powinno towarzyszyć operatorowi ilekroć rozpoczyna pracę nad nowym projektem.

Podstawowe sposoby przetwarzania danych tj. korekta poziomu „zero”, filtracja, wzmocnienie sygnału oraz usuwanie tła (z ang. background removal filtering) przedstawiono poniżej. Ogólny i przystępny opis stosowanych technik przetwarzania można znaleźć między innymi w pracach (Young, i inni, 1995) i (Olhoeft, 2000). Bardziej wyszukane, techniki przedstawił (Daniels, 2004), natomiast (Lyons, 2004) opisał zaawansowane techniki cyfrowej obróbki sygnałów radarowych, których studiowanie i stosowanie wymaga szerokiej wiedzy i doświadczenia. Jednym z przykładów wysoce zaawansowanej techniki przetwarzania jest modelowanie numeryczne wprowadzane do metodyki interpretacji badań georadarowych, jak to przedstawił między innymi (Gołębiowski, 2004).

Jak powinien przebiegać proces przetwarzania sygnałów radarowych podaje między innymi (Jol, 2009), gdzie przedstawiono algorytm poprawnego przetwarzania danych uzyskanych z pomiarów refleksyjnych (Rysunek 3.10).



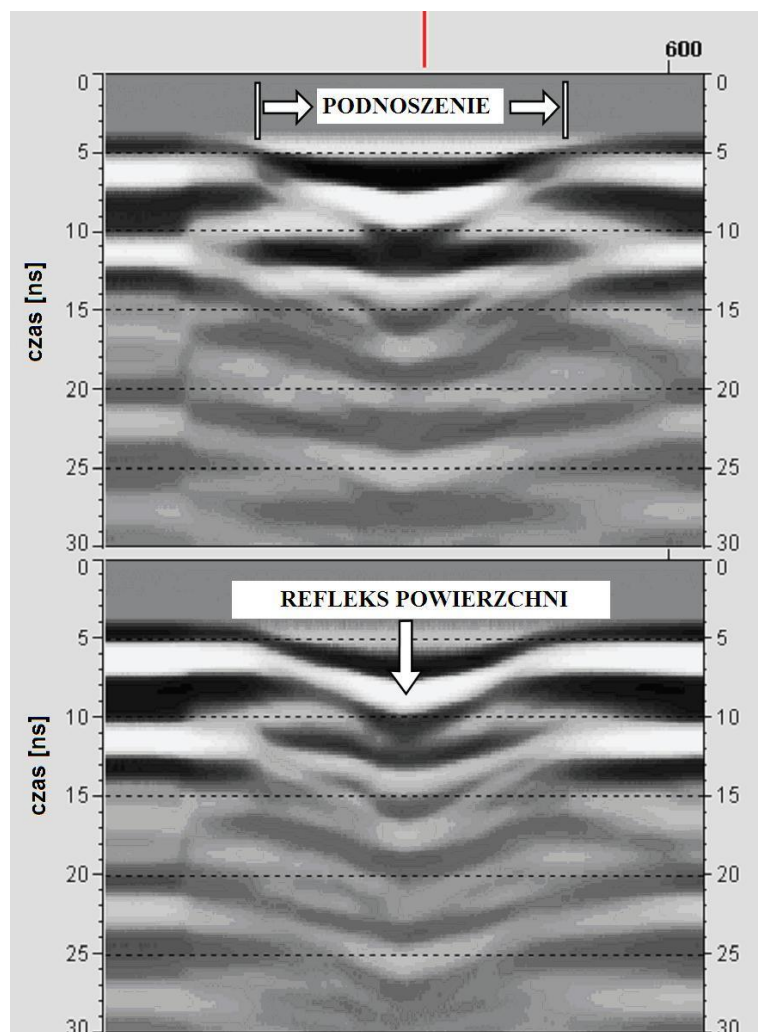
Rysunek 3.10 Typowy schemat procesu przetwarzania sygnałów radarowych z pomiarów refleksyjnych

Wyznaczenie poziomu powierzchni najłatwiej określić przez zarejestrowanie sygnału w trakcie podnoszenia anteny. W tym teście usuwa się tło z danych, pozostawiając jedynie refleks z badanej powierzchni (Rysunek 3.11 przygotowany na podstawie opracowania (Saarenketo, 2006)). Korekta poziomu „zero” jest przedmiotem wielu rozważań i publikacji. W publikacji (Yelf, 2004) przedstawiono opis różnych metod wyznaczania poziomu „zera”.

Filtracja stosowana jest w celu usunięcia szumów i poprawienia jakości obrazów radarowych. Istnieje wiele różnych typów filtrów, od częstotliwościowych pasmowo-przepustowych, przez filtry w dziedzinie czasu, aż do filtrów dwuwymiarowych jak np. filtracja f - k (z ang. frequency-wavenumber).

Filtry można podzielić na dwie podstawowe grupy: jednowymiarowe 1D (operacje wykonywane są na pojedynczych skanach) i dwuwymiarowe 2D (operacje kontekstowe, wykonywane na grupach skanów). Filtry 1D zawierają podstawowe sposoby operacji takie jak uśrednianie, mediana, odejmowanie średniej ruchomej (z ang. dewow) i pasmowo przepustowe filtry częstotliwościowe i w praktyce są pożyteczne jedynie w usuwaniu szumu w częstotliwościach poniżej i powyżej częstotliwości GPR. Filtry 2D to grupa procedur takich jak średnia ruchoma, odejmowanie średniej obliczonej dla zadanej sekcji, odejmowanie średniej obliczonej dla całej sekcji (z ang. background

removal) i filtry pasmowo przepustowe (domena liczby skanów). Filtry 2D stosowane są do usuwania poziomych refleksów wielokrotnych, silnych refleksów bezpośrednich.



Rysunek 3.11 Określenie refleksu powierzchni przy pomocy testu podnoszenia wykonanego anteną groun-coupled o częstotliwości 200 MHz

W celu poprawy jakości zarejestrowanych obrazów konieczne jest zastosowanie odpowiedniego wzmocnienia sygnałów. Jak podaje (Jol, 2009) najpowszechniejszymi funkcjami wzmacniającymi są:

- SEC (z ang. spherical exponential compensation) – automatycznie koryguje amplitudę sygnału, w którym energia zmniejsza się ze względu na geometryczne efekty rozchodzenia się fali,
- predefiniowane przez użytkownika – wzmocnienie może być stałe, linowe lub wykładnicze,
- AGC (z ang. automatic gain control) – automatyczna regulacja wzmocnienia oparta jest na różnicy między średnią amplitudą obliczoną w zadanym oknie czasowym a maksymalną amplitudą skanu.

4 Opracowanie założeń do programu badań geotechnicznych i georadarowych

Zakres niezbędnych informacji potrzebnych do prawidłowego zaprojektowania nowej konstrukcji drogowej bądź opracowania projektu naprawy istniejącej drogi obejmuje między innymi rozpoznanie warunków gruntowo-wodnych. Warunki gruntowe, to rodzaj gruntu wraz z oceną ich wysadzinowości (wrażliwości na powstawanie wysadzin w okresie zamarzania) oraz nośności (wytrzymałości gruntu) niezbędnej do przeniesienia ciężaru konstrukcji i obciążenia użytkowego. Warunki wodne, to poziom występowania wody gruntowej. Znajomość tych warunków pozwala wyznaczyć tak zwaną grupę nośności podłoża G_i , dla którego projektuje się indywidualnie lub przyjmuje z Katalogów^{12,13} konstrukcję nawierzchni odpowiednią do założonej kategorii ruchu KR o określonej żywotności (20 lub 30 lat). Planowanie badań oraz zakres, metody i sposoby ustalania warunków wodno-gruntowych, jakie należy wykonać w celu opracowania dokumentacji dla potrzeb budowy lub remontu dróg zawarte są w odpowiednich przepisach i na ich podstawie wzorowano się programując badania do niniejszego projektu badawczego.

Generalnie, określenie warunków wodno-gruntowych wymaga wykonania geotechnicznych badań terenowych i badań laboratoryjnych na pobranych próbkach z terenu. Badania terenowe polegają na wierceniach geotechnicznych, sondowaniach (statycznych lub dynamicznych) oraz pobraniu próbek do szczegółowych badań w laboratorium. Badania terenowe są punktowe, tzn. wykonywane, co kilkadziesiąt lub kilkaset metrów, w zależności od stopnia skomplikowania terenu oraz rodzaju projektowanego obiektu. Na podstawie badań punktowych, geotechnicy przyjmują (szacują) układy warstw gruntów i poziomy wody występujące pomiędzy punktami badawczymi. W niniejszej pracy przewiduje się wykonać badania geotechniczne i dokumentację metodą klasyczną, jak obecnie się te prace dokumentuje.

Badania georadarowe GPR mają być uzupełnieniem badań geotechnicznych klasycznych, dlatego planuje się przeprowadzenie badań porównawczych obiema metodami i dokonanie interpretacji obrazu georadarowego w stosunku do rzeczywiście istniejących warunków gruntowo-wodnych określonych na podstawie obecnie obowiązującej metodyki.

Połączenie obu tych technik dokumentowania powinno zdecydowanie zmniejszyć ilość wykonywania kłopotliwych badań geotechnicznych klasycznych do niezbędnego minimum, a ich lokalizację wybrać precyzyjnie na podstawie obrazu radarowego.

4.1 Główne założenia programu badań

Ze względu na zróżnicowane poziomy wód gruntowych w różnych porach roku i ich wpływ na stan nawilgocenia i nośność gruntów planuje się wykonywać badania 4 razy w roku.

¹² Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych, IBDiM.

¹³ Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych, IBDiM

Planuje się badania GPR, co najmniej 4 razy w roku w następujących okresach:

- wiosna (najwyższy poziom wód gruntowych),
- lato, (niski poziom wód gruntowych),
- jesień, (najniższy poziom wód gruntowych),
- zima (niski poziom wód gruntowych, zamarzanie gruntów).

Planuje się badania geotechniczne, 4 razy w roku j.w:

- badania poziomów wody w piezometrach,
- wiercenia geotechniczne wraz z pobraniem próbek gruntów do oznaczenia wilgotności naturalnej (w pobliżu piezometrów)

Odcinek badawczy powinien posiadać dł. 100÷500m,

4.1.1 Szczegółowy zakres badań geotechnicznych klasycznych

Niżej przedstawiony w zakres badań należy wykonać jednorazowo dla każdego odcinka badawczego. Natomiast badania geotechniczne cykliczne (4 razy w roku) wykonywać należy tylko dla następujących cech:

- wiercenia badawcze do głębokości 5m, wg PN-B-04452
- wilgotność naturalna, wg PN-88/B-04481
- obserwacja poziomu zwierciadła wody gruntowej w piezometrze

Wiercenia i sondowania wykonać należy w odległościach, co 50 mb:

- wiercenia badawcze do głębokości 5m, wg PN-B-04452
- sondowanie dynamiczne do głębokości 5m, wg PN-B-04452 (tylko w gruntach niespoistych)
- pobranie próbek do badań laboratoryjnych z każdej warstwy geotechnicznej, wg PN-B-04452
- obserwacja poziomu wody gruntowej.

Nie można wykluczyć, że zajdzie konieczność wykonania dodatkowego odwiertu w innym miejscu i przeprowadzenia badań geotechnicznych. Lokalizacja tych miejsc zostanie ustalona po pierwszym badaniu GPR (istotne zaburzenie w badaniu GPR wskazujące na zmianę warunków wodno-gruntowych). W tym miejscu przeprowadzić należy pełen zakres badań.

Zakres badań laboratoryjnych jest następujący:

- przesiew, analiza areometryczna (w zależności od rodzaju gruntu) z ustaleniem rodzaju gruntu, wg PN-88/B-04481
- wilgotność naturalna, wg PN-88/B-04481
- wskaźnik piaskowy, wg PN-EN 933-8
- kapilarność bierna, wg PN-60/B-04493
- granice Atterberga i ustalenie IL, IP (grunty spoiste), wg PN-88/B-04481
- zawartość części organicznych, o ile występują, wg PN-88/B-04481

4.1.1.1 Opracowanie dokumentacji geotechnicznej

Należy opracować dokumentację geotechniczną w formie poszczególnych przekrojów pionowych oraz przekroju podłużnego z wydzieleniem warstw gruntów (kolorami) i podaniem właściwości gruntów i poziomów wody gruntowej. Należy wykonać dokumentację geotechniczną dla każdego okresu (4 razy w roku).

Na podstawie przygotowanej dokumentacji geotechnicznej zostaną określone warunki wodno-gruntowe i grupa nośności G_i podłoża według obecnie obowiązujących przepisów. Tak wykonana dokumentacja geotechniczna „klasyczna” posłuży do interpretacji wyników badań GPR.

4.1.2 Zakres badań radarowych

Badania radarowe należy wykonać podstawowym zestawem anten o częstotliwościach 400 MHz i 270 MHz. Dopuszcza się zastosowanie anten o innych częstotliwościach, w zależności od wymaganych rezultatów badania i rodzaju nadanego obiektu. Pomiary można wykonać każdą anteną oddzielnie lub z jednoczesnym wykorzystaniem obu anten (w jednostkach wyposażonych w min dwa kanały pomiarowe).

Badania georadarowe należy wykonać zgodnie z metodyką i ustawieniami systemu pomiarowego opisanymi w punkcie 5.2. Pomiary można wykonać przy użyciu wózka oraz specjalnej rączki do anten typu ground-coupled (Rysunek 4.1). Przy pomiarach z jednoczesnym wykorzystaniem obu anten konieczne są dwie osoby – operator pcha wózek i kontroluje zapis danych, natomiast pomocnik ciągnie dodatkową antenę, utrzymując stałą odległość od wózka (Rysunek 4.2). Różnice w pozycjach pomiarowych obu anten należy skorygować na etapie interpretacji danych.



Rysunek 4.1 Anteny typu ground-coupled; z lewej antena o częstotliwości 270 MHz z zamontowaną rączką, z prawej antena o częstotliwości 400 MHz umieszczona na wózku wyposażonym w dystansomierz



Rysunek 4.2 Pomiar z wykorzystaniem obu anten jednocześnie

5 Laboratoryjna ocena zdolności metody radarowej pod kątem możliwości pomiaru podstawowych cech dielektrycznych różnych rodzajów gruntów

Przeprowadzone w ramach tego zadania pomiary laboratoryjne miały na celu określenie dokładności uzyskiwanego obrazu radarowego oraz czynników wpływających na uzyskiwaną jakość danych. Zebrane dane stanowiły podstawę systemu pomiarowego i opracowania nastawów do pomiarów terenowych.

W badaniach skoncentrowano się na dwóch zasadniczych czynnikach wpływających na jakość pomiarów radarowych: wilgotność i wysokość zwierciadła wody gruntowej oraz stabilność sygnałów i dokładność identyfikacji obiektów.

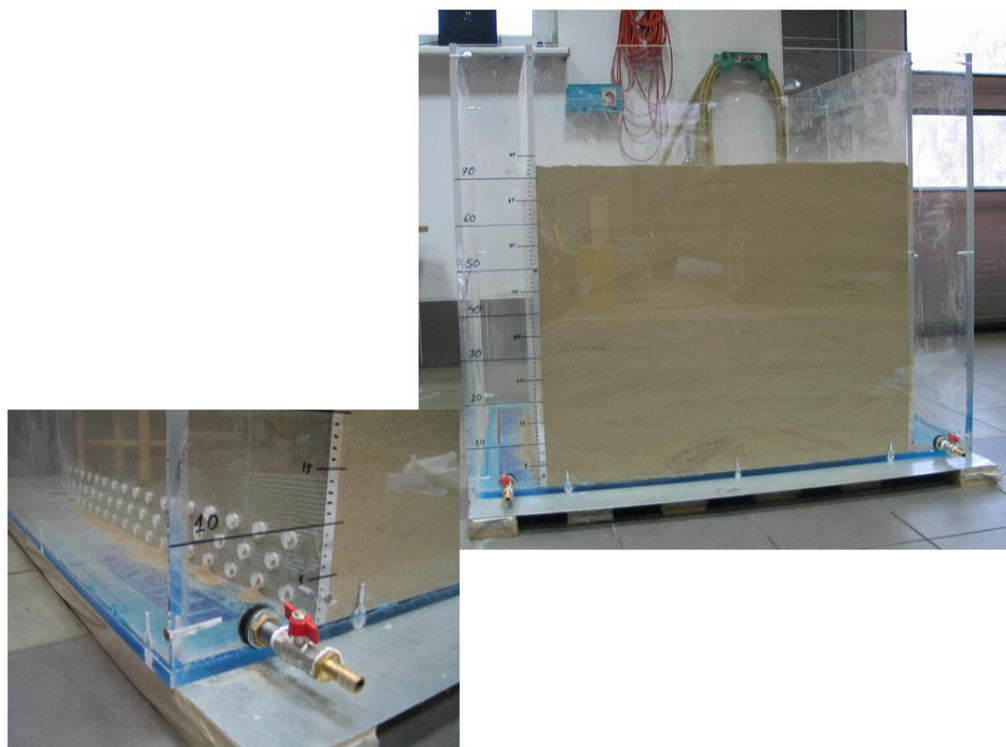
5.1 Ocena wpływu zwiększonej wilgotności w gruntach na otrzymywany sygnał radarowy

Jak wykazano wcześniej istotnym czynnikiem wpływającym na jakość otrzymywanych sygnałów jest woda. W badaniach geotechnicznych identyfikacja zwierciadła wody gruntowej oraz określenie wilgotności gruntów jest zadaniem zasadniczym. W badaniach radarowych zwiększona wilgotność gruntów lub płytko występujące zwierciadła wody gruntowej może być przyczyną poważnych zaburzeń, niekiedy wręcz uniemożliwiając jakąkolwiek interpretację.

Przeprowadzone badania laboratoryjne miały na celu określenie zmian sygnału fali elektromagnetycznej w zależności od zmieniającej się wilgotności ośrodka gruntowego. Do tego celu zbudowano zbiornik, który posłużył jako stanowisko badawcze (Rysunek 5.1). Zbiornik, wykonany z pleksiglasu grubości 12 mm, wyposażono w dodatkowe komory do napełniania wodą oraz zawory spustowe. Całość ustawiono na płycie

metalowej w celu łatwego i precyzyjnego wyznaczenia spodu zbiornika w zarejestrowanych skanach.

Komorę na materiał wypełniono warstwą piasku drobnoziarnistego o grubości 72 cm. Ze względów praktycznych piasek posłużył jako podstawowy materiał badawczy (szybsza infiltracja). Warstwę nasączano etapami od spodu, przez otwory między komorami na materiał i wodę.

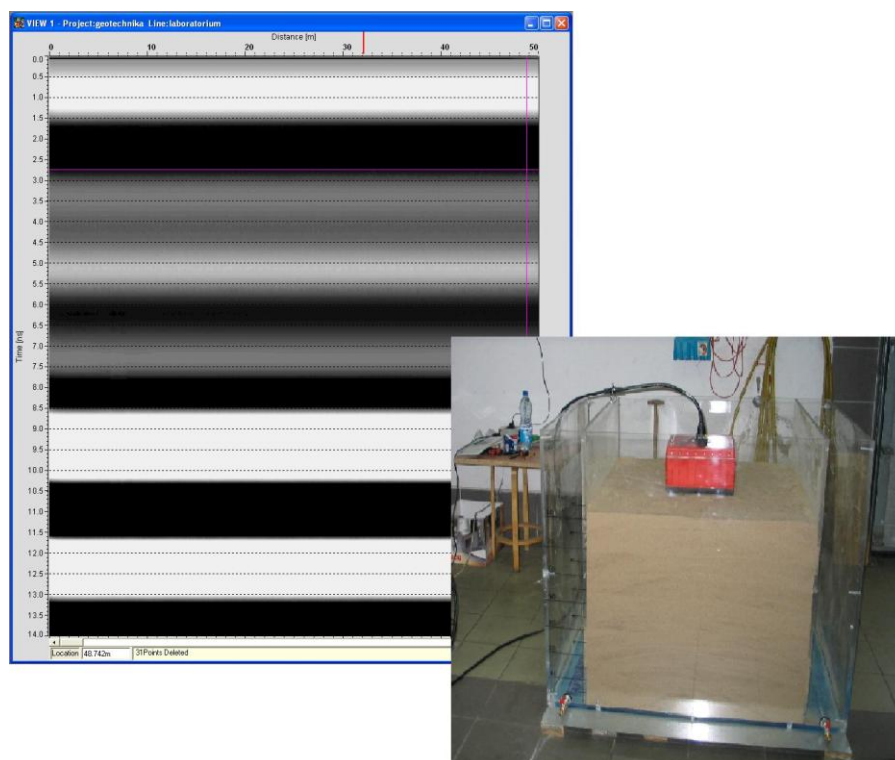


Rysunek 5.1 Stanowisko badawcze

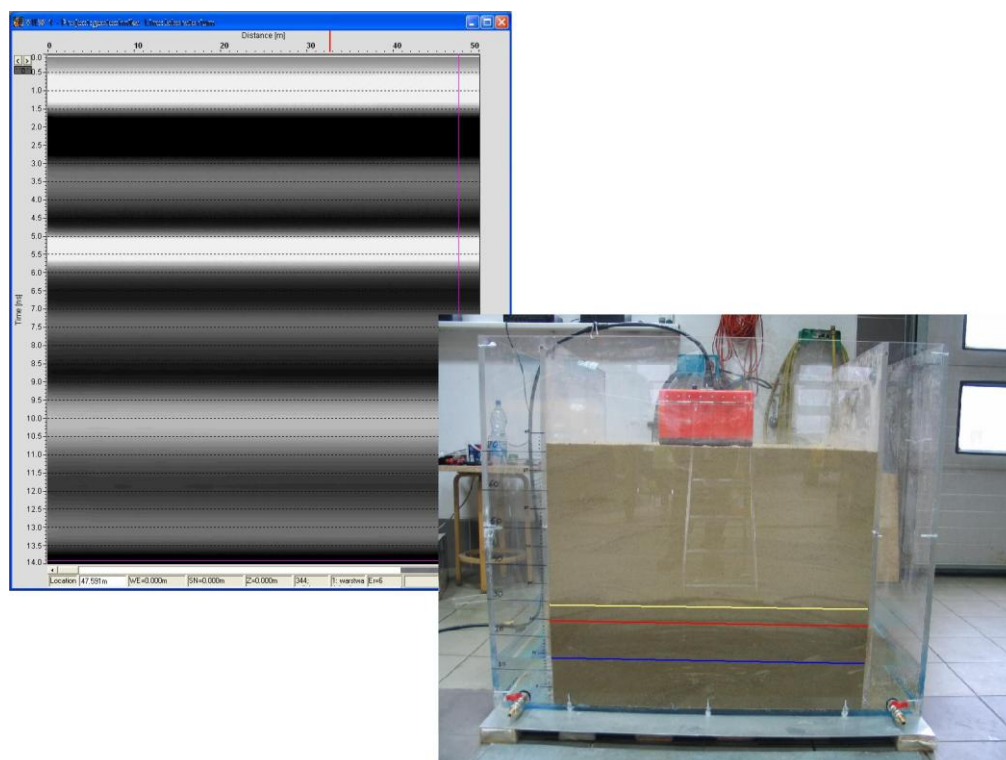
Na Rysunkach 5.2-5.6 przedstawiono wybrane wyniki pomiarów piasku przy zmieniającym się poziomie zwierciadła wody. Wyniki przeprowadzonych pomiarów w wskazują na wysoką czułość układu pomiarowego na zmianę zawilgocenia podłoża. Ten poziom czułości obserwowany jest jeszcze przy ustabilizowanym poziomie wody na głębokości do 20-25 cm. Płycej położone zwierciadło wody jest „niezauważalne” przez system pomiarowy. Wynika to z ograniczeń anteny związanych z rozdzielczością pionową, którą producent sprzętu oszacował na poziomie 30 cm.

Zwraca uwagę wystąpienie poza ustalone okno czasowe refleksu płyty metalowej zarejestrowane już przy poziomie wody 59 cm (Rysunek 5.3). Jest to wynik znacznego spowolnienia prędkości fali w ośrodku jakim jest silnie nawodniony piasek.

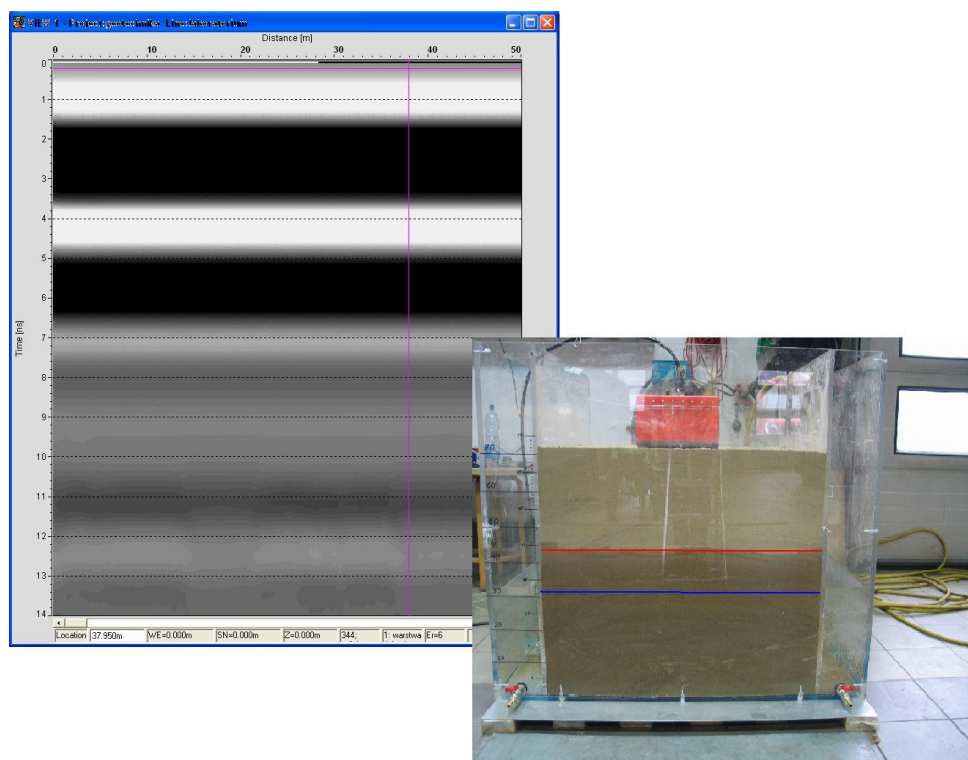
W praktyce ocena układu warstw gruntów mocno zawilgoconych z płytko zalegającym zwierciadłem wody gruntowej może, zwłaszcza w przypadku zastosowania jedynie anteny 400 MHz, okazać się trudna lub wręcz niemożliwa. Dlatego istotne jest aby każdorazowo wykonywać pomiary przynajmniej podwójnym zestawem anten (równocześnie bądź w pojedynczych przejazdach), o różnych częstotliwościach, a tym samym różnych rozdzielczościach pionowych i głębokościach penetracji.



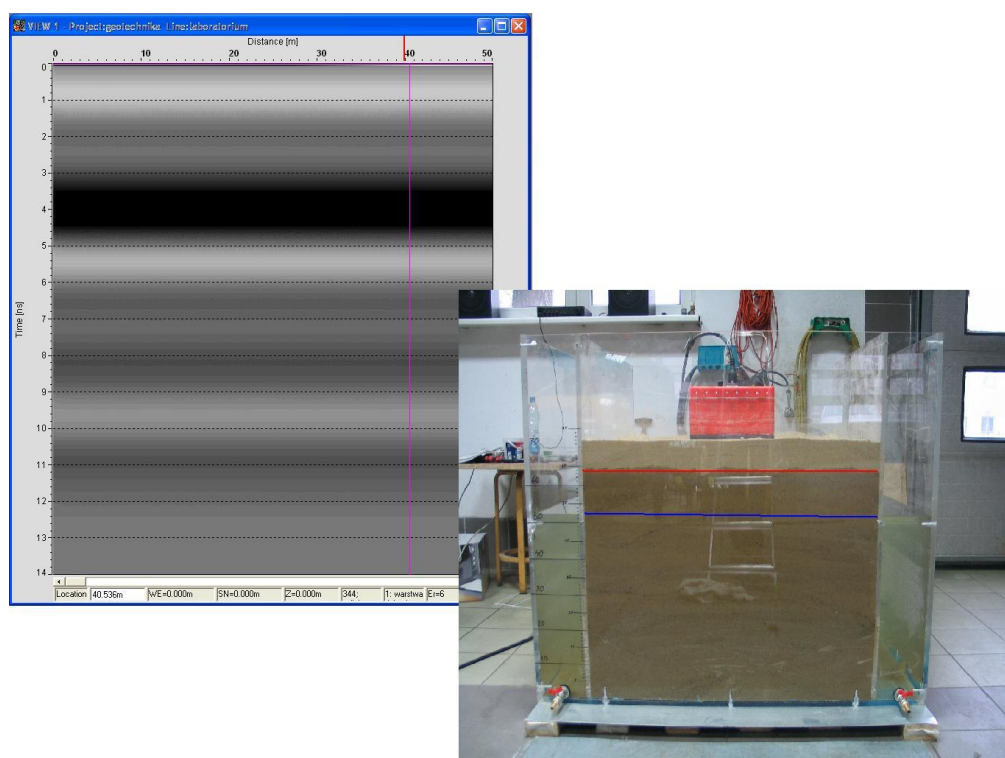
Rysunek 5.2 Pomiar piasku przed dolaniem wody



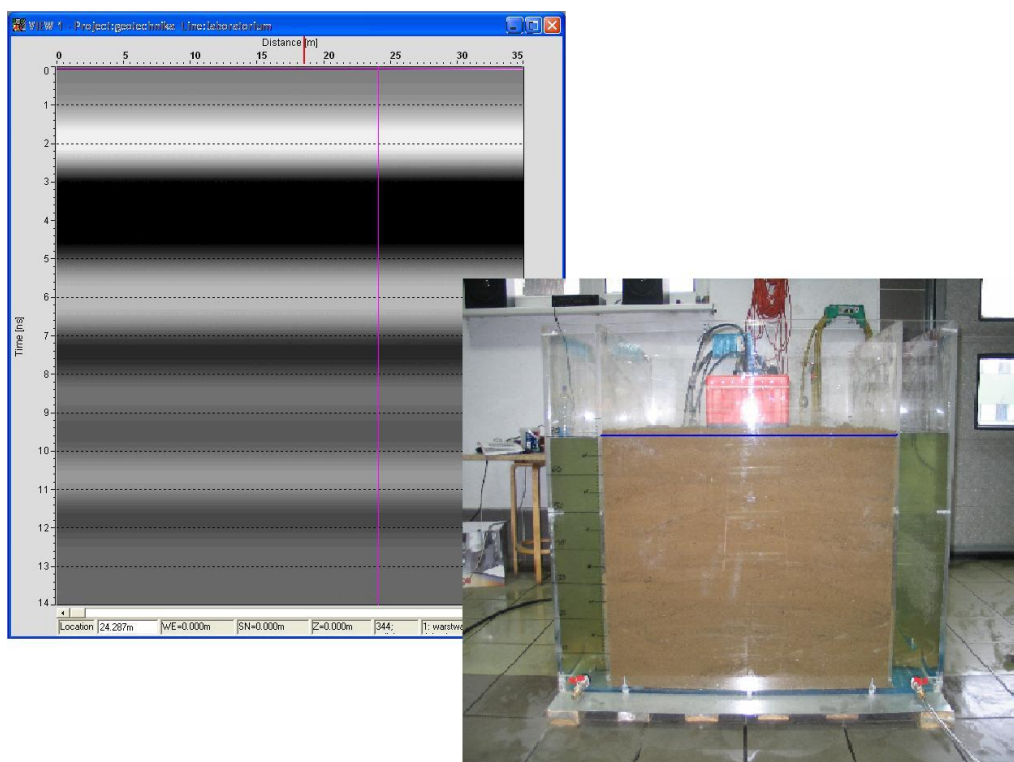
Rysunek 5.3 Pomiar po ustabilizowaniu się zwg na głębokości 59 cm, linia niebieska oznacza ustabilizowany poziom wody, linia czerwona oznacza zasięg podciągania kapilarnego



Rysunek 5.4 Pomiar po ustabilizowaniu się zwg na głębokości 39 cm, linia niebieska oznacza ustabilizowany poziom wody, linia czerwona oznacza zasięg podciągania kapilarnego



Rysunek 5.5 Pomiar po ustabilizowaniu się zwg na głębokości 20 cm, linia niebieska oznacza ustabilizowany poziom wody, linia czerwona oznacza zasięg podciągania kapilarnego

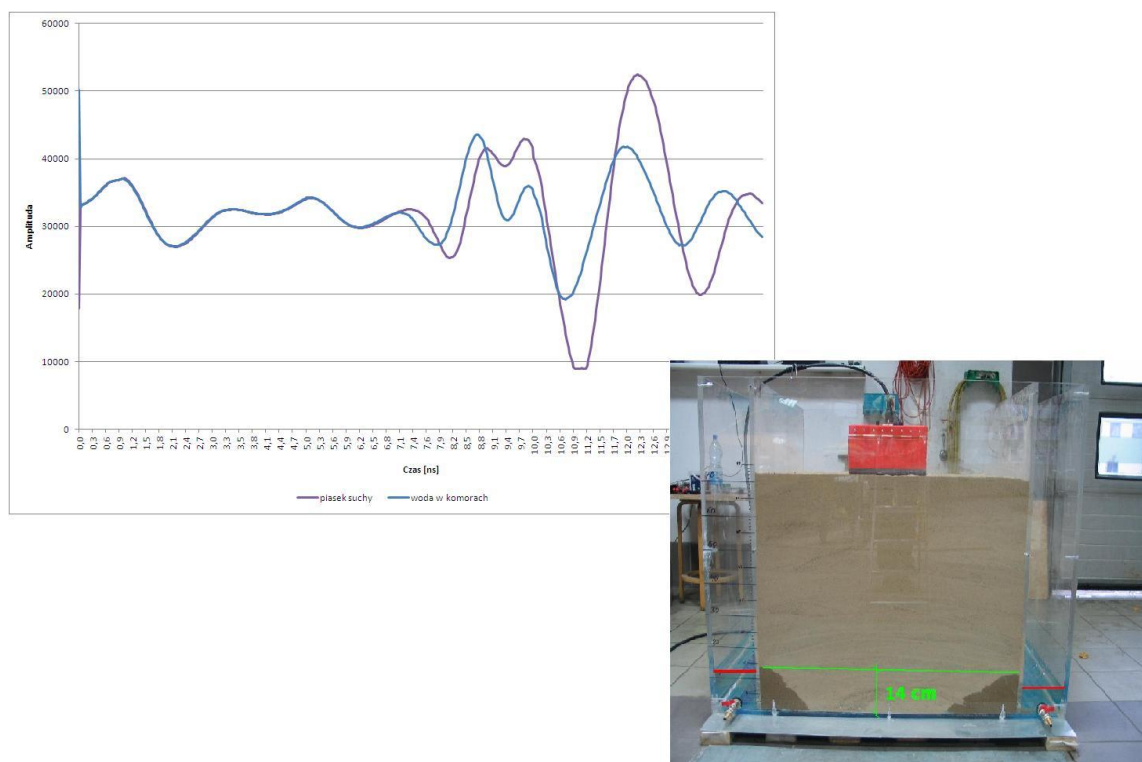


Rysunek 5.6 Pomiar po ustabilizowaniu się zwg na głębokości 0 cm, linia niebieska oznacza ustabilizowany poziom wody

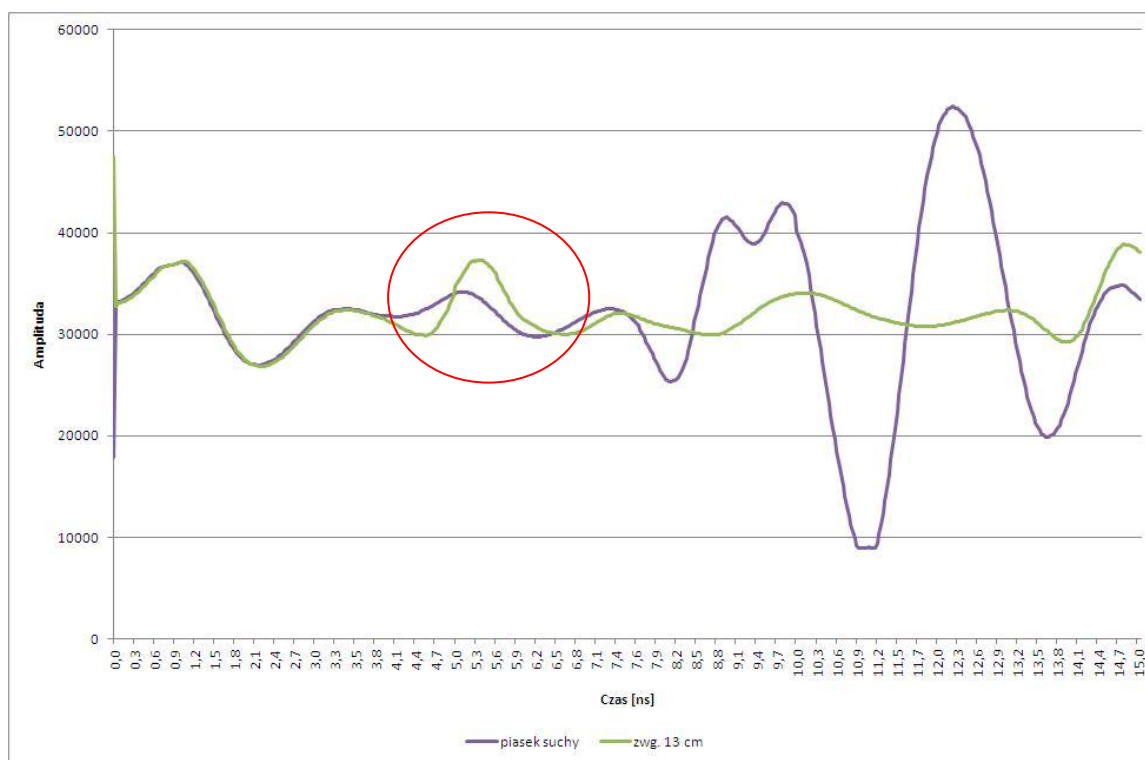
Poniżej zaprezentowano obrazy oscyloskopów pojedynczych sygnałów w porównaniu z refleksem uzyskanym podczas pomiaru piasku suchego.

Wpływ wody na kształt uzyskanego sygnału można zaobserwować już na początku przeprowadzonego eksperymentu (Rysunek 5.7). Tuż po wlaniu wody do komór i jej infiltracji widoczna jest nie tyle zmiana kształtu sygnału, który w obrębie refleksu od płyty metalowej pozostaje niezmienny, lecz jego przesunięcie w kierunku początku okna pomiarowego.

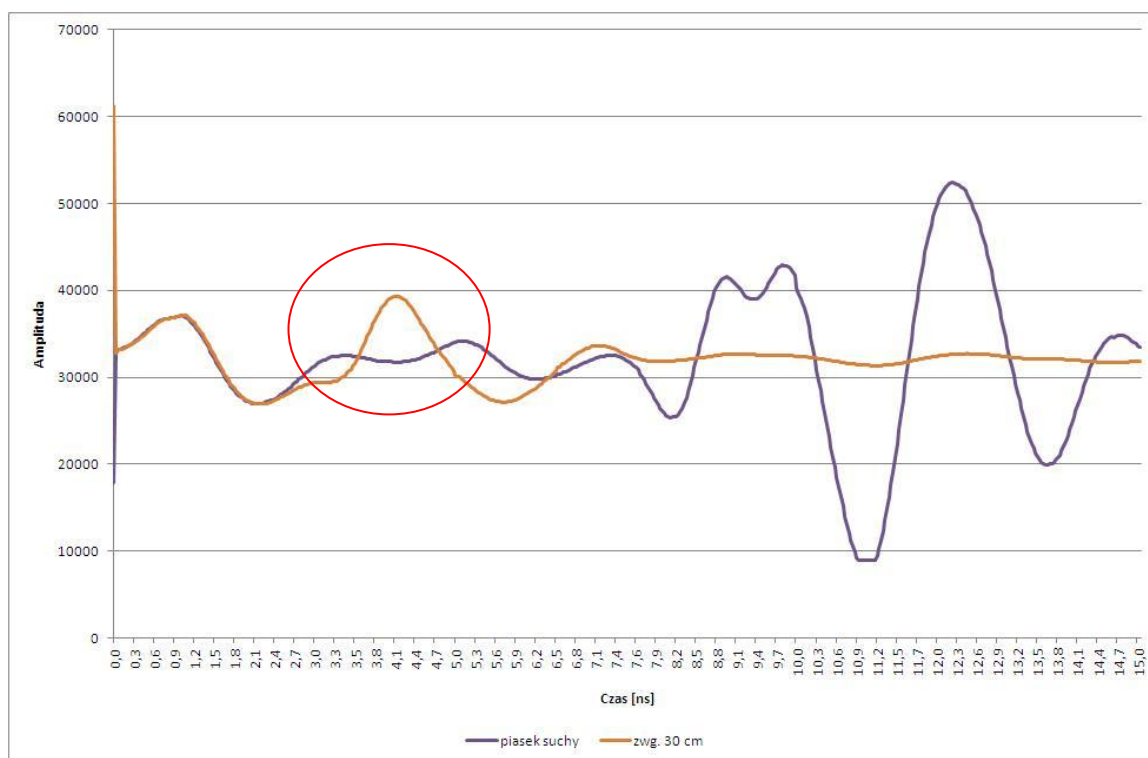
Rysunki 5.8 – 5.11 przedstawiają zmianę kształtu sygnału w zależności od głębokości ustabilizowanego poziomu wody w gruncie. Jak wcześniej wspomniano interpretacja poziomu zwierciadła wody możliwa jest jeszcze przy głębokości ok. 25 cm (Rysunek 5.10). Płytsze położenie powoduje, że refleks zwierciadła wody wchodzi w obszar refleksu bezpośredniego, zmieniając jego położenie względem początku okna pomiarowego.



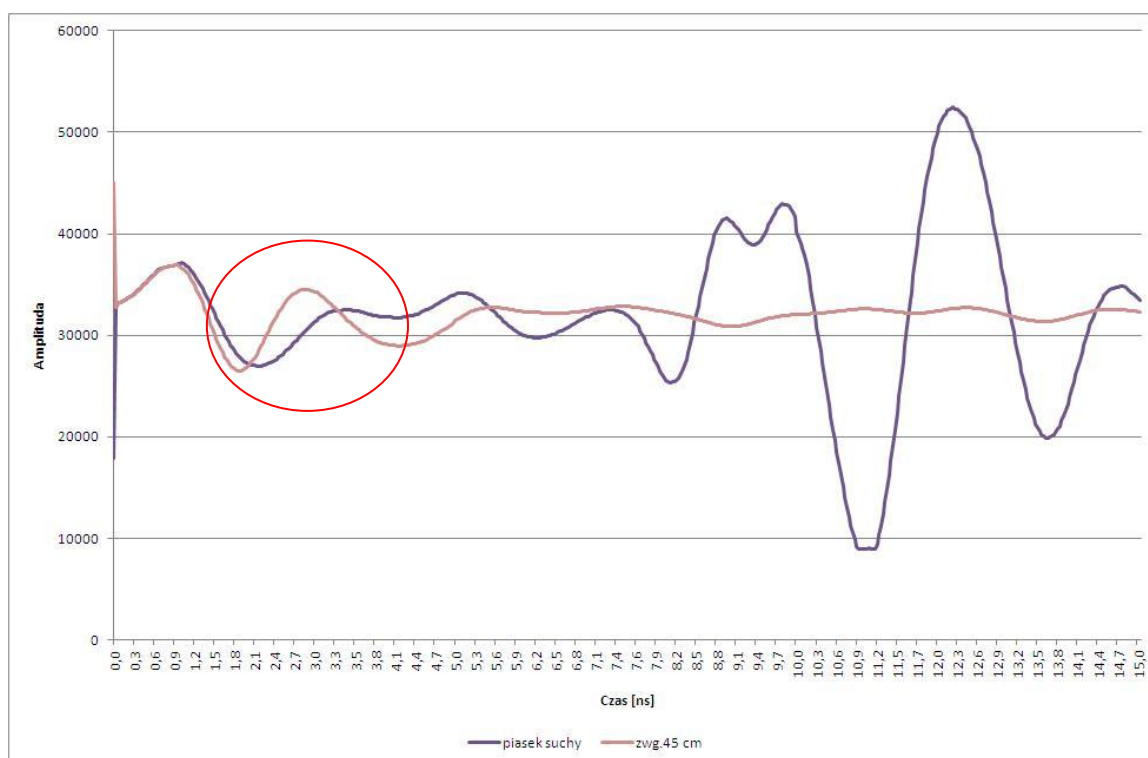
Rysunek 5.7 Oscyloskop sygnału przed i po dolaniu wody do komór



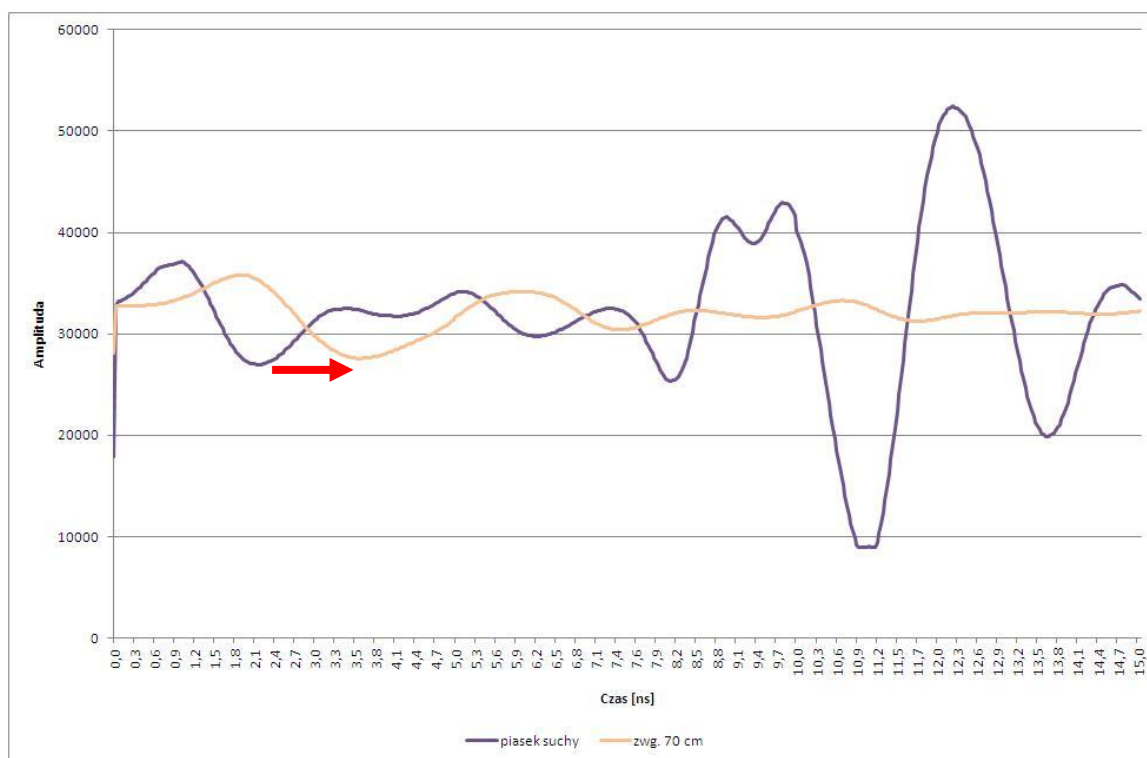
Rysunek 5.8 Oscyloskop sygnału po ustabilizowaniu się zwg. na głębokości 59 cm oraz pojedynczy skan z pomiaru piasku suchego



Rysunek 5.9 Oscyloskop sygnału po ustabilizowaniu się zwg. na głębokości 39 cm oraz pojedynczy skan z pomiaru piasku suchego



Rysunek 5.10 Oscyloskop sygnału po ustabilizowaniu się zwg. na głębokości 27 cm oraz pojedynczy skan z pomiaru piasku suchego



Rysunek 5.11 Oscyloskop sygnału po ustabilizowaniu się zwg. na głębokości 2 cm oraz pojedynczy skan z pomiaru piasku suchego

Na podstawie pomiarów dokonano obliczeń stałej dielektrycznej, której wartości wahały się w zakresie od 4,5 dla piasku suchego do 15,10 dla piasku mokrego. Uzyskany wynik mieści się w zakresie podawanym przez innych autorów, który wynosi od 3 do 30.

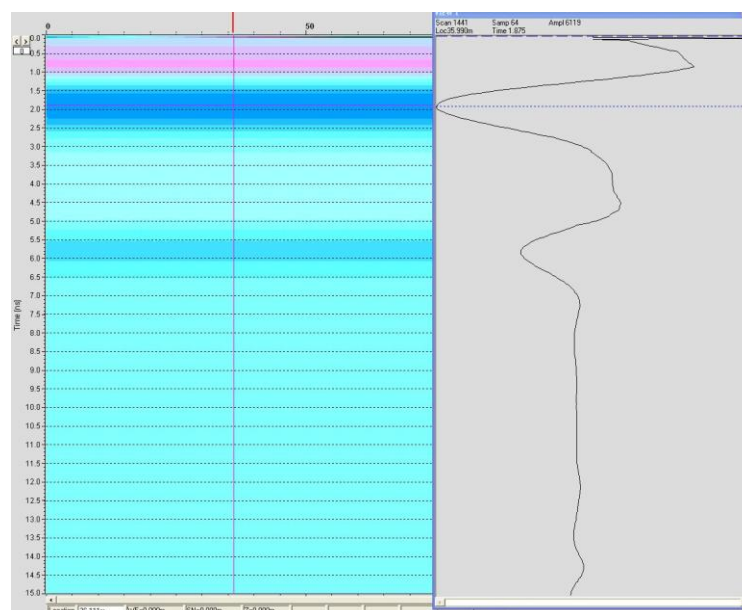
Istotną obserwacją dokonaną w trakcie badań jest to, że znacznie łatwiejsze jest zidentyfikowanie warstwy zawilgoconej wskutek podciągania kapilarnego niż bezpośredniego położenia zwierciadła wody gruntowej. W badaniach terenowych zjawisko to może okazać się trudne do wyeliminowania, a podczas interpretacji danych może okazać się, że występują niewielkie różnice między danymi z odwiertów a wynikami pomiarów radarowych. Sytuacja taka zapewne będzie występować w przypadku odcinków, na których występują grunty o różnych właściwościach filtracyjnych.

5.2 Analiza zdolności systemu pomiarowego oraz jego kalibracja na podstawie badań laboratoryjnych

W ramach oceny zdolności systemu pomiarowego przeprowadzono szereg testów laboratoryjnych. Do podstawowych pomiarów jakie przeprowadzono należy zaliczyć testy stabilności sygnału emitowanego, identyfikacji powierzchni oraz poprawnej identyfikacji obiektów i grubości warstw.

Stabilność systemu pomiarowego i anteny sprawdzono przez pomiar sygnału emitowanego w powietrzu (Rysunek 5.12). Jest to najprostsza i zarazem najskuteczniejsza metoda oceny stabilności emitowanego sygnału.

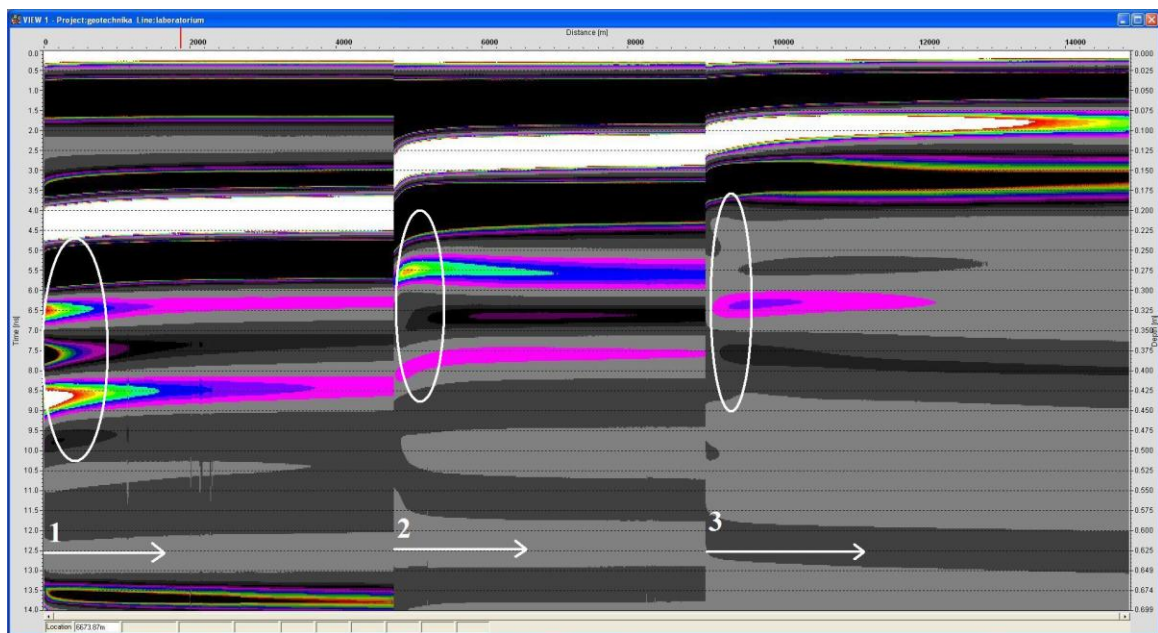
Przeprowadzone pomiary wykazały, że niestabilność systemu pomiarowego jest niewielka, a niekorzystne efekty z tym związane można zredukować poprzez odpowiednie wygrzewanie aparatury.



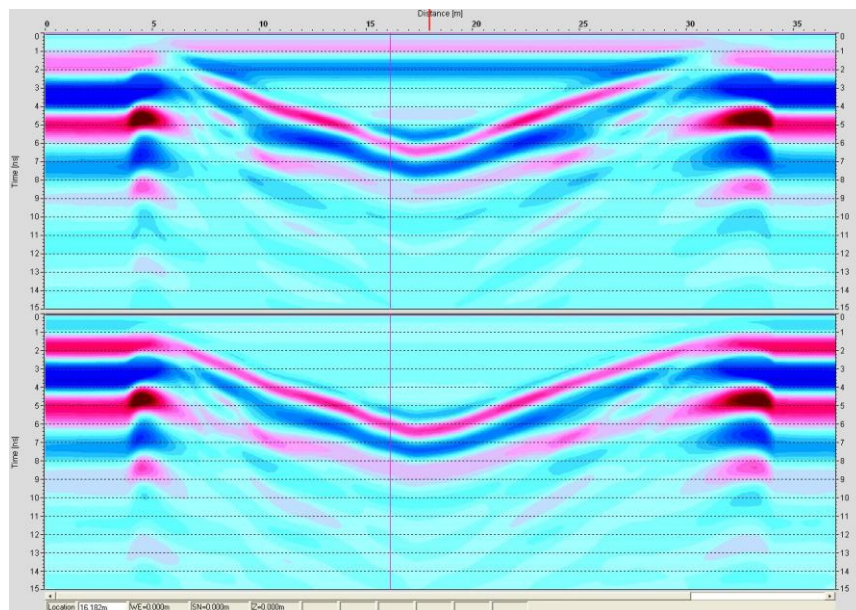
Rysunek 5.12 Ocena stabilności sygnału emitowanego przez pomiar sygnału tła

Niestabilność pomiaru potwierdziły badania ciągłe piasku o zmieniającym się poziomie zwierciadła wody gruntowej (Rysunek 5.13). Pomiary wykonano w trzech seriach pomiarowych, każda po ok. 8 godzin, przy poziomie zwierciadła wody 17cm, 33cm i 45cm. Oprócz widocznych zmian sygnału (oznaczono na rysunku) związanych z stabilizacją poziomu wody widoczne są zaburzenia sygnału związane z niedostatecznym rozgrzaniem systemu pomiarowego. Tak jak wcześniej wspomniano zniekształcenia te są niewielkie i nie wpływają w sposób zasadniczy na jakość pomiarów prowadzonych rutynowo w warunkach terenowych.

W przypadku anten typu ground-coupled nieco problematyczne jest poprawne określenie powierzchni pomiaru. Jak wcześniej przedstawiono (patrz punkt 3) najczęściej stosowany do tego celu jest test podnoszenia anteny. W ramach badań laboratoryjnych przeprowadzono tego rodzaju testy (Rysunek 5.14). Uzyskane wyniki badań wskazały, że test taki powinien być wykonywany każdorazowo przed wykonaniem pomiaru i zapisany w początkowej części pliku pomiarowego.



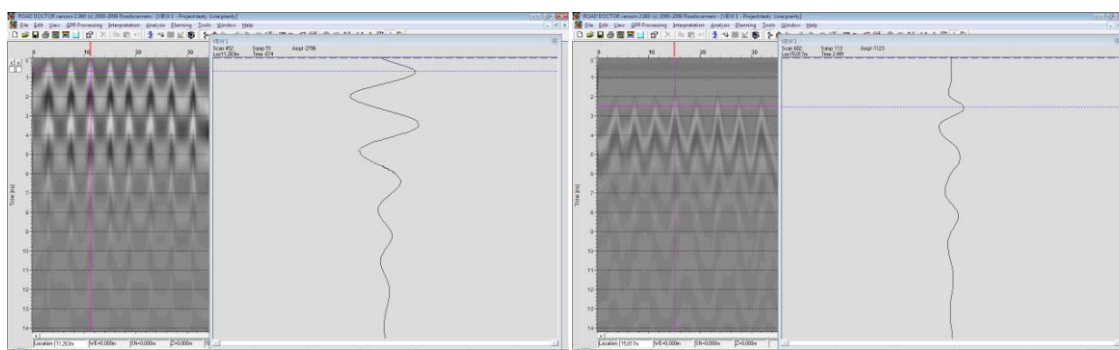
Rysunek 5.13 Ocena stabilności sygnału emitowanego – pomiar długości (po ok. 8h każdy), cyfry 1,2 i 3 oznaczają rozpoczęcie kolejnego pomiaru, zmiany związane z niestabilnością systemu oznaczono elipsami



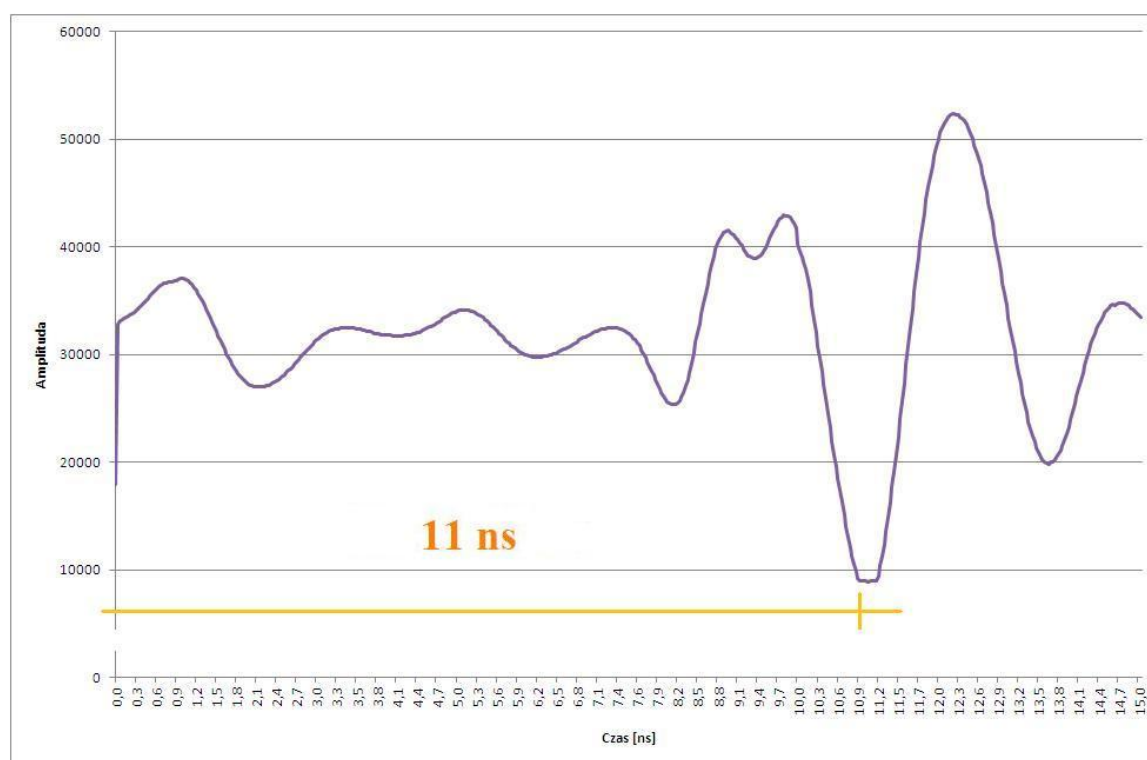
Rysunek 5.14 Test podnoszenia anteny nad blachą (rysunek górny bez background removal, rysunek dolny z background removal)

Przeprowadzono również pomiary służące określeniu dokładności identyfikacji obiektów i grubości warstw. W tym celu wykonano pomiary prętów miedzianych umieszczanych poprzecznie na różnych głębokościach oraz standardowe pomiary warstwy o znanej grubości. Na Rysunku 5.15 przedstawiono zarejestrowane sygnały odbite od prętów umieszczonych na dwóch głębokościach 0 cm i 50 cm, natomiast Rysunek 5.16 przedstawia pojedynczy skan z pomiaru grubości warstwy piasku o grubości 72 cm.

Badania wykazały wysoką dokładność pomiaru. W przypadku pomiaru bardzo dobrze odbijającego materiału jakim są pręty metalowe błąd pomiarowy nie przekraczał 2 %, a w przypadku pomiaru grubości warstwy piasku maksymalnie 3%.



Rysunek 5.15 Pręty $\varnothing$ 2mm na głębokości 0 cm (rysunek po lewej) i 50 cm (rysunek po prawej)



Rysunek 5.16 Ocena dokładności pomiaru - pomiar warstw piasku w stanie suchym, grubość warstwy 72 cm

5.3 Kalibracja systemu pomiarowego

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

- częstotliwość próbkowania:
 - do 100 kHz przy rejestracji danych z jednego kanału pomiarowego,
 - maksymalna przy równoczesnej rejestracji danych z dwóch kanałów pomiarowych,

- optymalna częstotliwość pomiaru: 10-20 cm,
- ilość sampli w skanie: 512,
- ilość bitów w samplu: 16,
- początek próbkowania sygnału: automatycznie zdefiniowany przez oprogramowanie pomiarowe w trakcie kalibracji
- szerokość okna próbkowania sygnału: 50ns dla anteny 400 MHz i 80ns dla anteny 270 MHz,
- wzmacnienie sygnału: dobrane automatycznie przez oprogramowanie pomiarowe w trakcie kalibracji.

Dla takich nastawów systemu pomiarowego przyjęto następującą metodykę pomiarów:

- przed rozpoczęciem zasadniczych pomiarów należy wygrzewać system w trybie zapisu przez co najmniej 20 min (można zastosować stacking¹⁴ sygnałów),
- przeprowadzić procedurę kalibracyjną na odcinku zgodnie z wymaganiami producenta,
- wykonać pomiar zasadniczy obiema antenami jednocześnie.

6 Badania na wytypowanych odcinkach badawczych w okresie lato-jesień-zima-wiosna

Badania terenowe przeprowadzono na trzech wytypowanych odcinkach badawczych:

- odcinek „Płońsk” zlokalizowany przy obwodnicy Płońska, w pasie rozdziału między jezdnią główną a jezdnią rozprawdającą (Rysunek 6.1),
- odcinek „Ząbki” zlokalizowany w Ząbkach koło Warszawy na niezabudowanej działce przy ul. Piłsudskiego (Rysunek 6.7),
- odcinek „Soczewka” zlokalizowany na terenie IBDiM (Rysunek 6.13).

Na odcinkach tych wykonano badania radarowe w czterech seriach: letniej, jesiennej, zimowej i wiosennej. W trzech seriach wykonano badania geotechniczne metodami klasycznymi według założeń przedstawionych w wcześniejszych punktach niniejszego sprawozdania. Pełne wyniki badań radarowych opracowano w formie prezentacji i mogą być odtwarzane przy pomocy przeglądarki RoadDoctor. Wyniki te zostały dołączone w formie załącznika do sprawozdania końcowego. Wyniki badań geotechnicznych zamieszczono w Załączniku.

Już wstępna analiza danych zebranych danych wskazuje na jeden podstawowy czynnik decydujący o jakości uzyskiwanych danych. **Czynnikiem tym jest zawilgocenie podłoża gruntowego. Im większa wilgotność warstw, przy wyższych poziomach zwierciadła wody gruntowej, tym uzyskanie dobrych jakościowo danych jest trudniejsze, a w niektórych wypadkach wręcz niemożliwe.** Przykładem tego jest odcinek w Płońsku. Przekrój tego odcinka należy określić jako złożony (Rysunek 6.2). Górną warstwę odcinka testowego, o grubości od 0.2 do 1.3 m stanowi humus lub

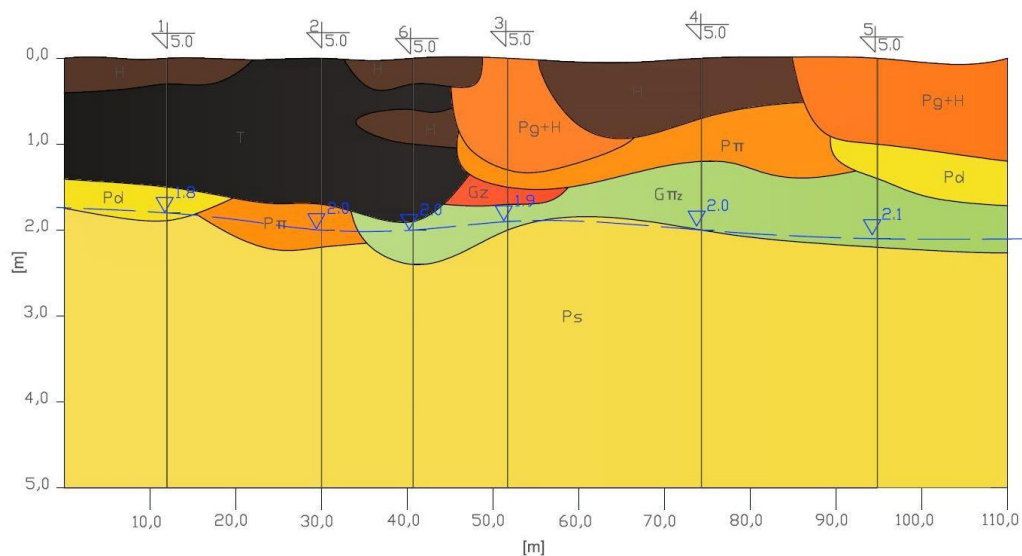
¹⁴ stacking – funkcja uśredniająca określoną przez operatora liczbę skanów

przemieszane z nim piaski gliniaste. Na odcinku od 0 do około 45 m, pod warstwą humusu zalegają torfy o miąższości warstwy od 1 do około 1.5 m. Na pozostałej części odcinka do hm. 1+10, do głębokości około 2 m p.p.t. zlokalizowano grunty spoiste lub mało spoiste zaliczane do kategorii G2-G4. Pod warstwami jw., do głębokości 5.0 m p.p.t. zalegają piaski średnie, stanowiące w stropie poziom wody gruntowej zlokalizowanej na głębokościach od 1.8-2.1 m p.p.t.

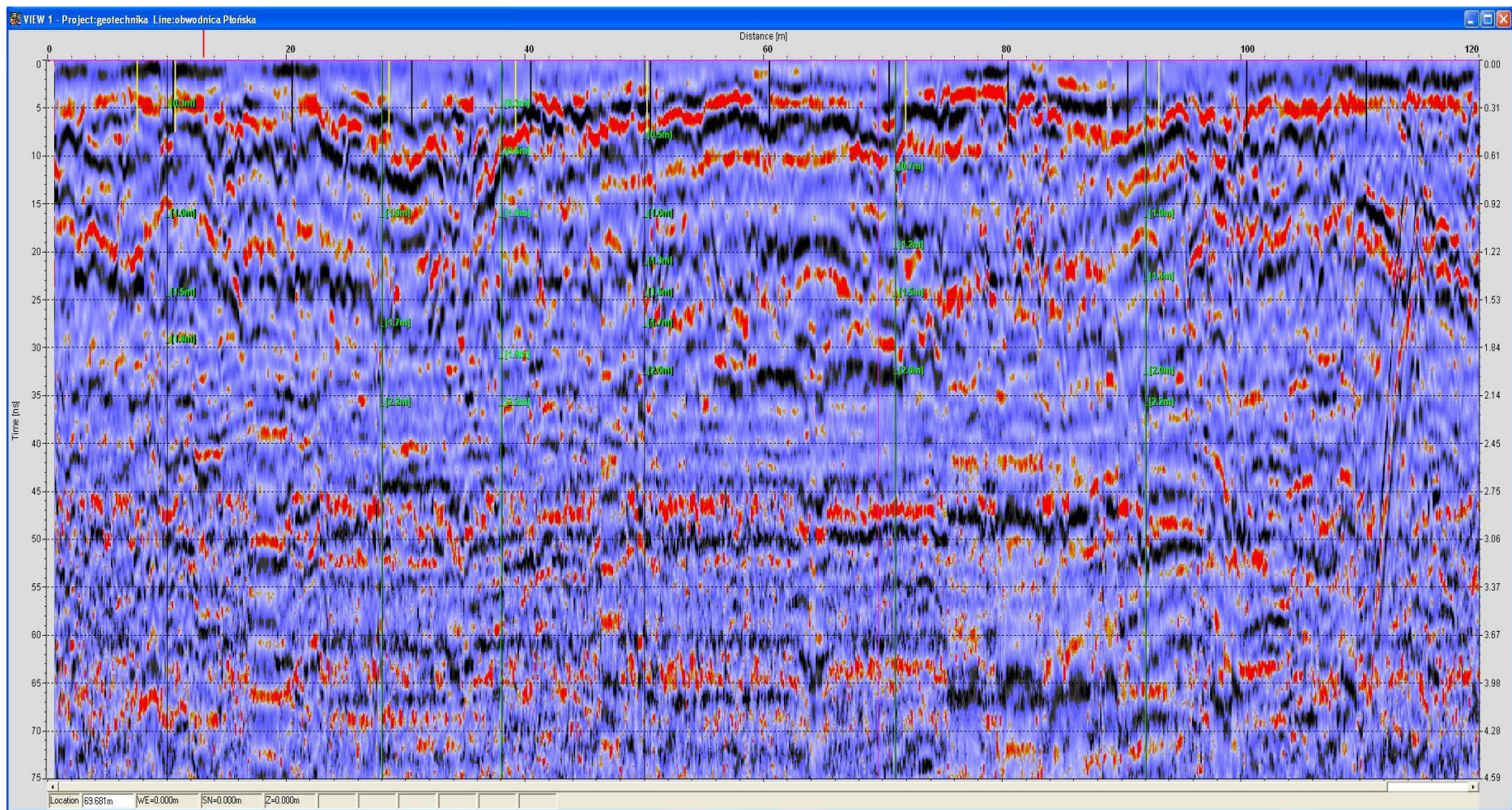
Jakość uzyskanych z pomiarów danych można określić jako niską (Rysunki 6.3-6.6.6). praktycznie w żadnym z pomiarów nie udało się potwierdzić danych uzyskanych na podstawie standardowej analizy geotechnicznej, **a widoczne na echogramach refleksy związane są raczej z stanem zawilgocenia i zagęszczeniem warstw niż ich rodzajem i strukturą.** W trakcie obróbki sygnału widoczny był wyraźnie efekt „maskowania” rzeczywistych struktur poprzez duże tłumienie spowodowane wilgotnością oraz zakłócenia rezonansowe.



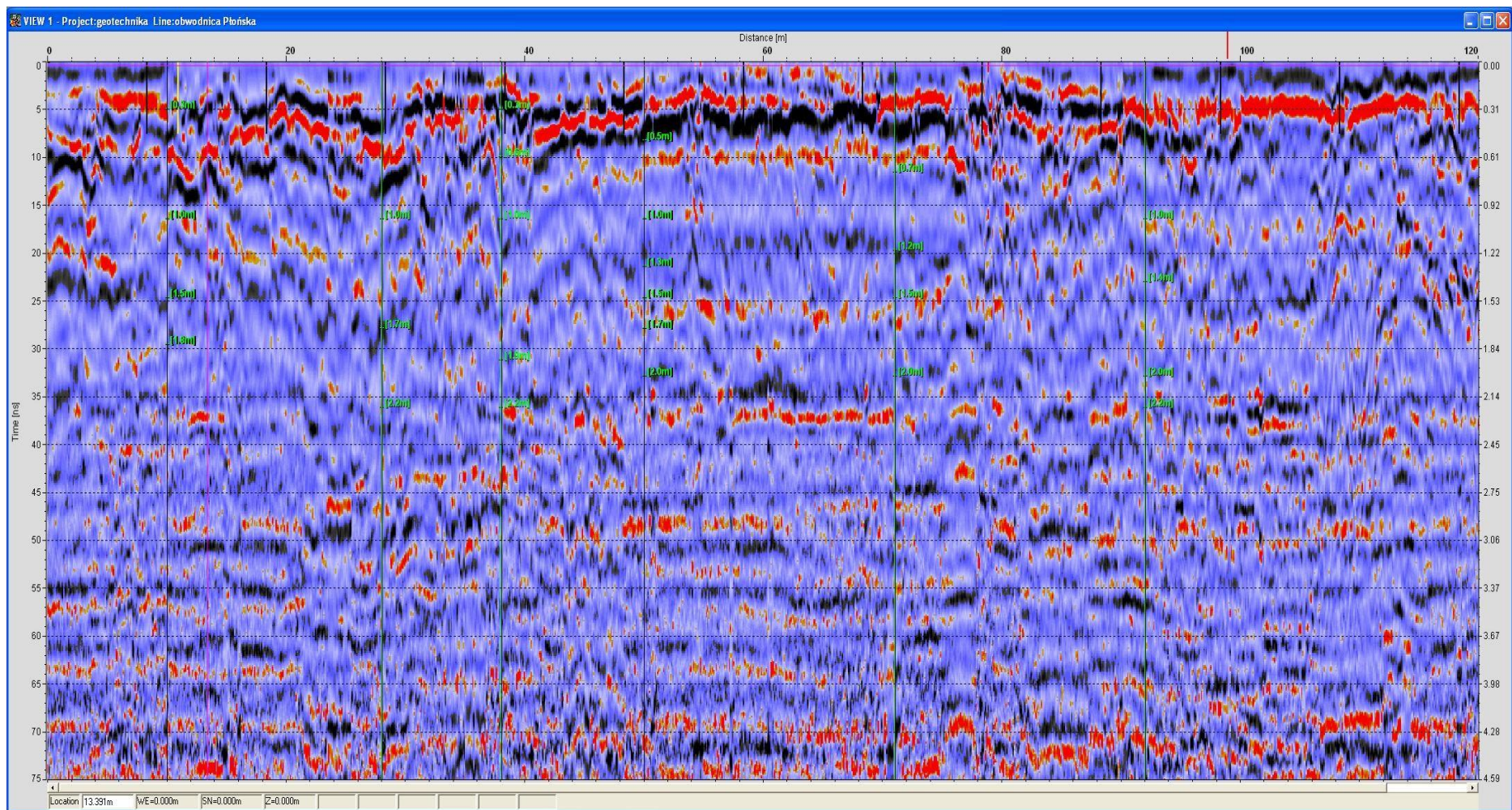
Rysunek 6.1 Lokalizacja odcinka Płońsk (zdjęcia z www.maps.google.pl)



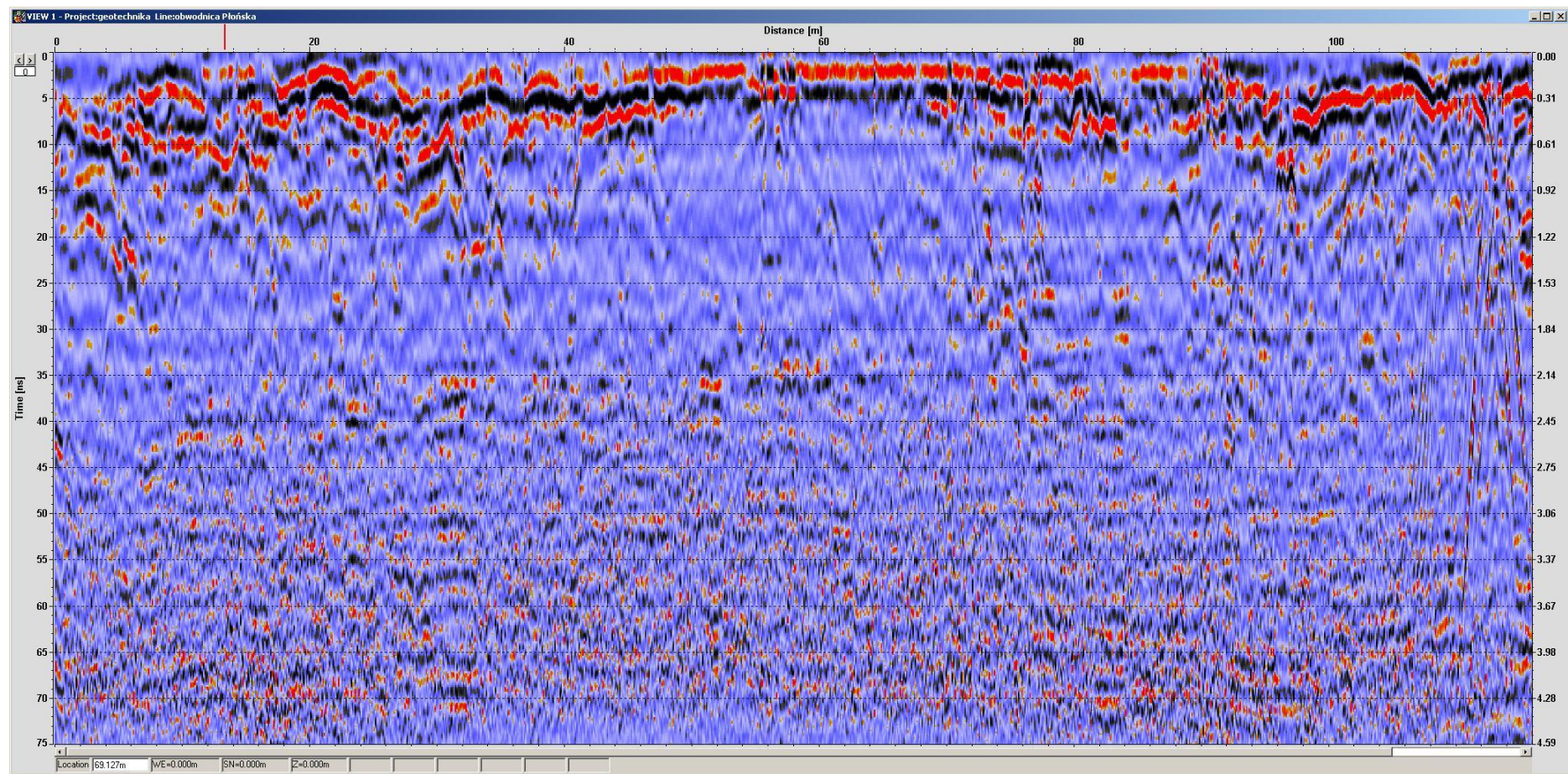
Rysunek 6.2 Profil geotechniczny odcinka Płońsk



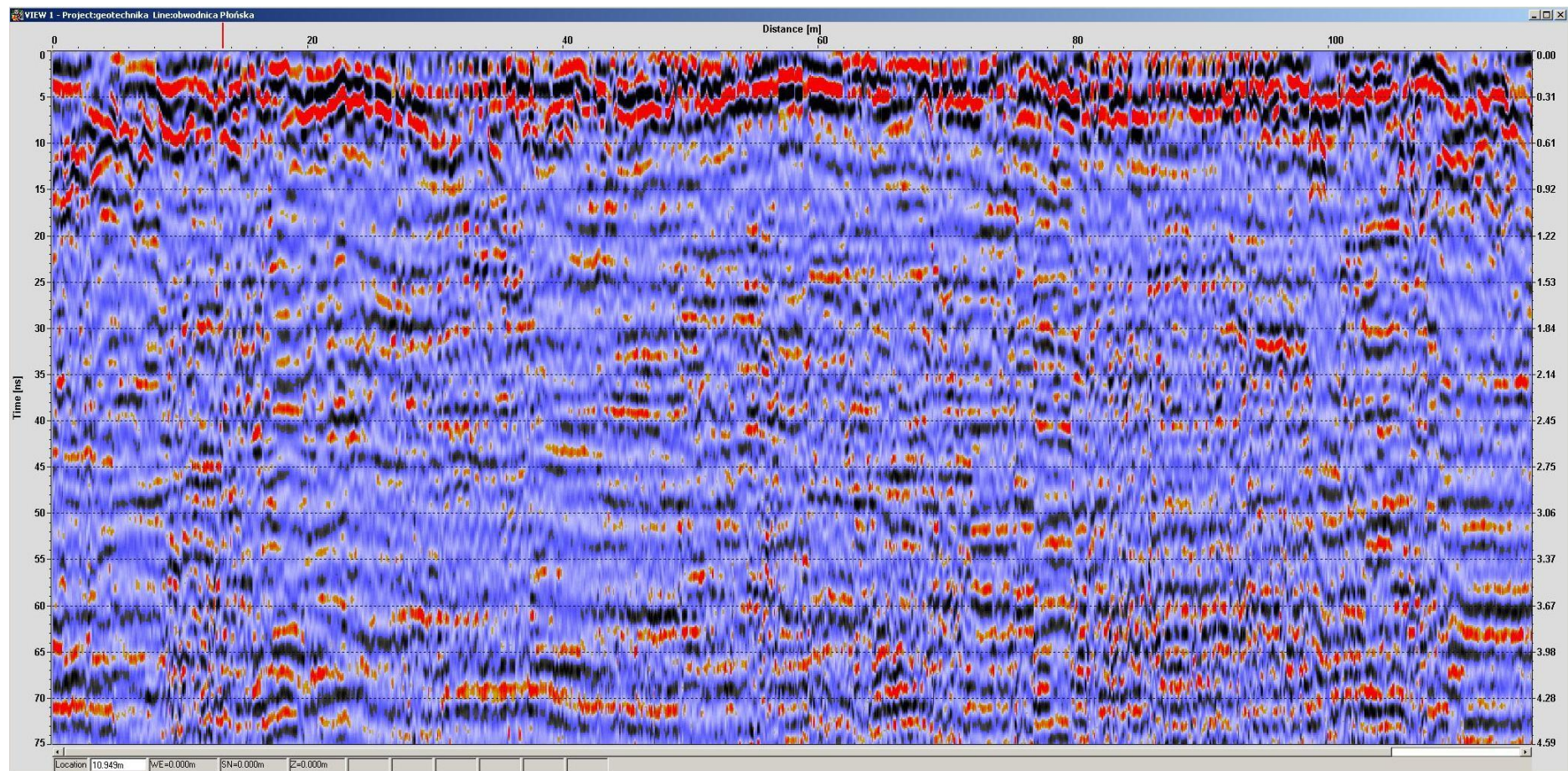
Rysunek 6.3 Pomiary radarowe na odcinku Płońsk – seria I (lato)



Rysunek 6.4 Pomiary radarowe na odcinku Płońsk – seria II (jesień)



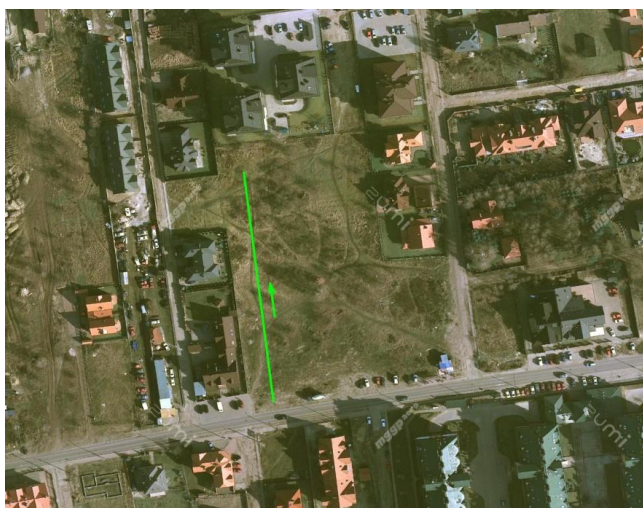
Rysunek 6.5 Pomiary radarowe na odcinku Płońsk – seria III (zima)



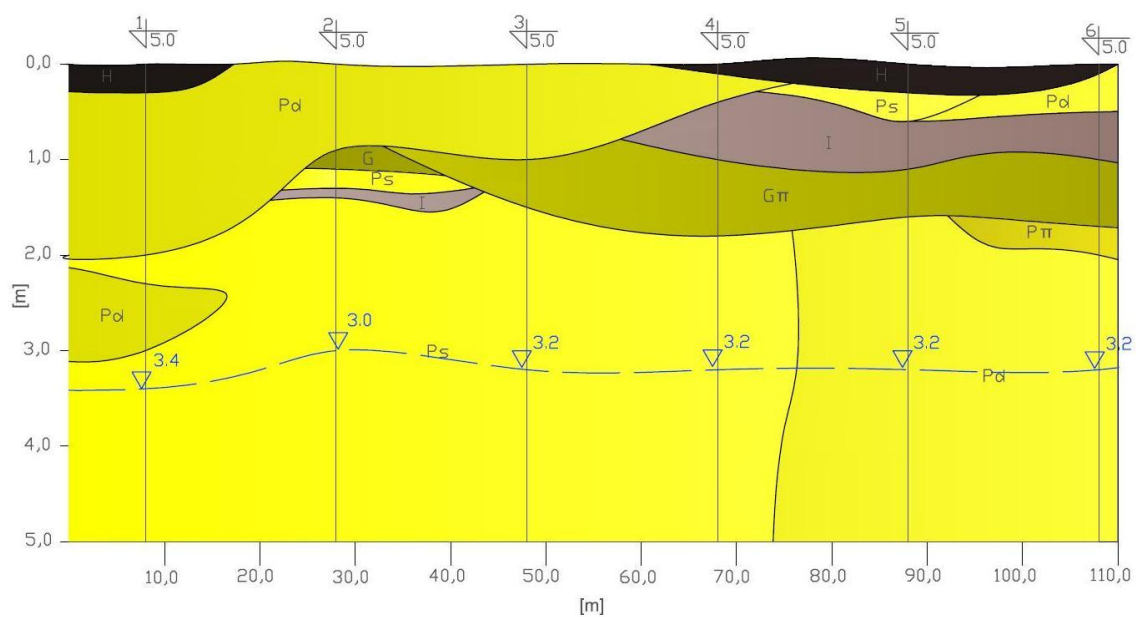
Rysunek 6.6 Pomiary radarowe na odcinku Płońsk – seria IV (wiosna)

Przekrój geotechniczny kolejnego odcinka testowego, zlokalizowanego w Ząbkach (Rysunek 6.8) to górna warstwa gruntów organicznych o grubości ok. 20 cm, w lokalizacjach od 0 do około 20 i od 55 do 110 m. Pod humusem i bezpośrednio na powierzchni odcinka zlokalizowano warstwę piasków drobnych o zmniejszającej się od 2.0 m na początku odcinka, do 0.2 m grubości na jego końcu. W początkowej strefie odcinka, do około 30 m pod piaskami drobnymi zalegają piaski średnie. W drugiej części pod warstwą humusu, piasku drobnego lub średniego, stwierdzono zaleganie dwóch warstw tworzonych przez grunty spoiste. Są to ility, zalegające na głębokości od 0.5 do 1.0 m i przylegające do nich stropem gliny pylaste, tworzące warstwę o miąższości około 0.7 m. W końcowej części odcinka, od 95 do 110 m, pod warstwą gliny pylastej stwierdzono występowanie około 15 cm warstwy piasku pylastego. Pod gruntami spoistymi, do głębokości 5.0 m zalegają piaski średnie. Poziom wody gruntowej ustalono na głębokościach od 3.0 do 3.2 m. p.p.t..

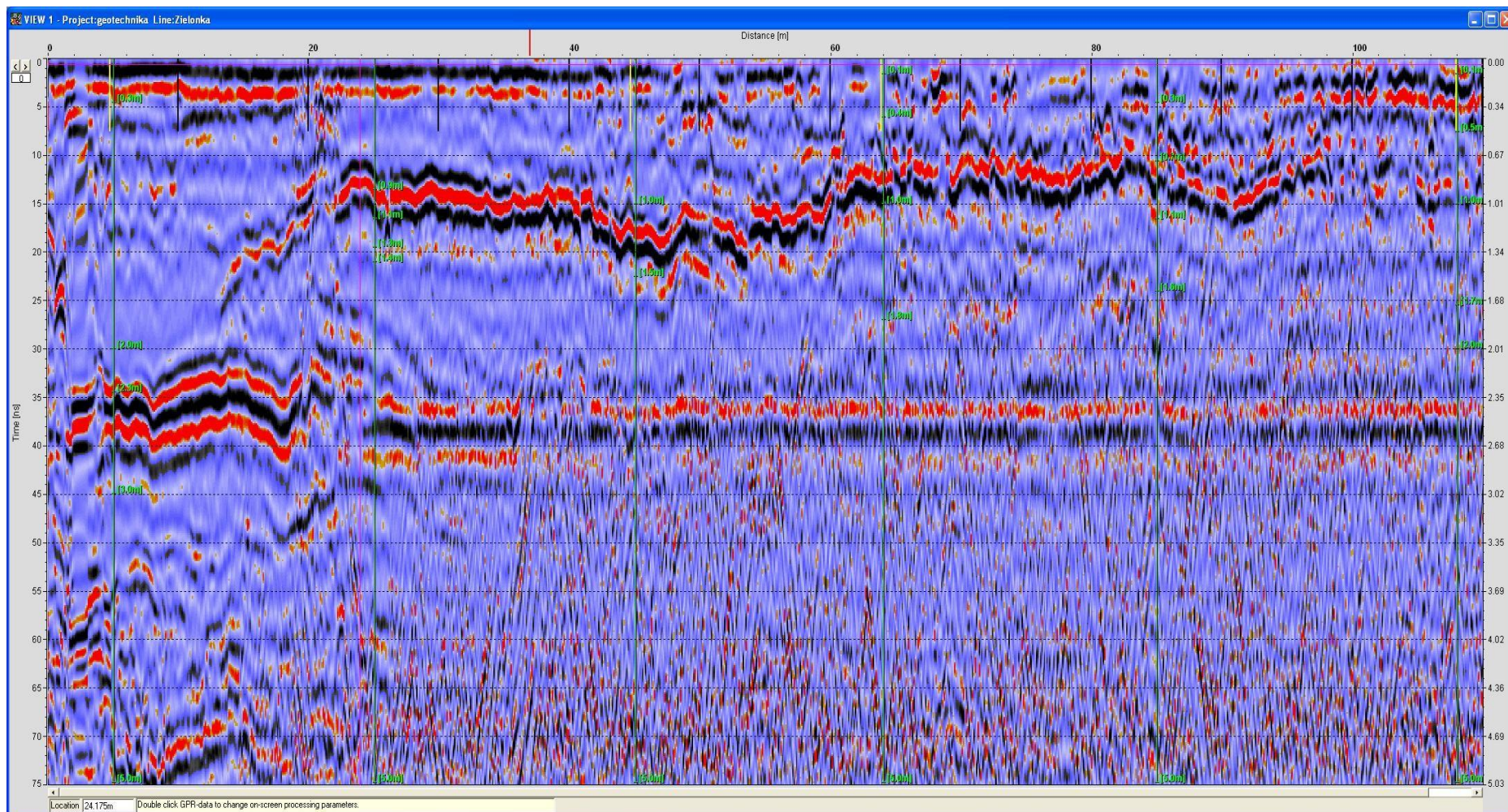
Przykład tego odcinka pokazuje, że przy pomocy techniki GPR rejestracja struktur gruntowych jest możliwa (Rysunki 6.9-6.12). W kolejnych seriach pomiarowych widoczne są różnice w uzyskanych echogramach spowodowanych przez zmieniające się warunki gruntowo-wodne. W przypadku serii zimowej można mówić o bardzo dużych zmianach w kształcie i położeniu refleksów, co spowodowane było przemarznięciem gruntu. Zarówno najsilniejsze refleksy, łatwe do wskazania jak i te mniej wyraźne dosyć dobrze korelują z wynikami interpretacji wykonanej na podstawie klasycznych badań geotechnicznych. **Co więcej wydaje się że część z refleksów dobrze koresponduje z granicami stref tego samego materiału lecz o różnym zagęszczeniu.**



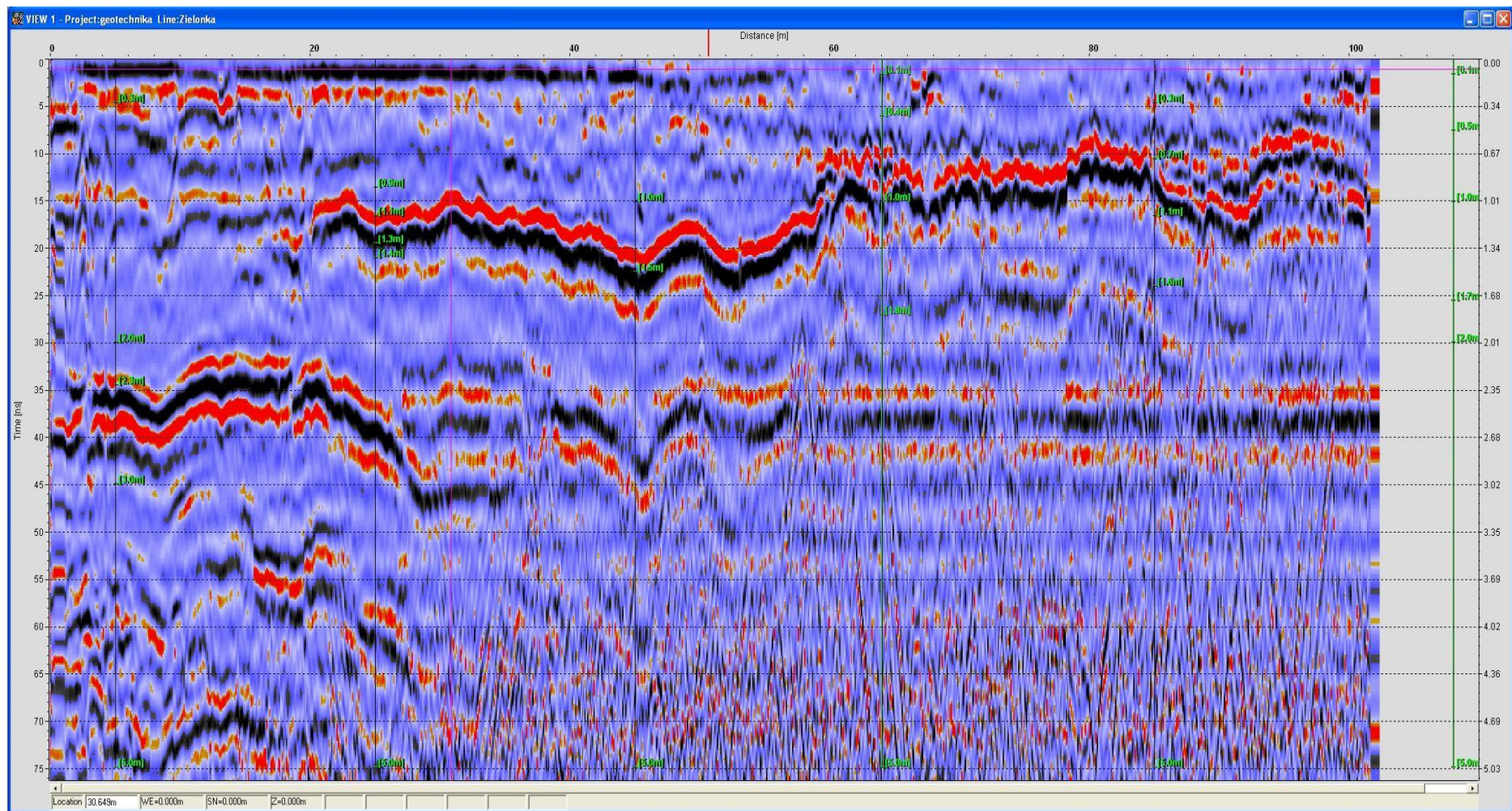
Rysunek 6.7 Lokalizacja odcinka Ząbki (zdjęcie z www.zumi.pl)



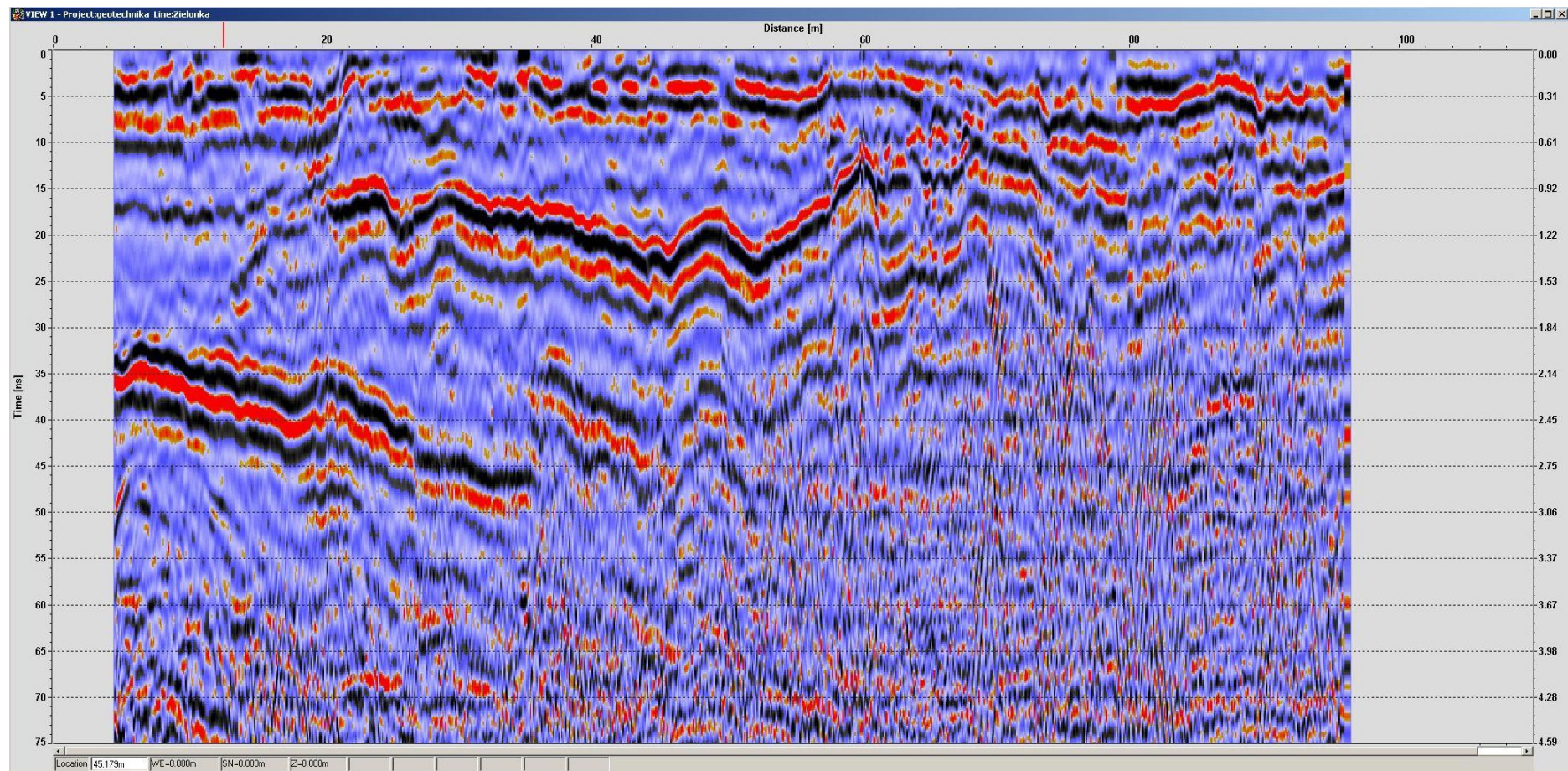
Rysunek 6.8 Profil geotechniczny odcinka w Ząbkach



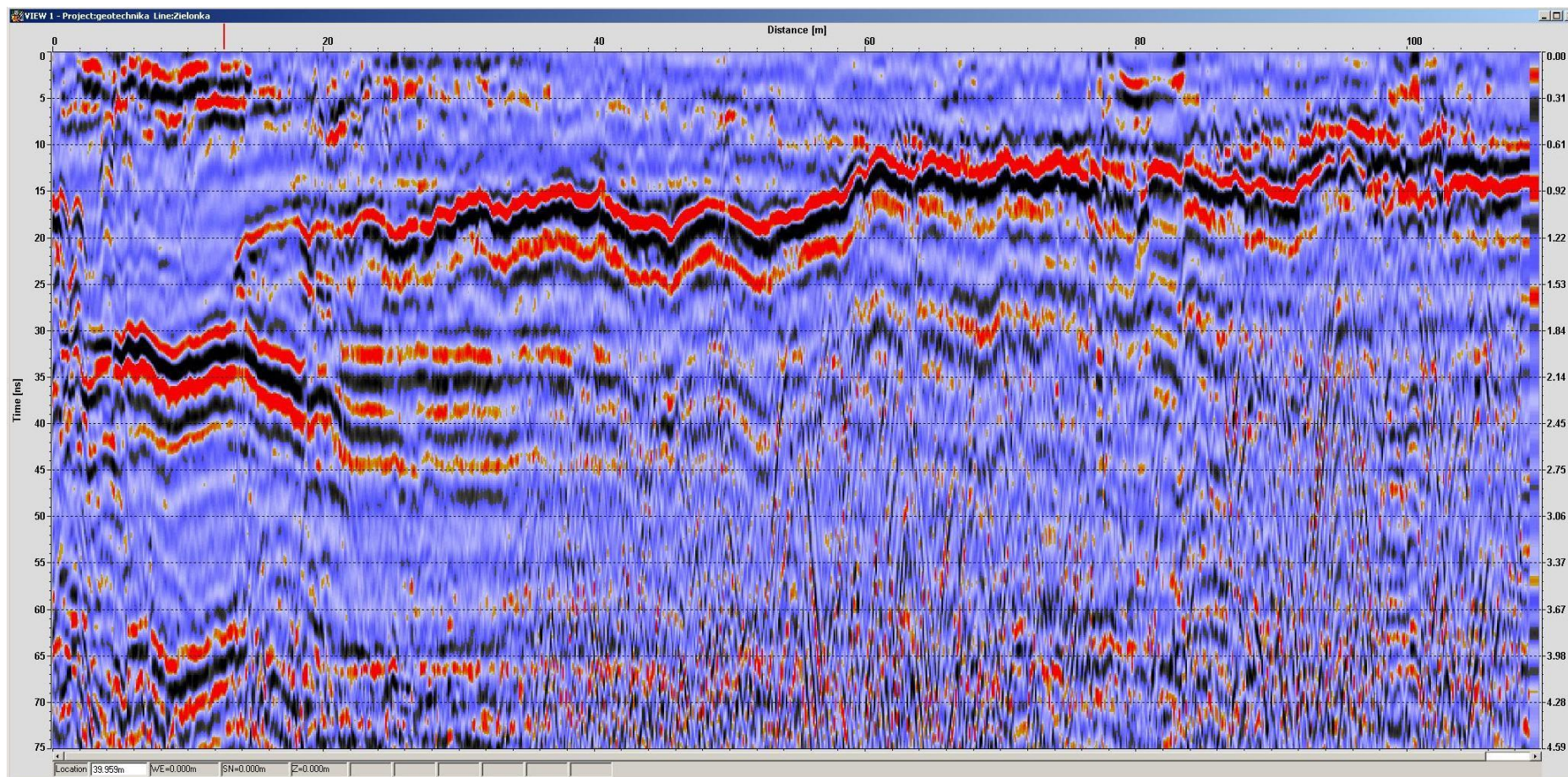
Rysunek 6.9 Pomiary radarowe na odcinku Ząbki -seria I (lato)



Rysunek 6.10 Pomiary radarowe na odcinku Ząbki -seria II (jesień)



Rysunek 6.11 Pomiary radarowe na odcinku Ząbki -seria III (zima)



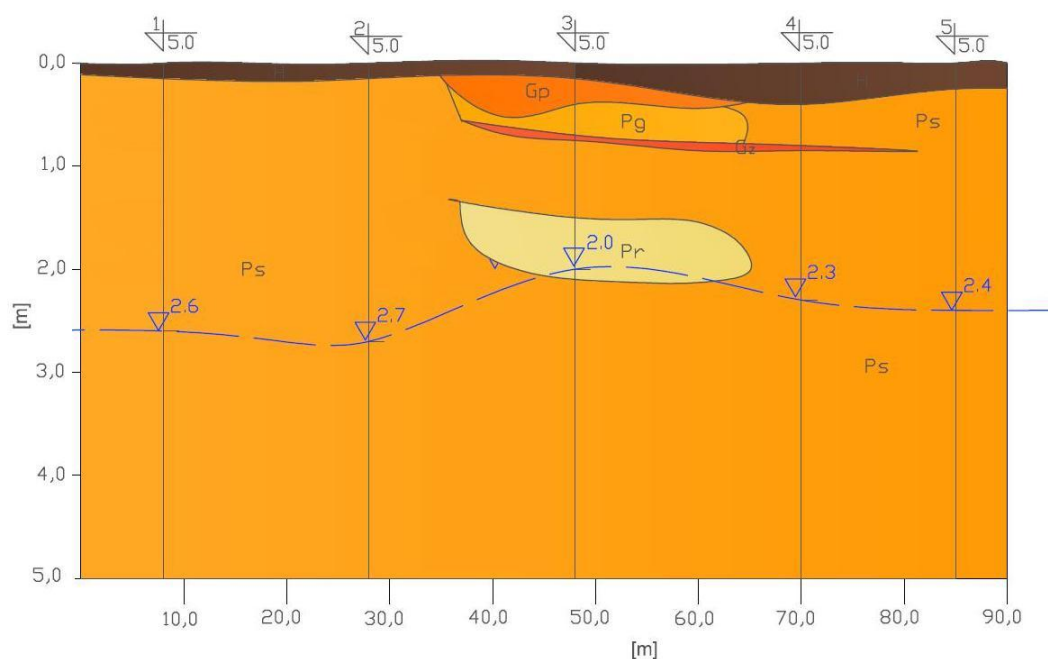
Rysunek 6.12 Pomiary radarowe na odcinku Ząbki -seria IV (wiosna)

Innym przykładem jest odcinek Soczewka (Rysunek 6.13). Na odcinku tym stwierdzono proste warunki gruntowe. Generalnie na całym odcinku pod około 0.2 m warstwą humusu zalegają piaski średnie zaliczane do grupy nośności podłoża G1. Wyjątkiem jest fragment odcinka zawierający się pomiędzy 35 a 60 m, gdzie pod humusem zlokalizowano wkładki gruntów spoistych (głina piaszczysta i piasek gliniasty) lub niżej, czystego piasku grubego. Zwierciadło wody gruntowej kształtuje się na głębokości od 2.0 do 2.7 m p.p.t. (Rysunek 6.14)

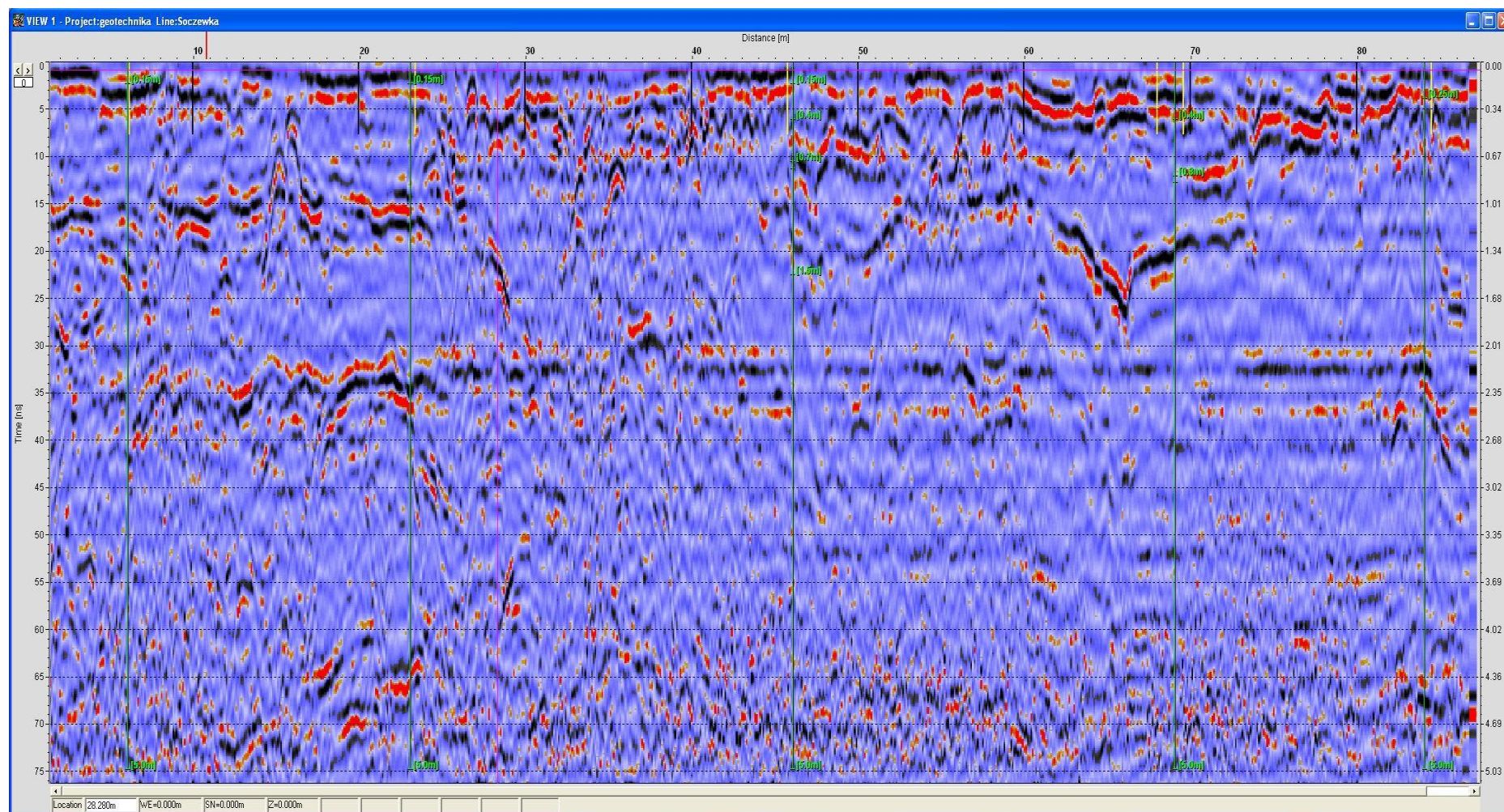
Uzyskane na tym odcinku wyniki z pomiaru georadarem (Rysunki 6.9-6.12) pokazują jak czuła jest ta technika na wszelkie zmiany wilgotności gruntu i zagęszczenia kolejnych warstw. W kolejnych seriach pomiarowych widoczne są większe niż w poprzednim przykładzie różnice w uzyskanych echogramach spowodowanych przez zmieniające się warunki gruntowo-wodne. Zmiany te dotyczą zarówno kształtu jak i siły zarejestrowanych refleksów.



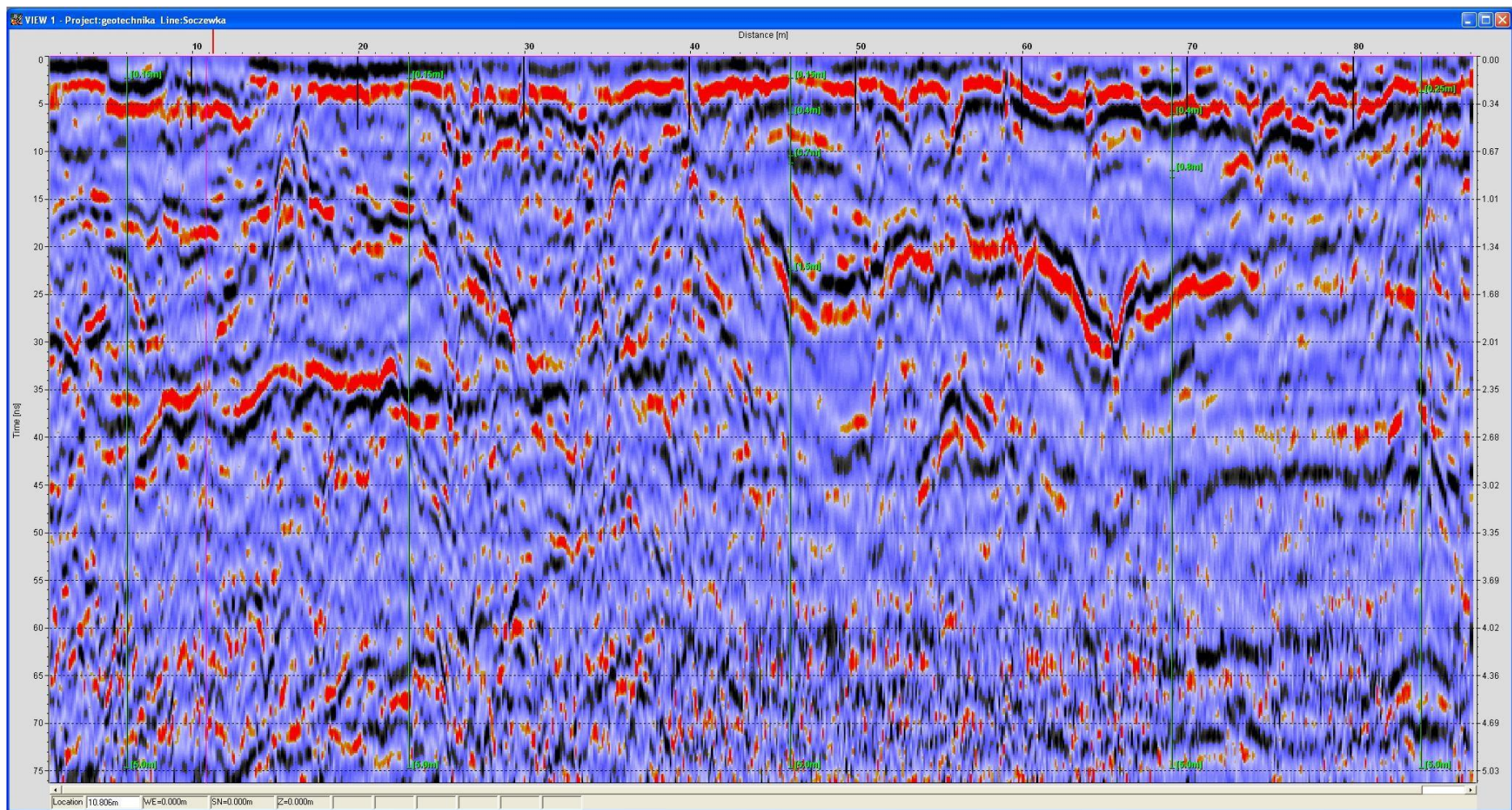
Rysunek 6.13 Lokalizacja odcinka Soczewka (zdjęcie z www.zumi.pl)



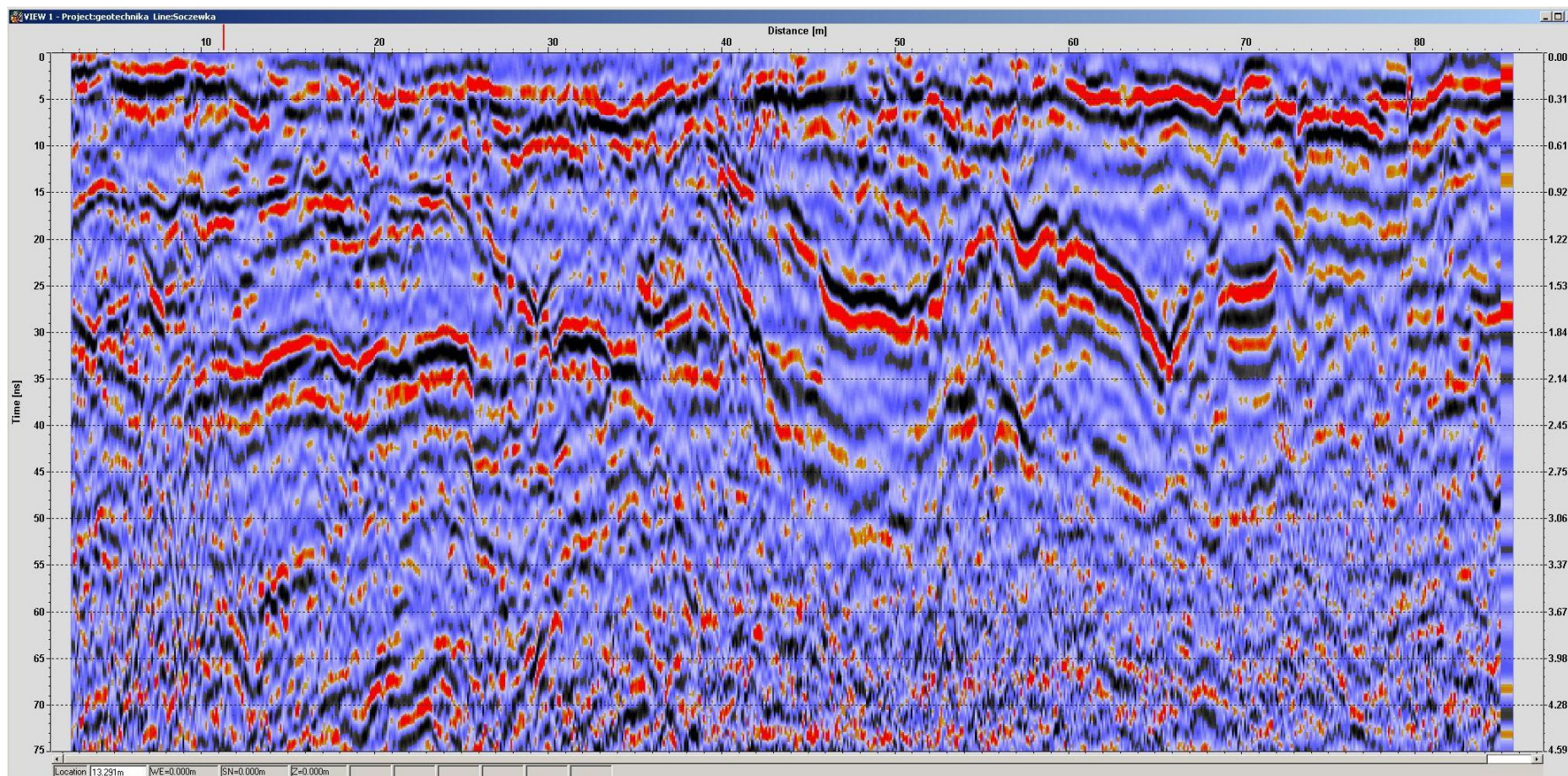
Rysunek 6.14 Profil geotechniczny odcinka Soczewka



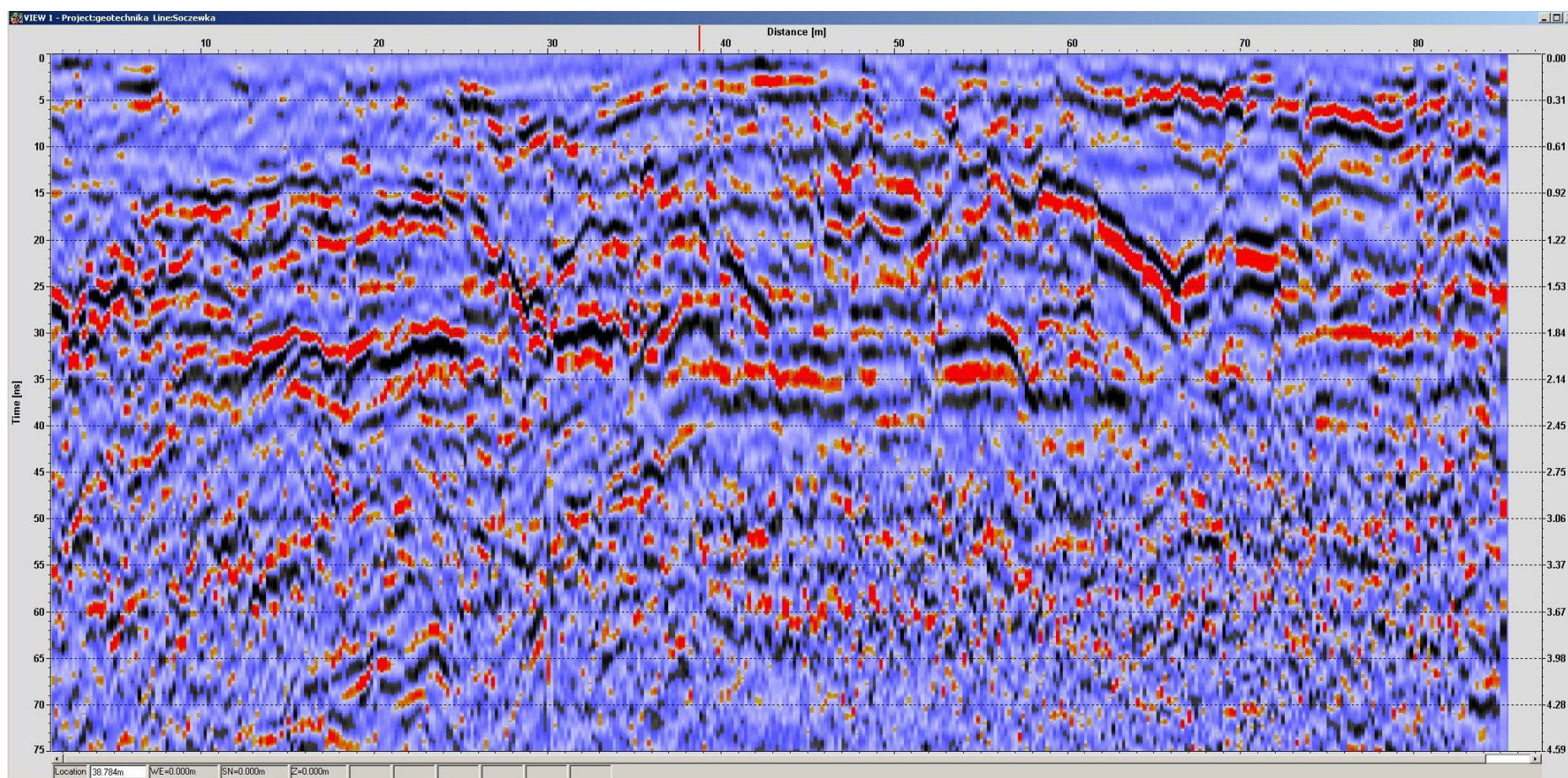
Rysunek 6.15 Pomiary radarowe na odcinku Soczewka – seria I (lato)



Rysunek 6.16 Pomiary radarowe na odcinku Soczewka – seria II (jesień)



Rysunek 6.17 Pomiary radarowe na odcinku Soczewka – seria III (zima)



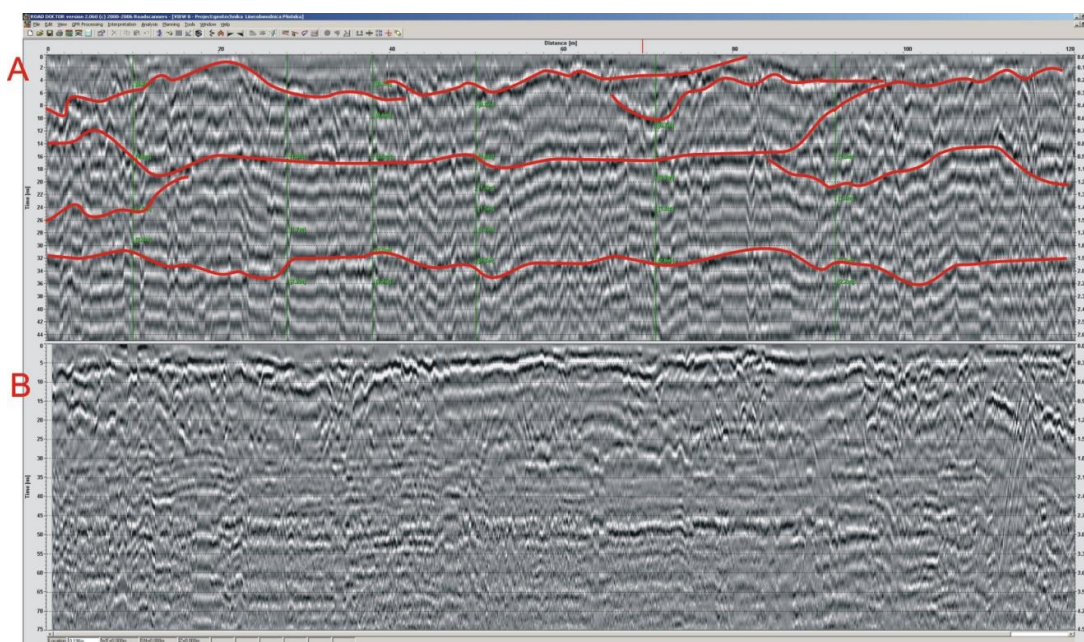
Rysunek 6.18 Pomiary radarowe na odcinku Soczewka – seria IV (wiosna)

7 Analiza porównawcza wyników badań podłoża gruntowego metodami klasycznymi i przy pomocy georadaru.

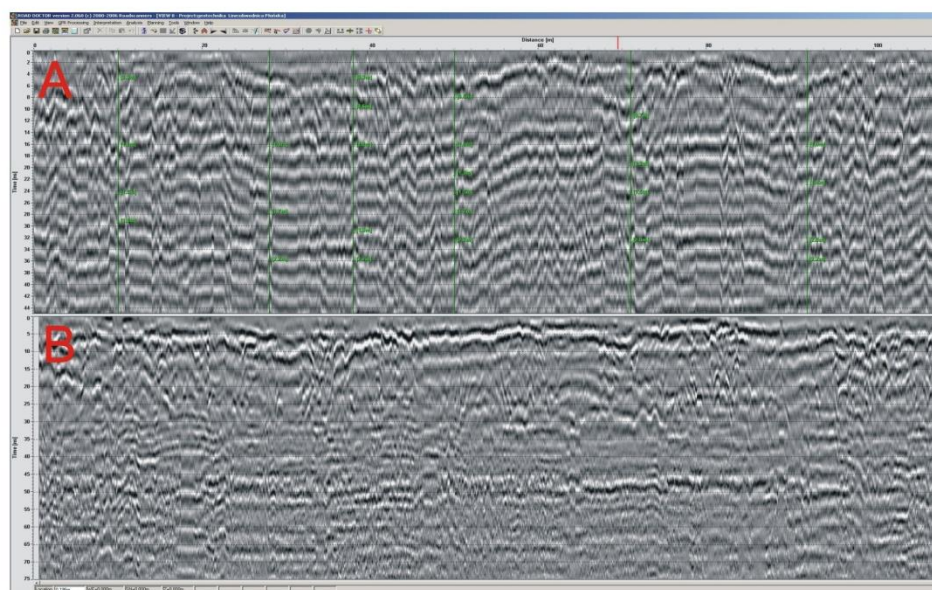
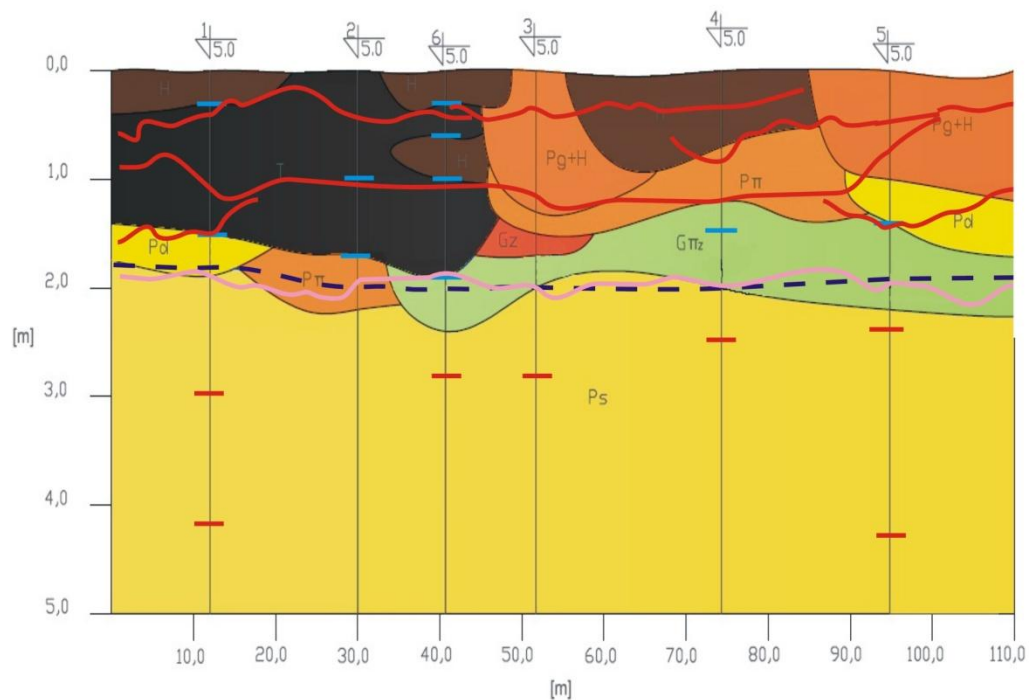
Poniżej przedstawiono przykłady interpretacji danych georadarowych uzyskanych w trakcie pomiarów na odcinkach testowych. Wybrano przykłady interpretacji, które najlepiej obrazują zalety jak i wady tej techniki pomiarowej.

Pierwszy z przykładów dotyczy odcinka Płońsk. Jak wcześniej wspomniano odcinek charakteryzuje się skomplikowanym układem gruntowo-wodnym, co ma bezpośrednie przełożenie na jakość uzyskanych wyników. Przeprowadzona interpretacja zarejestrowanych sygnałów radarowych (Rysunek 7.1) wykazuje rozbieżności z interpretacją geotechniczną (Rysunek 7.2). Interpretowane na echogramie granice strukturalne nie pokrywają się interpretacją układu warstw dokonaną na podstawie pomiarów geotechnicznych, a jedyną dobrze rozpoznaną granicą jest poziom zwierciadła wody gruntowej (na Rysunku 7.2 oznaczono linią przerywaną), który w obu przypadkach został zinterpretowany na tej samej głębokości. Pozostałe granice wyznaczone na podstawie pomiarów radarowych powiązane są raczej z zmianami wilgotności i zagęszczenia warstw. Jednak takie założenie nie może być zweryfikowane ze względu na bardzo dużą zmienność rodzaju i grubości warstw (praktycznie w każdym z otworów geotechnicznych mamy do czynienia z innym układem warstw gruntu).

W przypadku tego odcinka decydujące znaczenie o jakości danych ma bez wątpienia wysoka wilgotność, stale utrzymująca się w górnych warstwach podłoża gruntowego. Jest to znaczne utrudnienie w uzyskaniu dobrego jakościowo obrazu zalegających pod powierzchnią struktur, co w połączeniu z tak dużą zmiennością warstw sprawia, że poprawna interpretacja zarejestrowanych sygnałów jest niemożliwa.



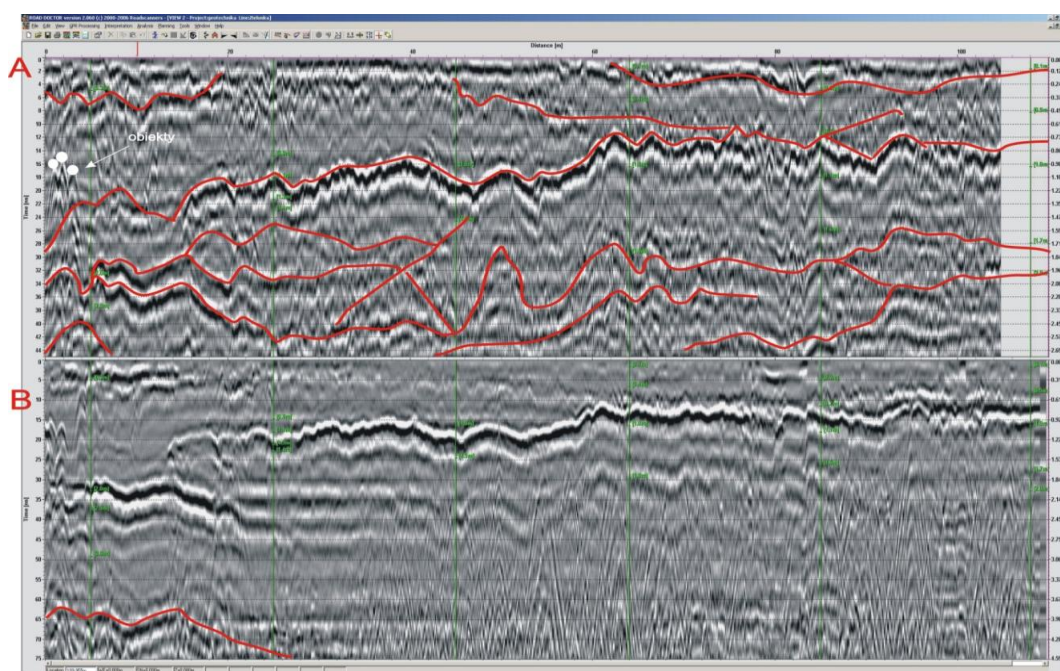
Rysunek 7.1 Pomiary radarowe na odcinku Płońsk– echogram wraz z interpretacją (A – echogram z anteny 400MHz, B – echogram z anteny 270MHz)



Rysunek 7.2 Pomiary radarowe na odcinku Płońsk– echogram wraz z profilem geotechnicznym i naniesioną na niego interpretacją danych GPR (na profilu geotechnicznym w miejscach odwiertów, poziomymi czerwonymi liniami oznaczono granice między warstwami o różnym zagęszczeniu, natomiast liniami niebieskimi granice między warstwami o różnym zawilgoceniu; A – echogram z anteny 400MHz, B – echogram z anteny 270MHz)

Przykład kolejnego odcinka pokazuje, że przy pomocy techniki GPR rejestracja struktur gruntowych może być dokonana w poprawny sposób (Rysunki 7.3-7.4). Wyznaczone na podstawie echogramu granice w znacznej części dobrze korespondują z granicami warstw wyznaczonymi na podstawie pomiarów geotechnicznych. Dotyczy to głównie granic między materiałami o istotnie różnej charakterystyce tj. takich jak między warstwami humusu i piasku lub warstwami piasku i gruntów spoistych.

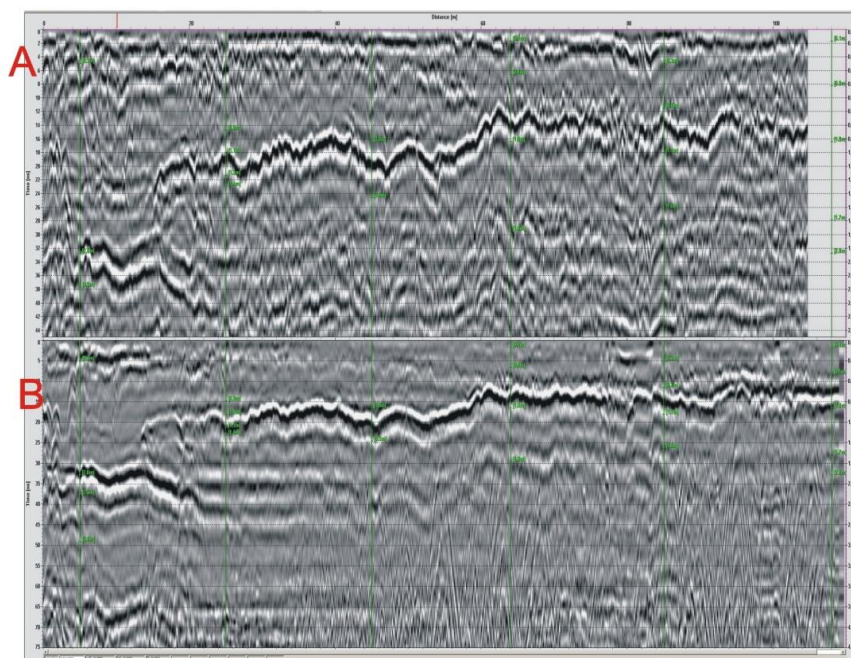
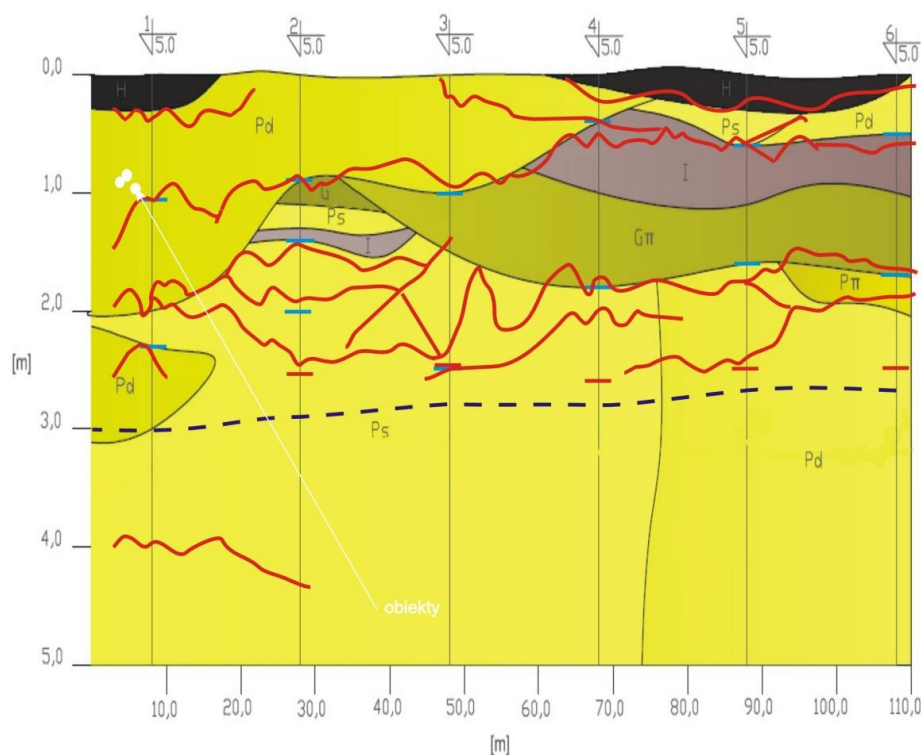
Wyznaczone na echogramie granice często korespondują ze zmianą zagęszczenia (poziome linie czerwone w miejscach odwiertów) lub wilgotności gruntu (poziome linie niebieskie w miejscach odwiertów). Efekt ten widoczny jest w warstwach piasku na głębokości ok. 1,0m na pikietażu 0+000-0+025 oraz niemal na całym odcinku na głębokości 2,0-2,8m.



Rysunek 7.3 Pomiary radarowe na odcinku Ząbki– echogram wraz z interpretacją (A – echogram z anteny 400MHz, B – echogram z anteny 270MHz)

Przy okazji omawiania niniejszego przykładu należy również wspomnieć o trudnościach interpretacyjnych. Jednym z nich był brak możliwości oceny głębokości położenia zwierciadła wody gruntowej. Głębokość zalegania zwierciadła określono w pomiarach geotechnicznych na głębokości ok. 3,0m, tymczasem na echogramie z anteny 400MHz jak i anteny 270MHz nie ma widocznych zmian w kształcie i natężeniu rejestrowanych sygnałów. W przypadku pierwszej z anten jest to normalne ponieważ głębokość penetracji przy częstotliwości 400MHz wynosi ok. 2,5m. W przypadku drugiej z anten refleks zwierciadła wody gruntowej powinien być widoczny. Brak zarejestrowanego refleksu może być spowodowany przez strefę zawilgocenia o dużej miąższości (na odcinku testowym strefa ta sięga ok. 1,0 m nad poziom zwierciadła). Jak wykazały badania laboratoryjne w przypadku piasków, zawilgocona w wyniku podciągania kapilarnego strefa nad zwierciadłem wody gruntowej skutecznie „rozmywa” refleks odbity od zalegającego zwierciadła.

Drugi problem interpretacyjny jest możliwość identyfikacji granic międzywarstwowych przebiegających ukośnie lub pionowo do kierunku pomiaru. Zarówno na tym odcinku testowym jak i na innych granice tego rodzaju były wychwytywane częściowo lub nie były wychwytywane wcale .

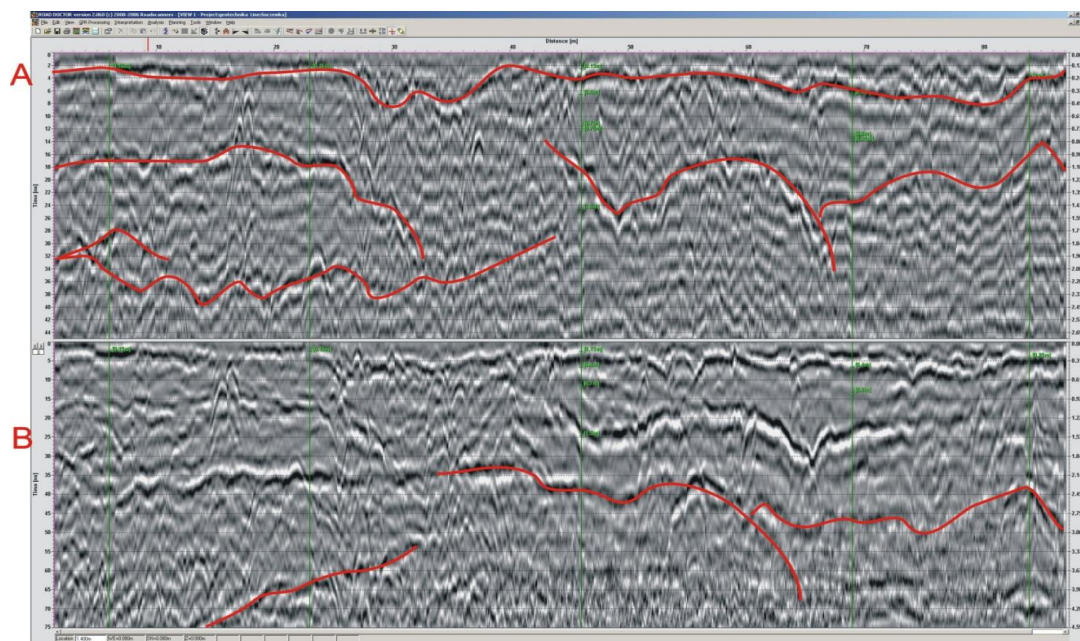


Rysunek 7.4 Pomiary radarowe na odcinku Ząbki– echogram wraz z profilem geotechnicznym i naniesioną na niego interpretacją danych GPR (na profilu geotechnicznym w miejscach odwiertów, poziomymi czerwonymi liniami oznaczono granice między warstwami o różnym zagęszczeniu, natomiast liniami niebieskimi granice między warstwami o różnym zawilgoceniu; A – echogram z anteny 400MHz, B – echogram z anteny 270MHz)

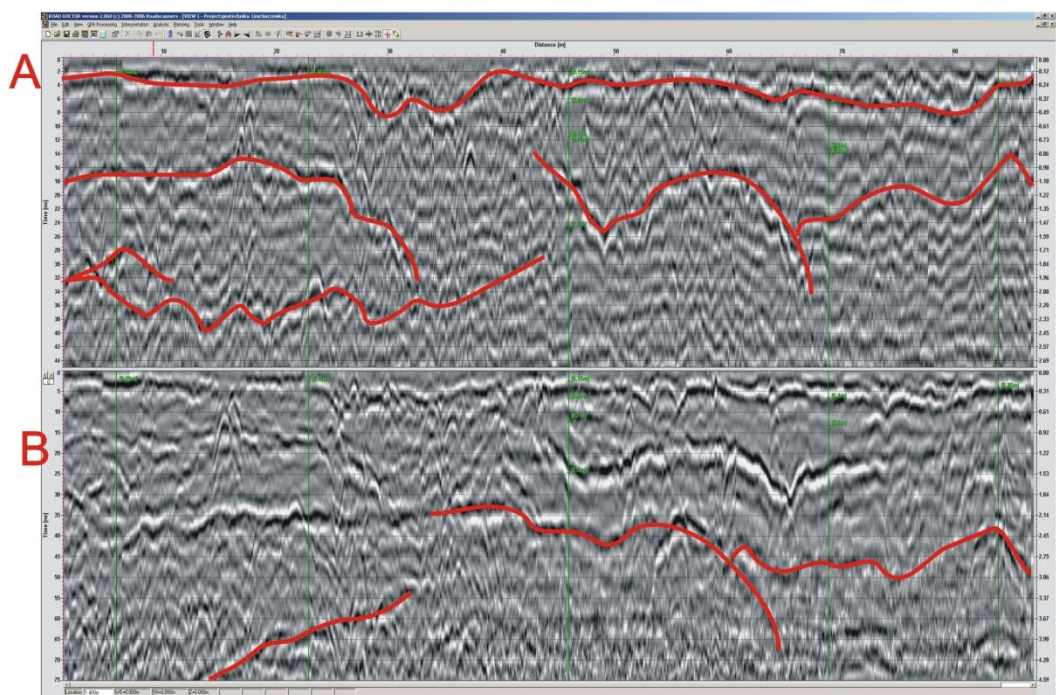
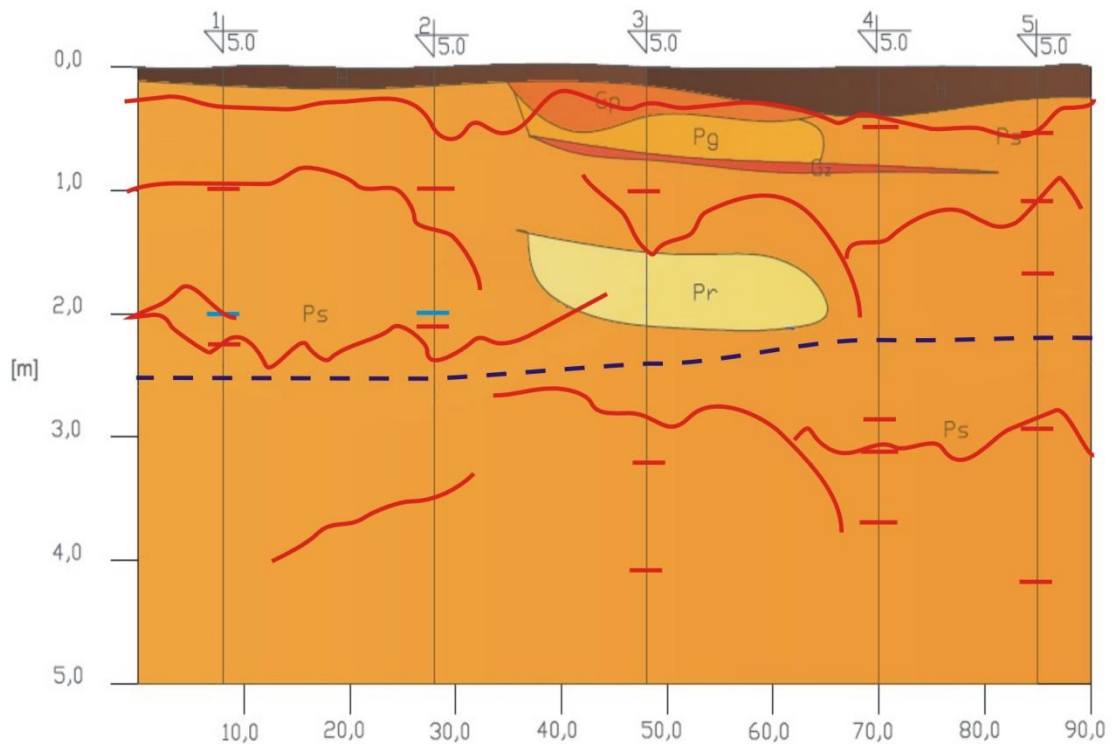
Ostatni z przykładów dotyczy odcinka Soczewka. Jest to odcinek o uporządkowanej, jednorodnej strukturze, na którym występują jedynie piaski, a w przypowierzchniowej strefie warstw humusu o miąższości ok. 0,3m.

Przeprowadzona interpretacja zarejestrowanych sygnałów radarowych (Rysunek 7.5) nie wykazuje dużych rozbieżności z interpretacją geotechniczną (Rysunek 7.6), natomiast uwidacznia możliwości techniki radarowej w zakresie obserwacji zmian zagęszczenia warstw podłoża gruntowego. W większości przypadków zinterpretowane na podstawie danych GPR granice odpowiadają strefom zmian zagęszczenia. Idealnym tego przykładem jest otwór 1, gdzie interpretacja radarowa idealnie pokrywa się z zarejestrowanymi podczas sondowania zmianami zagęszczenia oraz zmianą zawilgocenia warstwy.

Prezentowane dane wskazują na jeszcze jeden aspekt, który w znacznej mierze utrudnia wnioskowanie co do zalegających pod powierzchnią struktur. **Zarejestrowane podczas pomiaru georadarem refleksy nie zawsze będą odpowiadać faktycznym zmianom rodzaju gruntu.** Fakt ten znacznie utrudnia interpretację uzyskiwanych danych i sprawia, że konieczne jest nabycie odpowiedniego doświadczenia oraz wiedzy na temat badanego odcinka.



Rysunek 7.5 Pomiary radarowe na odcinku Soczewka – echogram wraz z interpretacją (A – echogram z anteny 400MHz, B – echogram z anteny 270MHz)



Rysunek 7.6 Pomiary radarowe na odcinku Soczewka – echogram wraz z profilem geotechnicznym i naniesioną na niego interpretacją danych GPR (na profilu geotechnicznym w miejscach odwiertów, poziomymi czerwonymi liniami oznaczono granice między warstwami o różnym zagęszczeniu, natomiast liniami niebieskimi granice między warstwami o różnym zawilgoceniu; A – echogram z anteny 400MHz, B – echogram z anteny 270MHz)

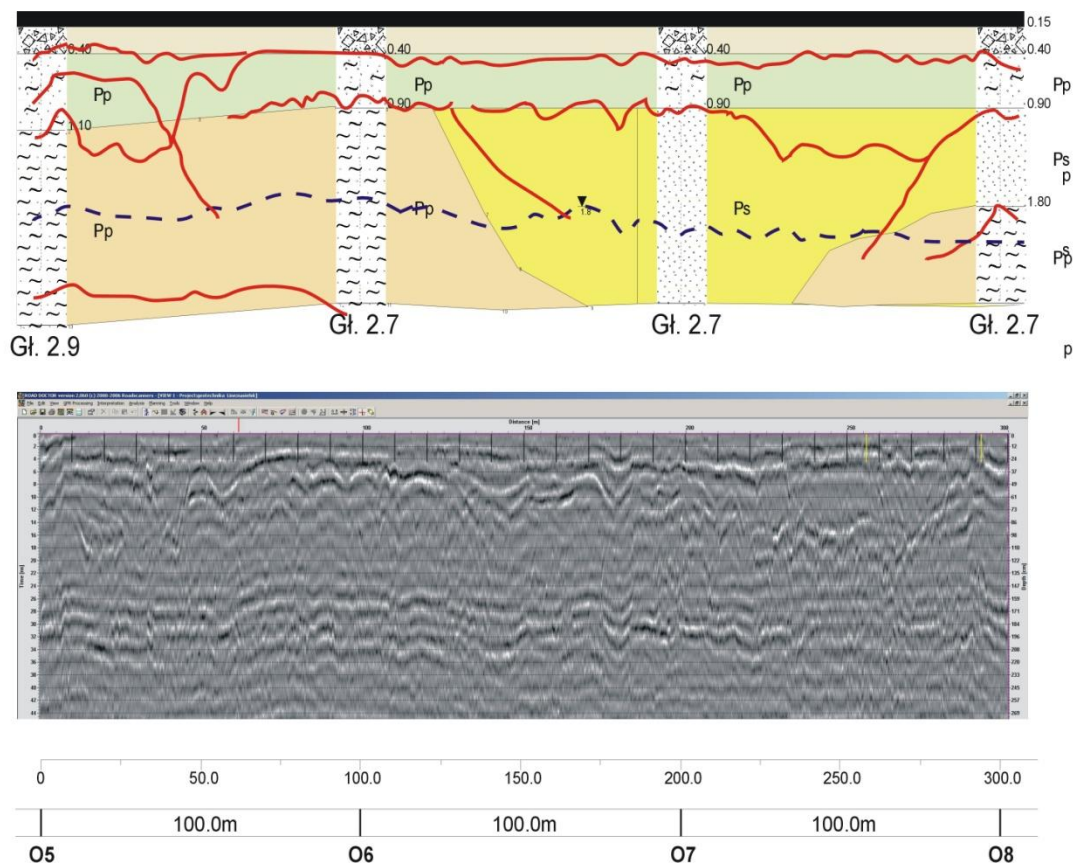
W ramach niniejszej pracy, jako weryfikację ustawień systemu pomiarowego oraz zdobytych doświadczeń, wykonano pomiary na remontowanym odcinku drogi koło m. Nasielsk. Jest to odcinek istniejącej drogi dojazdowej do przejazdu kolejowego. Badania zostały wykonane po sfrezowaniu istniejących warstw asfaltowych (Rysunek 7.7).



Rysunek 7.7 Odcinek remontowanego dojazdu do przejazdu kolejowego w koło Nasielska

Uzyskane w trakcie pomiarów dane oraz ich interpretacja wskazują na dobrą korelację z danymi uzyskanymi metodami klasycznymi oraz informacjami zdobytymi podczas rozbiórki podłoża bezpośrednio zalegającego pod istniejącą nawierzchnią. Na Rysunku 7.8 przedstawiono wyniki interpretacji w zestawianiu z przygotowanym przez geotechnika profilem.

Na podstawie tych danych można stwierdzić, że przebieg rejestrowanych przez georadar granic jest nieco inny niż ten proponowany na podstawie odwiertów. Są to niewielkie zmiany miąższości warstwy piasku pylastego (średnio na całym odcinku na głębokości 0,4-0,9m) oraz niecki z piasku w okolicach otworu O7. Poza tym udało się bardzo dokładnie określić poziom zwierciadła wody gruntowej, który był zgodny z danymi uzyskanymi ze wszystkich otworów badawczych. W strefie otworu O5 wyznaczono dodatkowe dwie granice tj pierwszą na głębokości 0,5m i opadającą do głębokości 2,0m oraz drugą na głębokości 2,5m. Prawdopodobnie są to granice określające zmianę zagęszczenia warstwy (na tym odcinku sondowanie nie było wykonane). W tym miejscu należy dodać, że dokumentacja geologiczna jest interpretacją geotechnika pomiędzy otworami mniej lub bardziej odpowiadającą rzeczywistości. Powoduje to przyjęcie pewnego uproszczenia, zwykle wystarczającego z punktu widzenia inżynierskiego, ale nie zawsze.



Rysunek 7.8 Pomiary radarowe anteną 400MHz na odcinku Nasielsk – echogram wraz z profilem geotechnicznym i naniesioną na niego interpretacją danych GPR (linie czerwone – granice warstw, przerywana linia granatowa – poziom zwierciadła wody gruntowej)

8 Opracowanie metodyki oceny geotechnicznej podłoża gruntowego z zastosowaniem techniki radarowej

Przeprowadzone badania wykazały, że **nie jest możliwe określenie uniwersalnych nastawień systemu pomiarowego** (tak jak chociażby w przypadku anten typu horn). Ustawienia te powinny być **każdorazowo indywidualnie** dobierane w zależności od potrzeb i rodzaju badanego odcinka. Należy przy tym postępować zgodnie z instrukcjami producenta systemu pomiarowego, a także pamiętać o kilku istotnych czynnikach:

- początek okna pomiarowego należy dobrać tak aby sygnał bezpośredni był widoczny w całości w oknie czasowym – w celu sprawdzenia można wykonać test podnoszenia (opisano w punkcie 3.4), lub skorzystać z trybu automatycznego, a następnie ręcznie skorygować początek okna,
- wzmocnienie sygnału nie powinno być większe niż 2/3 szerokości okna dla sygnału bezpośredniego,
- podczas obróbki sygnału należy unikać stosowania dużej liczby filtrów – do poprawnego „oczyszczenia” echogramu wystarczyć powinien filtr „background removal” oraz filtr częstotliwościowy,

- podczas interpretacji danych radarowych należy pamiętać, że część zarejestrowanych refleksów może odpowiadać zmianom zagęszczenia lub wilgotności, a nie zmianom rodzaju warstwy,
- interpretacja podłoża gruntowego na podstawie pomiaru wykonanego po opadach deszczu będzie trudna i może uniemożliwić wyznaczenie rzeczywistych granic między warstwami.

Zalecane nastawy systemu pomiarowego:

- częstotliwość próbkowania: 100 kHz z rejestracją danych z jednego kanału pomiarowego,
- optymalna częstotliwość pomiaru: 10-20 cm,
- ilość sampli w skanie: 512,
- ilość bitów w samplu: 16,
- początek próbkowania sygnału: zdefiniowany manualnie w trakcie uruchamiania anteny,
- szerokość okna próbkowania sygnału: 50ns dla anteny 400 MHz i 80 do 175ns dla anteny 270 MHz,
- wzmocnienie sygnału: dobrane przez operatora.

Procedura pomiaru

Osiągnięcie zadowalających efektów pomiaru zależy od wielu czynników. Jednym z najważniejszych z nich jest **doświadczenie** osoby odpowiedzialnej za planowanie i wykonanie pomiaru oraz interpretację danych. Zrozumienie teoretycznych podstaw działania, procedur i interpretacji GPR jak również wiedza z zakresu geotechniki i geologii jest podstawą osiągnięcia zadowalających wyników pomiaru.

Planowanie pomiarów GPR powinno uwzględniać cel badań jak i charakterystykę badanego odcinka, gdyż to determinuje rodzaj zastosowanych anten, poziom interpretacji oraz nakład pracy, co przekłada się na całkowity koszt pomiaru.

Zaleca się wykonywanie pomiarów pojedynczymi antenami. Wydaje się, że prowadzenie jednoczesnego pomiaru dwiema antenami ground-coupled o różnych częstotliwościach centralnych wpływa na pogorszenie jakości uzyskiwanego obrazu. Kłopotliwe jest też prowadzenie dwóch anten jednocześnie, gdyż wózek do przewozu systemu posiada z reguły mocowania przystosowane do jednej anteny. W takim wypadku drugą antenę należałoby ciągnąć równolegle do wózka co wymaga obsługi dwuosobowej.

W przypadku standardowych badań geotechnicznych nie ma potrzeby stosowania gęstszego kroku pomiarowego niż 10-20cm. Założenie kroku pomiarowego w takim przedziale gwarantuje wystarczającą jakość uzyskiwanych danych. W pomiarach specjalistycznych, polegających np. na wyszukiwaniu rur lub innych obiektów znajdujących się w gruncie częstotliwość pomiaru należy dobrać indywidualnie, uwzględniając zależności przedstawione w rozdziale 3.2. To samo dotyczy szerokości okna próbkowania sygnału. W ramach przeprowadzonych badań stwierdzono, że dla anteny

400 MHz długość okna czasowego powinna wynosić nie więcej niż 50ns, natomiast dla anteny 270 MHz nie więcej niż 80ns. W przypadku anteny 270 MHz należy zastrzec, że sugerowana długość okna wynika z pomiarów przeprowadzonych na odcinkach o mało skomplikowanym podłożu głębokim, co powodowało, że głębsza obserwacja nie była konieczna. Zalecana przez producenta długość okna czasowego dla tej anteny wynosi 175ns.

Należy zadbać o prawidłowe „wygrzanie” systemu pomiarowego. W tym zakresie należy postępować zgodnie z instrukcjami producenta sprzętu, tym nie mniej przed rozpoczęciem zasadniczych pomiarów zaleca się, aby system pracował w trybie ona oscyloskopowego przez co najmniej 20 min.

Przed przystąpieniem do pomiarów zasadniczych zaleca się wykonanie pomiarów próbnych w celu sprawdzenia poprawności nastawień systemu pomiarowego. W trakcie pomiarów należy obserwować rejestrowany echogram i w miarę możliwości oznaczać markerami lokalizacje miejsc, w których nastąpiła wyraźna zmiana charakteru zarejestrowanego obrazu radarowego.

W terenach o zróżnicowanej morfologii zaleca się stosowanie systemu GPS. Lokalizacja GPS, a zwłaszcza lokalizacja wysokościowa, może być bardzo przydatna na etapie interpretacji danych.

Raport z badań powinien zawierać:

1. Opis zadania.
2. Mapa z lokalizacją trasy pomiaru.
3. Wstępna ocena podłoża gruntowego na podstawie zarejestrowanych danych radarowych, zawierająca wskazanie lokalizacji miejsc odwiertów (o ile konieczne są odwierty dodatkowe niż wymagane przepisami).
4. Geotechniczny opis odcinka przygotowany na podstawie klasycznych badań geotechnicznych (w wersji skróconej, zawierającej podstawowe informacje o układzie warstw, zmianach zagęszczenia i wilgotności, najlepiej naniesione na profil w formie graficznej tak jak na prezentowanych przykładach w punkcie 7).
5. Szczegółowa interpretacja echogramów (wydruki echogramów z naniesioną interpretacją).
6. Weryfikacja profilu geotechnicznego badanego odcinka.
7. Podsumowanie, w którym należy przedstawić dokonane założenia, napotkane problemy związane z pomiarami i interpretacją uzyskanych danych.

9 Podsumowanie

Uzyskane wyniki badań wskazują, że pomiary radarowe istotnie mogą poprawić jakość oceny geotechnicznej podłoża. Oczywiście jest fakt, że ten rodzaj badań nigdy nie będzie mógł być jedynym i wystarczającym badaniem prowadzonym rutynowo, z drugiej jednak strony równie oczywiste wydaje się zastosowanie techniki radarowej jako narzędzia wspomagającego proces oceny jakości podłoża gruntowego.

Szczególnie przydatną właściwością tej metody pomiaru jest możliwość wyznaczenia ciągłego profilu zmienności warunków gruntowo-wodnych w dowolnie przyjętym profilu pomiarowym. **Uzyskane dane pokazują również jak czuła jest to technika na wszelkie zmiany wilgotności gruntu i zagęszczenia kolejnych warstw.** W kilku omawianych przypadkach to właśnie te zmiany zostały zarejestrowane na echogramach, zamiast lub wraz z granicami zmian rodzaju gruntu, które zostały zdefiniowane przy pomocy badań klasycznych.

Ograniczeniem metody jest z pewnością potrzeba **dużego doświadczenia operatora w pomiarach i obróbce sygnałów radarowych.** Osiągnięcie zadowalających efektów pomiaru zależy od wielu czynników, z których najistotniejszym jest właśnie doświadczenie osoby odpowiedzialnej za planowanie i wykonanie pomiaru oraz interpretację danych. Zrozumienie teoretycznych podstaw działania, procedur i interpretacji GPR jak również wiedza z zakresu geotechniki i geologii jest podstawą osiągnięcia zadowalających wyników pomiaru.

Interpretacja uzyskanych echogramów jest **bardzo trudna, a bez rozpoznania klasycznego sprowadza się do określenia bardzo ogólnego obrazu podłoża.** Pomiar GPR jest, jak na standardy geotechniczne, zbyt „czuły” i wprowadza nowe elementy graficzne w interpretacji, nawet tam gdzie występuje ten sam rodzaj gruntu. **Rejestrowane granice charakteryzują się dużą zmiennością, na którą wpływają, oprócz rodzaju gruntu, także inne czynniki jak zagęszczenie (gęstość) gruntu, wilgotność, interferencja fal od większych obiektów podziemnych.** Należy dążyć do „zmniejszenia czułości” lub filtrować obraz tak, aby były widoczne na obrazie tylko istotne zmiany (rodzaj gruntu, woda gruntowa). Wymaga to kontynuacji badań prowadzonych w ramach rutynowego rozpoznania geotechnicznego na poziomie projektu.

Przeprowadzone badania wykazały, że **nie jest możliwe określenie nastawień systemu pomiarowego oraz procedur pomiarowych uniwersalnych dla każdego rodzaju badania.** Wynika to przede wszystkim z indywidualnego charakteru badanych odcinków. Ustawienia jak i procedura powinny być każdorazowo indywidualnie dobierane w zależności od potrzeb i charakteru odcinka. Tym nie mniej w punkcie 8 przedstawiono zalecenia i wskazówki dotyczące ustawień systemu, sposobu pomiaru i interpretacji danych. Podstawowym wnioskiem wypływającym z tych zaleceń jest staranność wykonania oraz dbałość o odpowiednie warunki w trakcie prowadzenia pomiarów.

Na podstawie GPR można planować badania klasyczne, gdyż z obrazu GPR wynikać mogą miejsca o dużej niejednorodności, w których należy wykonać dodatkowe badania. **Miejsca te przy klasycznym rozpoznaniu gruntowym byłyby niemożliwe do ustalenia.** Aktualnie badania GPR nie może zastąpić badań klasycznych, które są podstawą do projektowania. Mogą one być na razie jedynie uzupełnieniem klasycznego rozpoznania geologicznego.

Bibliografia

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

Annan , A.P., Ground Penetrating Radar // Workshop notes. - Ontario : Sensor&Software Inc., 2001.

Annan A.P Ground Penetrating Radar // Workshop notes. - Ontario : Sensor&Software Inc., 2001.

Benedetto , A. and Benedetto , F. GPR experimental evaluation of subgrade soil characteristics for rehabilitation of roads [Conference] // Proceedings of the IX International Conference on Ground Penetrating Radar. - Santa Barbara : [s.n.], 2002.

Bohn Axel O. The History of the Falling Weight Deflectometer (FWD) [Journal].

Brendt Instrukcja, dotycząca wiązania warstw, spoin, połączeń i kształtowania asfaltowych poboczy powierzchni komunikacyjnych // tłumaczenie z języka niemieckiego wykonał mgr inż Edmund Boito. - Bonn : M SNAR, 1998.

Campbell , J. E. Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz [Article] // Soil Science Society of America Journal. - 1990. - Vol. Vol. 54. - pp. 332-341.

Canestrari F and Santagata E Temperature effects on the shear behaviour of tack coat emulsions used in flexible pavements // The International Jurnal of Pavement Engineering. - 2005.

Cassidy , N. J. Frequency-dependent attenuation and velocity characteristics of magnetically lossy materials [Conference] // IEEE Proceedings of the 4th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar. - Naples : [s.n.], 2007. - pp. pp. 142-146.

Chellgren J D Preventing Pavenemt Slipping [Journal] // Local Highway Technical News. - 1999. - p. vol 11 no. 4.

Cheung M W, Hakim B A and Armitage R J Use of FWD Data for Prediction of Bonding Between Pavement Layeres [Journal] // International Journal of Pavement Engineering. - 2000. - pp. vol. 1, s. 49-59.

Conyers , L. B. Ground-Penetrating Radar for Archaeology [Book]. - Oxford : Altamira Press, 2004.

COST Action 336 "Falling Weight Deflectometer" [Report]. - [s.l.] : FEHRL, 1996.

Cross S A and Shrestha P P Guidelines for Using Prima and Tack Coats [Journal] // Technical Report FHWA-CFL-04-001. - 2004. - p. s 113.

Daniels , D. J. Ground-Penetrating Radar [Book]. - London, UK : The Institute of Electrical Engineers, 2004.

Daniels J Ground Penetrating Radar fundamentals // Appendix to Report to United States Environmental Protection Agency. - 2000.

Fisher , E., McMechan , G. A. and Annan , A. P. Acquisition and processing of wide-aperture ground penetrating radar data [Journal] // Geophysics. - 1992. - Vol. Vol. 57. - p. pp. 495.

Forest R and Utsi V Non Destructive crack depth measurements with Ground Penetrating Radar [Conference] // Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar . - Delft : Slob, Yarovov & Rhebergen (eds), 2004. - pp. pp 799–802.

Geophysical Survey Systems Inc. GSSI [Online]. - 2008. - <http://www.geophysical.com/militarysecurity.htm>.

Glet W Układ i związanie warstw w konstrukcjach nawierzchni asfaltowych [Journal] // Nowości w Zagranicznej Technice drogowej. - 2000. - pp. s 37-53.

Gołębiowski , T. Wprowadzenie do metodyki interpretacji badań georadarowych przy użyciu procedury modelowania numerycznego [Article] // Przegląd Geologiczny. - Warszawa : Państwowy Instytut Geologiczny, 2004. - 7 : Vol. 52. - pp. pp. 563-568.

Greaves , R. J. [et al.] Velocity variation and water content wstimated from multi-offset, ground penetrating radar [Journal] // Geophysics. - 1996. - Vol. Vol. 61. - pp. pp. 683-695.

Hachiya Y and Sato K Effect of Tack Coat on Bonding Characteristics at Interface Between Asphalt Concrete Layers [Journal] // Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements. - 1997. - pp. s 349-362.

Hakim B A The importance of good bond between bituminous layers [Journal] // Scott Wilson Pavement Engineering. - 2002. - p. s. 11.

Hakim B A Pavement assessment including bonding condition: case studies. [Conference] // International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields. - Trondheim : [s.n.], 1998.

Hyslip J [et al.] Assessment of railway track substructure condition useing Groun Penetrating Radar. - 2003.

Jaskuła P Ocena szczepności między warstwami asfaltowymi nawierzchni [Journal] // Drogownictwo. - 2006. - pp. s. 412-414.

Jiménez P F and Soto Sanchez J A Special Modified Emulsions of Modified Bitumen for Tack Coats [Journal] // 2 nd Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona. - 2000. - pp. s. 463-471.

Jol , H. M. Ground Penetrating Radar: theory and Applications [Book]. - Amsterdam, Holandia : Elsevier Science, 2009.

Judycki J and Jaskuła P Badania i ocena wpływu szczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni asfaltowej [Report]. - Gdańsk : Raport z badań I i II etapu badań, 2005/2006.

Judycki J Szczepność między warstwami asfaltowymi nawierzchni [Article] // Drogownictwo. - wrzesień 2003. - pp. s. 275-279.

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

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

Loulizi Amara Development of Groud Penetrating Radar signal modeling and implementation for transportation infrastructure assessment // Praca doktorska. - 2001.

Lyons , R. G. Understanding Digital Signal Processing [Book]. - New Jersey, USA : Prentice Hall Inc., 2004.

Maser, K.; Scullion, T. Automated detection of pavement layer thicknesses and subsurface moisture using ground penetrating radar. - [s.l.] : Transport Research Board, 1991.

Mattei , E. [et al.] Effective frequency and attenuation measurements of glass beads/magnetite mixtures by time domain reflectometry [Journal] // Near Surface Geophysics. - 2007. - Vol. Vol. 5. - pp. pp. 77-82.

McNeill , J. D. Electrical conductivity of soils and rock [Report] : Technical Note TN-5. - Mississauga, Ontario, Kanada : Geonics Limited, 1980.

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

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

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

Olhoeft , G. R. and Capron , D. E. Laboratory measurements of the radio frequency electrical an magnetic properties of soils near Yuma, Arizona [Book]. - [s.l.] : U.S. Departament of Interior USG Open file Raport, 1993. - pp. pp. 93-701.

Olhoeft , G. R. Electrical, magnetic and geometric properties that determine ground-penetrating radar performance [Conference] // Proceedings, Seventh International Conference on Ground-Penetrating Radar. - Lawrence, USA : University of Kansas, 1998. - pp. 177-182.

Olhoeft , G. R. Maximizing the information return from ground penetrating radar [Journal] // Journal of Applied Geophysics. - 2000. - Vol. Vol. 43. - pp. pp.175-187.

Olhoeft G [Online]. - 2003. - <http://www.g-p-r.com/>.

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

Pałys M, Zawadzki J and Skierczyński P Połączenie między warstwami nawierzchni asfaltowej- metoda badania wymagania [Conference] // VIII Międzynarodowa Konferencja Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe. - Kielce : IBDiM, 2002. - pp. s. 299-306.

Partl M N and Raab C Shear strength properties between asphalt pavement layers [Journal] // Archives of Civil Engineering. - 1998. - pp. s. 353-365.

Pos J [et al.] Powiązanie asfaltowych warstw nawierzchni: badania, wpływy, ocena-rozważania porównawcze Niemcy- Wielka Brytania [Journal] // Nowości Techniki Zagranicznej, (opr. Mikulski J.). - 2003. - pp. s. 5-30.

Raab C and Partl M N Inter-Layer and In-Layer Shear Strength of Swiss Asphalt Pavements. - [s.l.] : EMPA.

Raab Ch. Związanie warstw asfaltowych (Normalizacja badania w Szwajcarii) [Journal] // Nowości w Zagranicznej Technice Drogowej, (opr. Wałęcka H.K.). - 2002. - pp. s. 13-32.

Raab C and Partl M.N. Interlayer shear performance experience with different pavement structures [Conference] // Euroasphalt and Eurobitume Congress. - Wiena : [s.n.], 2004.

Romanoschi S A and Metcalf J B The characterization of pavement layer interfaces [Conference] // ICAP. - Copenhagen : [s.n.], 2002. - p. s. 18.

Saarenketo , T. Elektrial 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.

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

Saarenketo T. Using ground penetrating radar and dielectric probe measurements in pavement density quality control. - [s.l.] : Transport Research Record 1997, pp. 34-41, 1997.

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.

Sangiorgi C, Collop A C and Thom N H A non-destructive impulse hammer for evaluating the bound between asphalt layers in a road pavement [Conference] // International Symposium: Non-Destructive Testing in Civil Engineering. - Berlin : Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., 2008.

Scaffer J and Saxena A The science and design of engineering 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..

Sholar G A [et al.] Preliminary Investigation of a Test Method to Evaluate Bond Strength of Bituminous Tack Coats [Journal] // Research Report FL/DOT/SMO/02-459, Florida Department of Transportation. - 2002. - p. s. 36.

Singh , K. K. Application of Ground Penetrating Radar for hydro-geological study [Journal] // Journal of Scientific & Industrial Research. - Luty 2006. - Vol. Vol. 65. - pp. pp. 160-164.

Stockert U Ein Beitrag zur Festlegung von Grenzwerten für den Schichtenverbund im Asphaltstraßenbau [Journal] // Elektronische Publikationen Darmstadt. - 2002. - p. s. 145.

Sudyka, J. Technika radarowa w drogownictwie – nowa jakość w ocenie konstrukcji nawierzchni. - [s.l.] : Polski Kongres Drogowy, 2006.

Sybilski D, Mechowski T and Harasim P Ocena połączenia międzywarstwowego nawierzchni ugięciomierzem FWD [Journal] // Drogi i Mosty. - 2007. - pp. 41-82.

Tashman L, Nam K and Papagiannakis T Evaluation of the influence of tack coat construction factors on the bond strength between pavement layers [Journal] // Washington Center for Asphalt Technology. - 2006.

Tschegg E K [et al.] Investigation of Bonding Between Asphalt Layers on Road Construction [Journal] // Journal of Transportation Engineering. - 1995. - pp. s. 309-316.

Turner , G. and Siggins , A. F. Constant Q attenuation of subsurface radar pulses [Journal] // Geophysics. - 1994. - No. 8 : Vol. Vol. 59. - pp. pp. 1192-1200.

Von Becker Wpływ szczepności międzywarstwowej na zachowanie się nawierzchni asfaltowych [Conference] // FGSV 25/B5.1. - Boon : tłumaczenie z języka niemieckiego dla potrzeb Zakładu Budowy Dróg PG wykonał mgr inż. Edmund Boito, 1990.

West R C, Zhang J and Moore J Evaluation of bond strength between pavement layers [Report]. - Alabama : NCAT Report 05-08, Auburn University, 2005.

Yelf , R. Application of Ground Penetrating Radar to civil and geotechnical engineering [Journal] // Electromagnetic Phenomena. - Charków, Ukraina : Institute for Electromagnetic Research Ltd., 2007. - No. 1 (18) : Vol. Vol. 7.

Yelf R Where is true time zero? [Conference] // Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar. - Delft, Holandia : [s.n.], 2004.

Young , R. A., Deng , Z. and Sun , J. Interactive processing of GPR data [Journal] // The Leading Edge. - 1995. - pp. pp. 275-280.

Zawadzki J, Skierczyński P and Mechowski T Wpływ połączenia między warstwami asfaltowymi na trwałość nawierzchni [Conference] // IX Międzynarodowa Konferencja Trwałe i bezpieczne Nawierzchnie Drogowe. - Kielce : IBDiM, 2003. - pp. s. 415-423.

Zieliński P Wybrane zagadnienia trwałości nawierzchni asfaltobetonowej z geosyntetyczną warstwą pośrednią // Praca doktorska. - [s.l.] : Politechnika Krakowska, 2004.