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”.

SPRAWOZDNIE CZĘŚCIOWE
Etap I – zadania 1-6

Zleceniodawca: 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

Kierownik Zakładu
Diagnostyki Nawierzchni

mgr inż. Tomasz MECHOWSKI

Warszawa, listopad 2009

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 Opracowanie dokumentacji geotechnicznej 32
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 44
7 Podsumowanie 55
Bibliografia 56

Załącznik Wyniki badań geotechnicznych

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 (Jol, 2009).....17

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) 18

Rysunek 3.3 Diagram ilustrujący proces przewodzenia w materiale zawierającym ładunki wolne, takie jak aniony i kationy (Jol, 2009).....19

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). 20

Rysunek 3.5 Rozdzielczość pionowa Δv i pozioma Δh.....21

Rysunek 3.6 Impulsy czasowe o szerokości ½ W; a) impulsy wyraźnie odseparowane gdy T>>W, b) impulsy rozróżnialne do momentu gdy T≈W, c) impulsy nakładające się (nierozróżnialne) gdy T<<W 22

Rysunek 3.7 Rozdzielczość w funkcji częstotliwości emitowanej fali 24

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) 25

Rysunek 3.9 Warianty ułożenia anten względem siebie i linii pomiarowej (T- nadajnik, R – odbiornik, $\rightarrow$ - kierunek profilu) 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; z lewej antena o częstotliwości 270 MHz z zamontowaną rączką, z prawej antena o częstotliwości 400 MHz umieszczona na wózku wyposażonym w dystansomierz 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, linia niebieska oznacza ustabilizowany poziom wody, linia czerwona oznacza zasięg podciągania kapilarnego 35

Rysunek 5.4 Pomiar po ustabilizowaniu się zwg na głębokości 39 cm, linia niebieska oznacza ustabilizowany poziom wody, linia czerwona oznacza zasięg podciągania kapilarnego 36

Rysunek 5.5 Pomiar po ustabilizowaniu się zwg na głębokości 20 cm, linia niebieska oznacza ustabilizowany poziom wody, linia czerwona oznacza zasięg podciągania kapilarnego 36

Rysunek 5.6 Pomiar po ustabilizowaniu się zwg na głębokości 0 cm, linia niebieska oznacza ustabilizowany poziom wody 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 – pomiar długotrwały (po ok. 8h każdy), cyfry 1,2 i 3 oznaczają rozpoczęcie kolejnego pomiaru, zmiany związane z niestabilnością systemu oznaczono elipsami 42

Rysunek 5.14 Test podnoszenia anteny nad blachą (rysunek górny bez background removal, rysunek górny z background removal) 42

Rysunek 5.15 Pręty ∅ 2mm na głębokości 0 cm (rysunek po lewej) i 50 cm (rysunek po prawej) 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 Lokalizacja odcinka Ząbki 45

Rysunek 6.3 Lokalizacja odcinka Soczewka 45

Rysunek 6.1 Pomiary radarowe na odcinku Płońsk – seria I 46

Rysunek 6.1 Pomiary radarowe na odcinku Płońsk – seria II 47

Rysunek 6.1 Profil geotechniczny opracowany na podstawie badań klasycznych - odcinek Płońsk.....48

Rysunek 6.1 Pomiary radarowe na odcinku Ząbki -seria I 49

Rysunek 6.1 Pomiary radarowe na odcinku Ząbki -seria II 50

Rysunek 6.1 Profil geotechniczny opracowany na podstawie badań klasycznych - odcinek Ząbki.....51

Rysunek 6.1 Pomiary radarowe na odcinku Soczewka – seria I 52

Rysunek 6.1 Pomiary radarowe na odcinku Soczewka – seria II 53

Rysunek 6.1 Profil geotechniczny opracowany na podstawie badań klasycznych - odcinek Soczewka.....54

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 1[2], Eurokod 7-Projektowanie geotechniczne Część 2[3], Rozporządzeniu o posadawianiu obiektów budowlanych[4], Rozporządzeniu o drogach publicznych[5], 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 gruntowego[6], 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 *G*i.

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 zobligowania 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 ił !!!

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 własności 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:

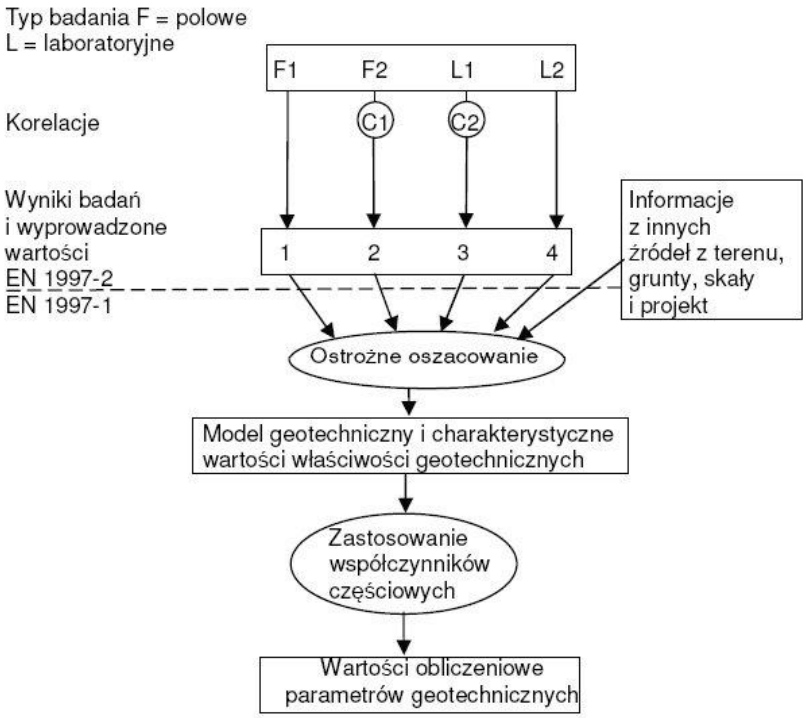
- sondowanie statyczne np. CPT, sondowanie dynamiczne SPT, WST, badania presjometrem, badania dylatometrem, badania za pomocą obciążenia płytą sztywną, badania polową sondą obrotową i badania przepuszczalności);
- pobieranie prób gruntów i skał do opisania gruntów lub skał i do badań laboratoryjnych;
- 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 gruntów[11].

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 systemy 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 przewodzony jest 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 jakiekolwiek 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 miedzy 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.

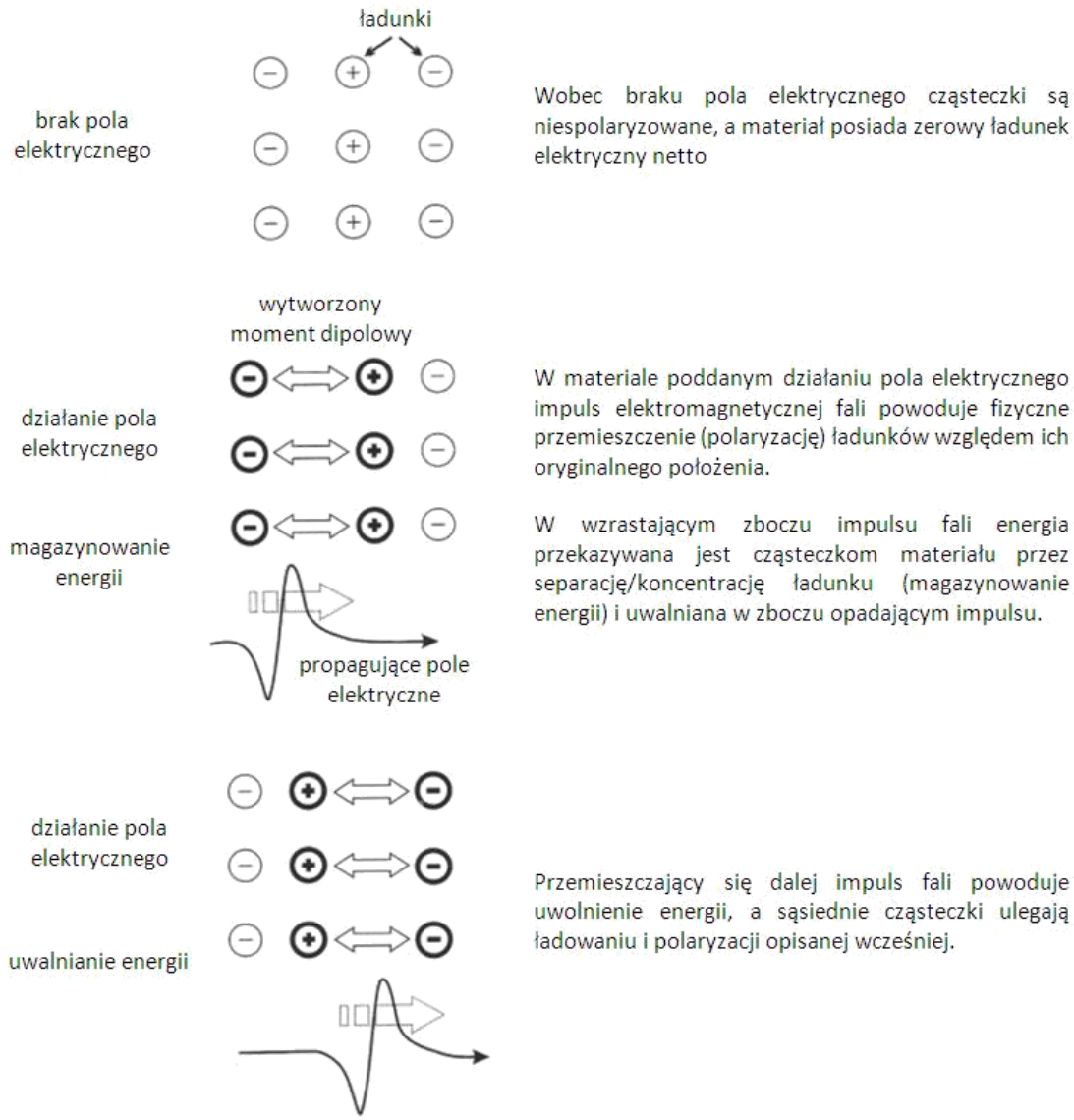
3.1.1 Przenikalność elektryczna

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)

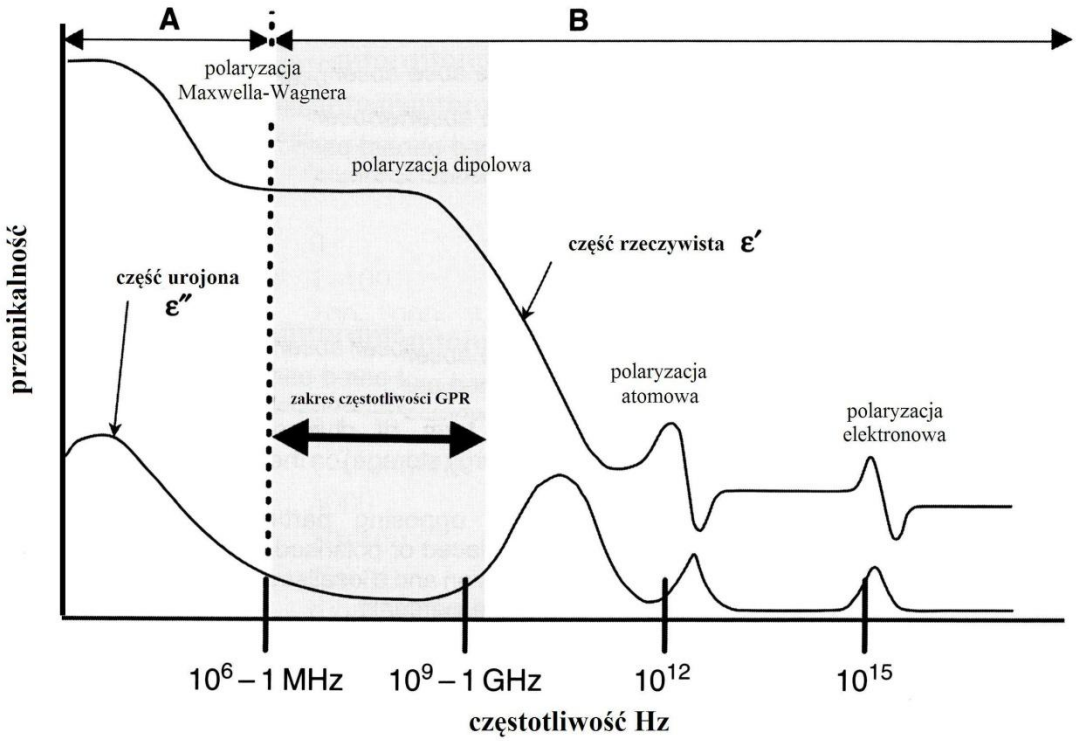
ośrodek	stała dielektryczna ε_r	przewodność σ [mS/m]
powietrze	1	0
glina - sucha	2-20	1-100
glina - mokra	15-40	100-1000
woda	78 (@25°C) - 80	0,1-10
lód z wody słodkiej	3	10-100
woda morska	81-88	4000
lód z wody morskiej	4-8	10-100
zmarzlina	2-8	0,1-10
granit - suchy	5-8	0,001-0,00001
granit – szczelinowaty 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.

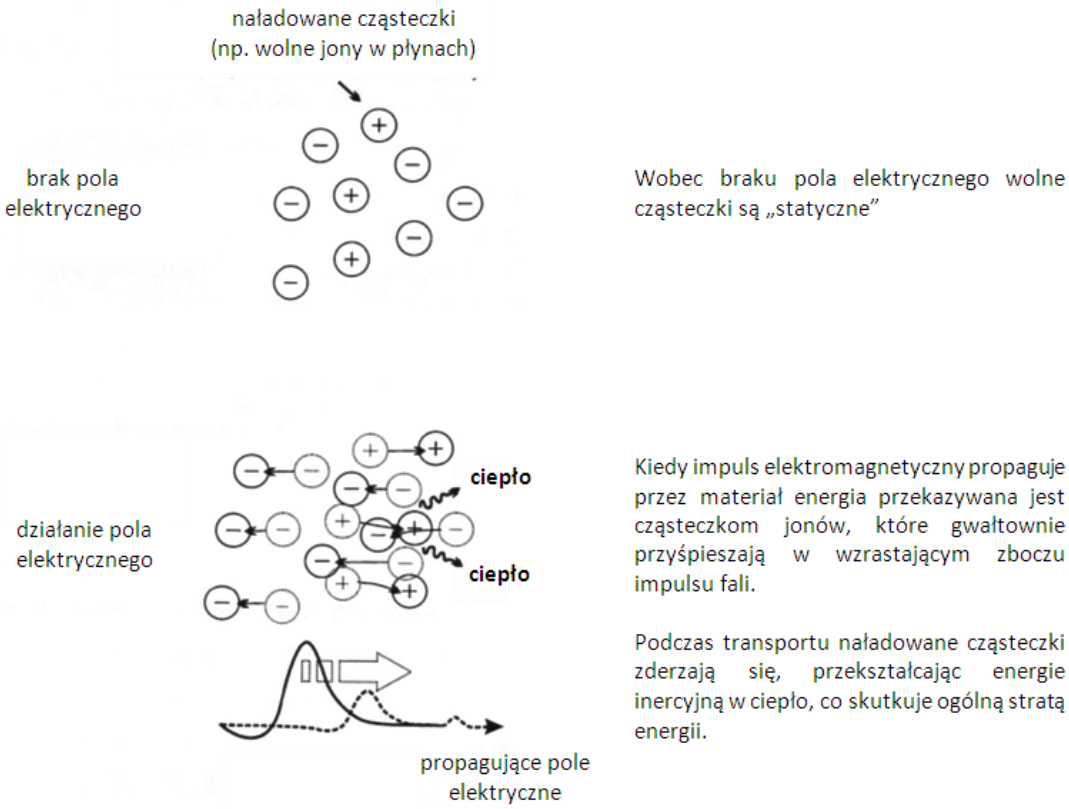


Rysunek 3.2 Zjawisko relaksacji przenikalności wyidealizowanego dielektryka stratnego. Część A przedstawia obszar związany z polaryzacją ładunków wolnych i interakcje materiałowe, natomiast część B przedstawia obszar polaryzacji molekularnej i atomowej ładunków granicznych (Daniels, 2004)

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 przyśpieszających 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.

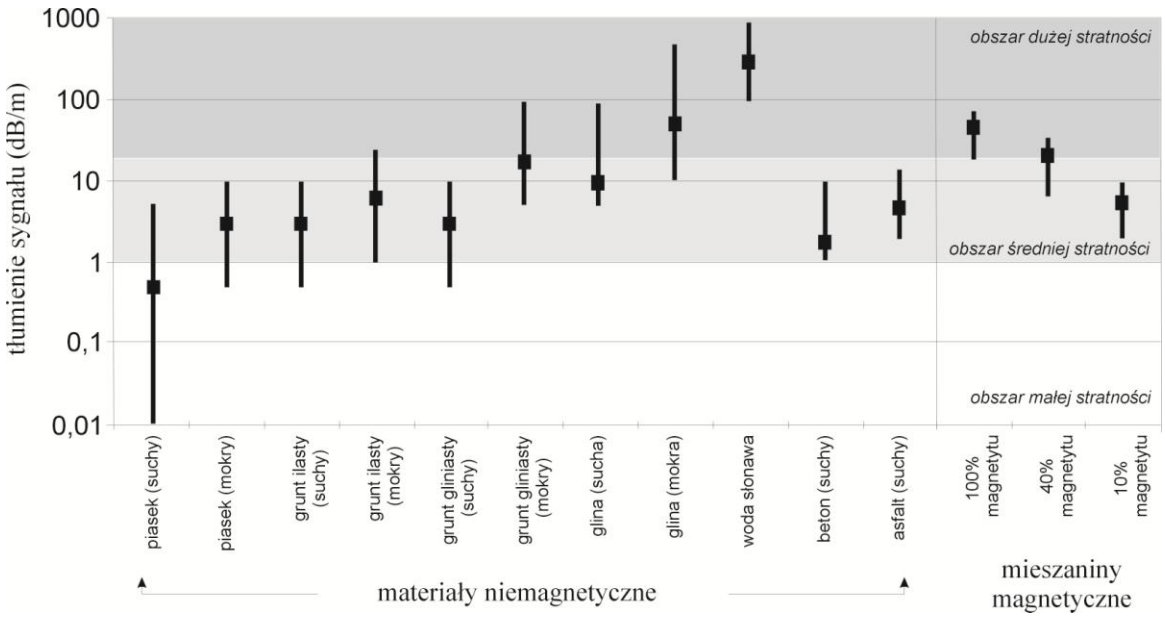


Rysunek 3.3 Diagram ilustrujący proces przewodzenia w materiale zawierającym ładunki wolne, takie jak aniony i kationy (Jol, 2009)

3.1.3 Magnetyczne parametry dielektryków

W większości wypadków magnetyzm materiałów ma niewielki wpływ na przenikająca falę radarową, a ich podatność magnetyczna *(μ)* często upraszczana jest do wartości w wolnej przestrzeni 1,26 x 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 stanową 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.

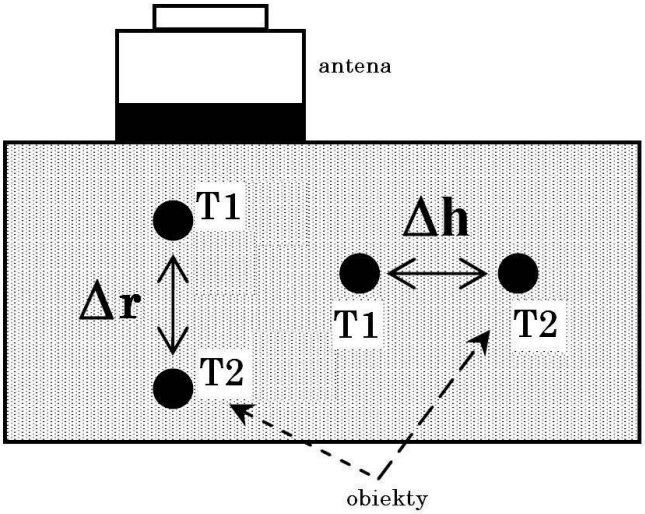


Rysunek 3.4 Typowe wartości tłumienia fali w materiałach gruntowych i mieszankach magnetytu przy częstotliwościach 200-1200MHz. Linie ciągłe oznaczają zakres tłumienia, natomiast kwadratowe znaczniki przedstawiają wartości typowe dla materiałów lub średnie dla magnetytów (Jol, 2009).

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 Δv 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.

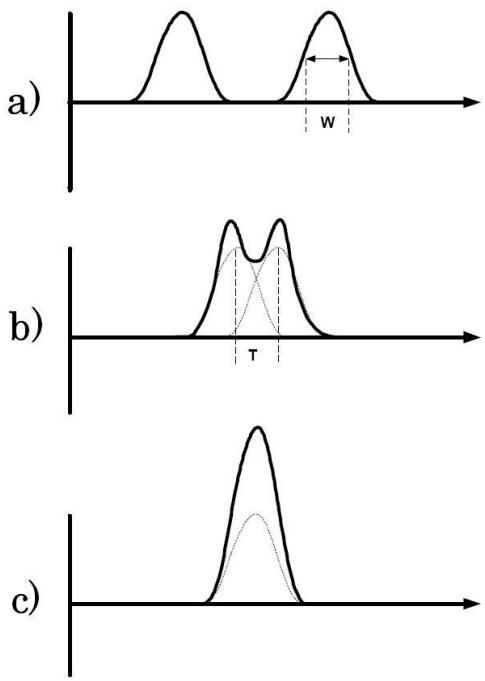
Jak podaje (Annan, 2001) jeżeli obserwujemy dwa obiekty T1 i T2, położone w jednej linii od punktu pomiaru, to różnica w czasie nadejścia impulsów odbitych będzie bezpośrednio związana z odległością między tymi obiektami. Czasy nadejścia impulsów odbitych od obiektów T1 i T2 można zapisać następująco:

$$t_1 = \frac{2d}{v} \tag{2.1}$$

$$t_2 = \frac{2d + 2\Delta r}{v} \tag{2.2}$$

gdzie:

d – głębokość położenia obiektu, v – prędkość fali.



Rysunek 3.6 Impulsy czasowe o szerokości ½ W; a) impulsy wyraźnie odseparowane gdy T>>W, b) impulsy rozróżnialne do momentu gdy T≈W, c) impulsy nakładające się (nierozróżnialne) gdy T<<W

Różnica w czasie nadejścia impulsu może być wyrażona jako:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2\Delta r}{v} \tag{2.3}$$

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

$$\Delta r \geq \frac{Wv}{4} \tag{2.4}$$

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 T1 i T2 można zapisać następująco:

$$t_1 = \frac{2d}{v} \tag{2.5}$$

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

natomiast różnica w czasie nadejścia impulsu może być wyrażona jako:

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

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

$$\Delta t = \frac{\Delta h^2}{vd} \tag{2.8}$$

co z kolei wskazuje, że:

$$\Delta h \geq \sqrt{\frac{vdW}{2}} \tag{2.9}$$

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:

$$W = \frac{1}{B} = \frac{1}{f_c} \tag{2.10}$$

gdzie:

$$\lambda_c = \frac{f_c}{v} \tag{2.11}$$

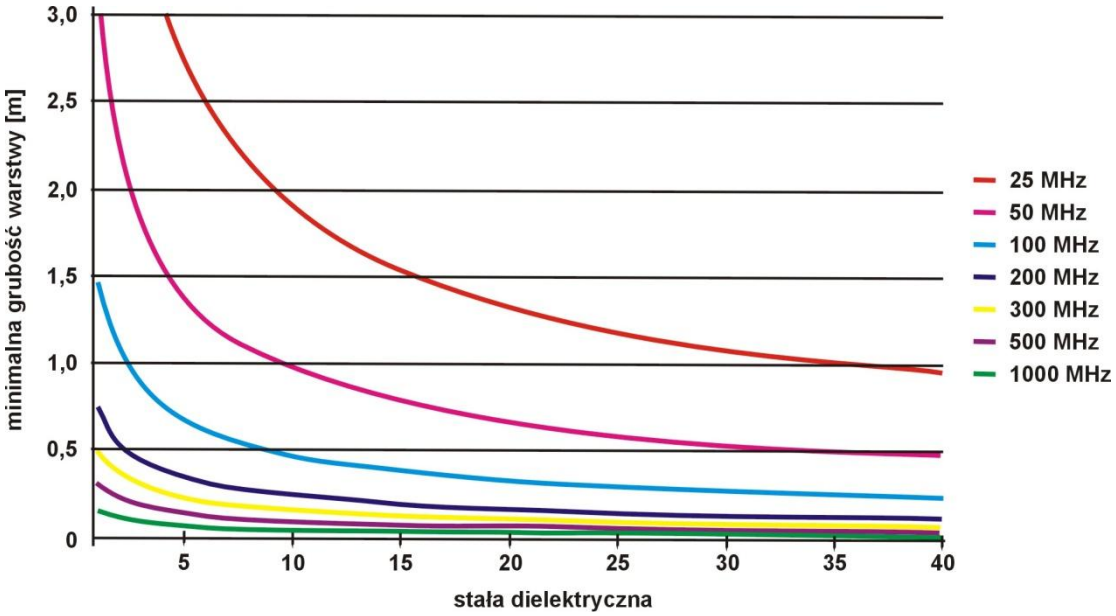
rozdzielczość pozioma może być wyrażona następująco:

$$\Delta h = \sqrt{\frac{d\lambda_c}{2}} \tag{2.12}$$

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.



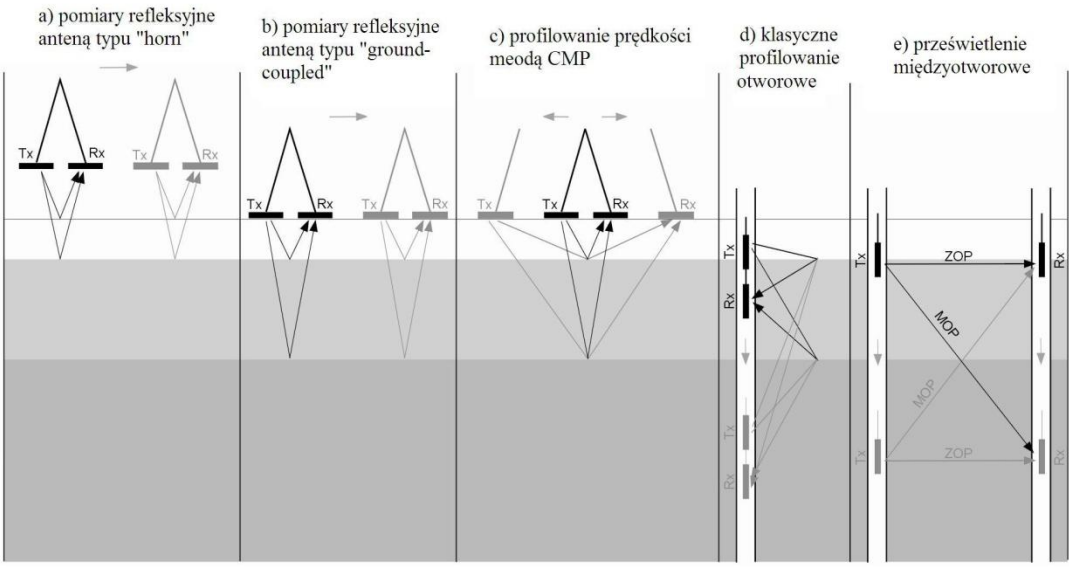
Rysunek 3.7 Rozdzielczość w funkcji częstotliwości emitowanej fali

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.

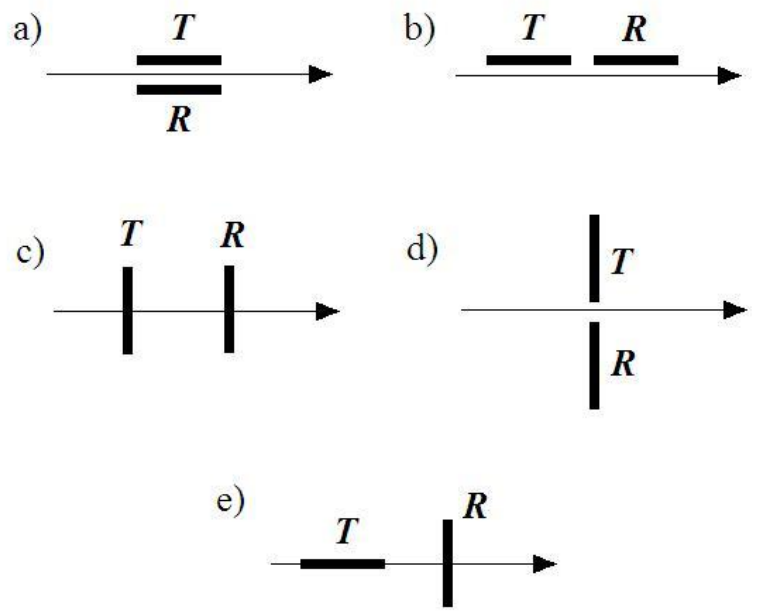
Ze względu na swą wysoką wydajność i największą dostępność w dalszej części przedstawiono jedynie metodę profilowania refleksyjnego.

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 równolegle do siebie, co powoduje polaryzację pola elektrycznego równolegle 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.

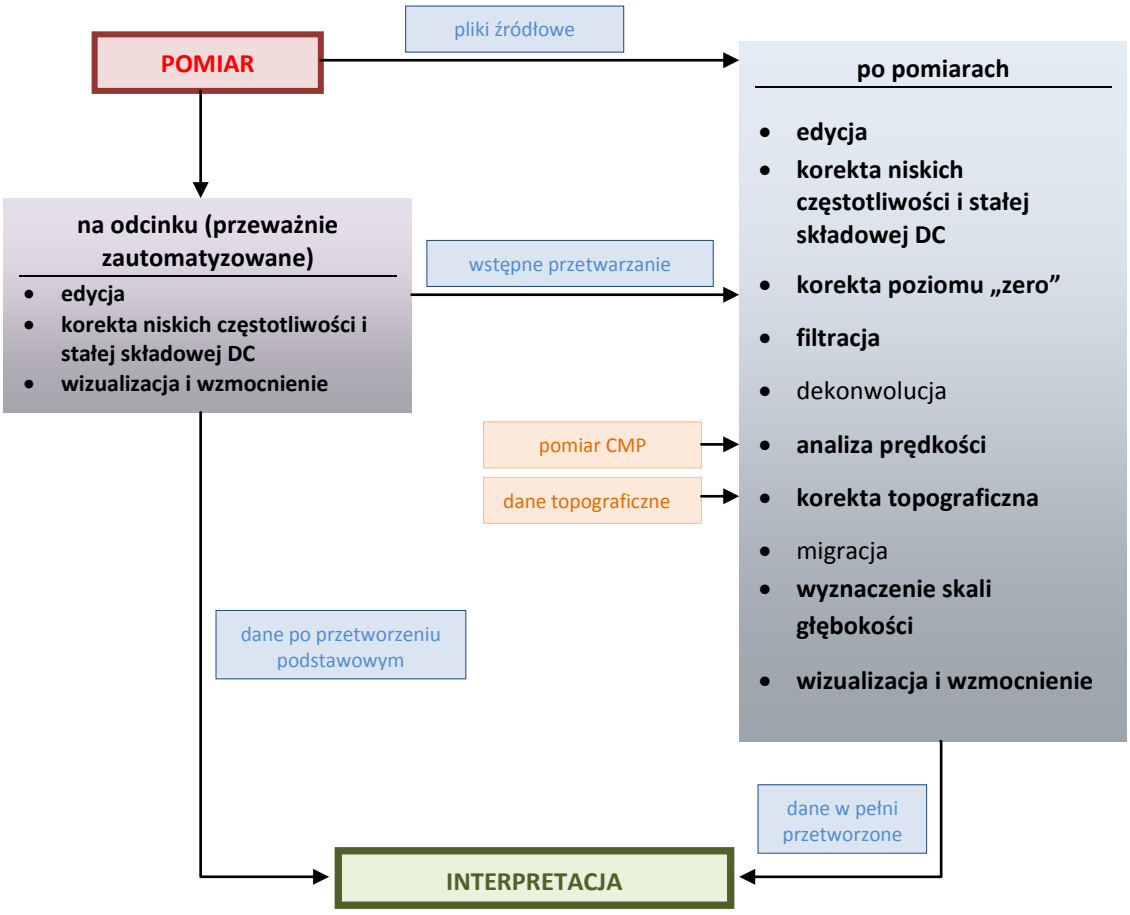
Wymienione powyżej czynniki są bardzo istotne, a odpowiednie dobranie częstotliwości centralnej do warunków pomiaru, właściwości obiektu i celu pomiarów pozwoli uzyskać wysoką jakość danych. Często pomiary radarowe wykonuje się bez pełnej wiedzy o badanym obiekcie, a to czy częstotliwość została odpowiednio 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 miedzy 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).



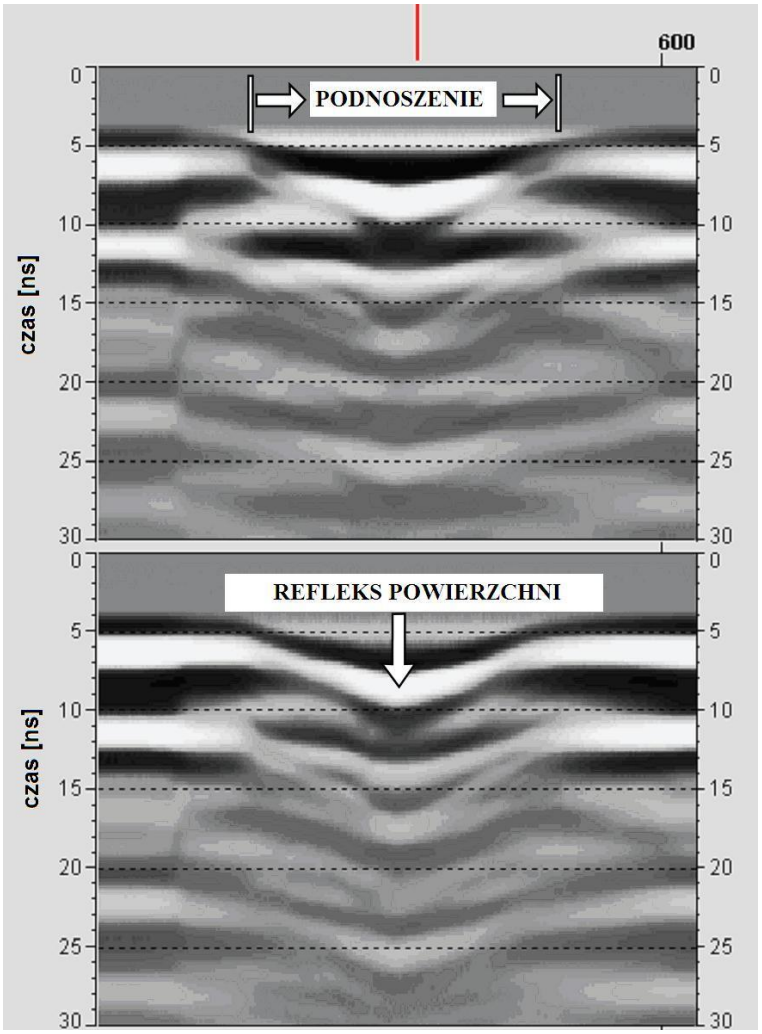
Rysunek 3.10 Typowy schemat procesu przetwarzania sygnałów radarowych z pomiarów refleksyjnych

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 przygotowano na podstawie opracowania (Saarenketo, 2006)). Korekta poziomu „zero” jest przedmiotem wielu rozważań i publikacji. W publikacji (Yelf, 2004) przedstawiono opis rożnych metod wyznaczania poziomu „zera”.

Filtracja stosowana jest w celu usunięcia szumów i poprawienia jakości obrazów radarowych. Istnieje wiele rożnych 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 całe sekcji (z ang. backgroud

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 Gi, 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 badan 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 Gi 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 groun-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.

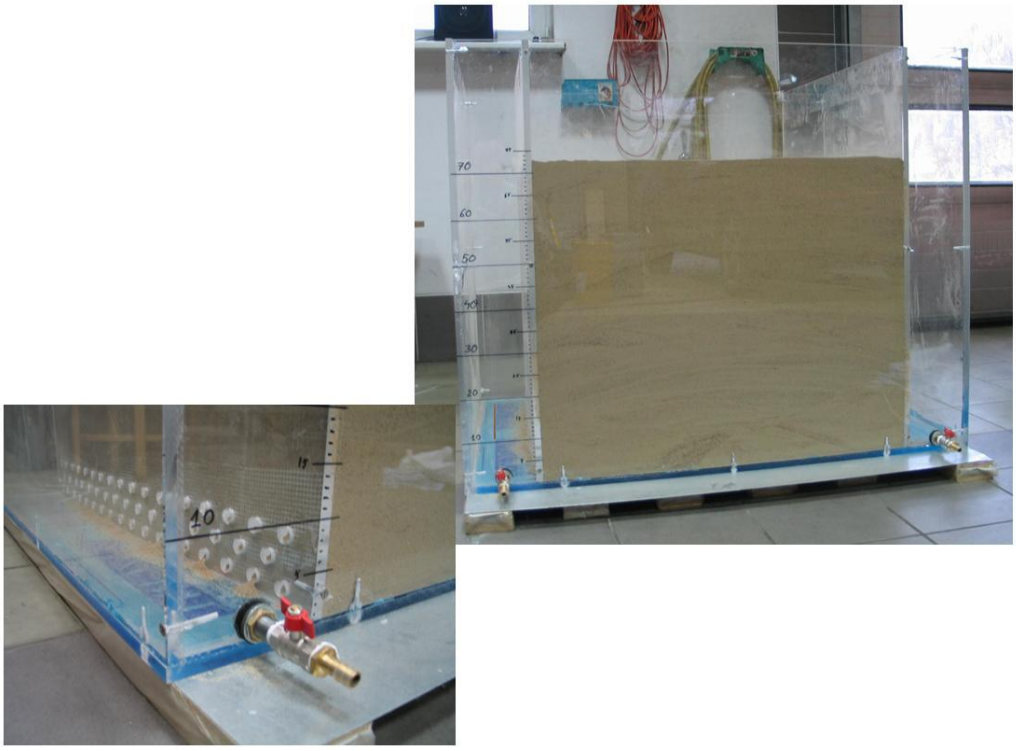
5.1 Ocena wpływu zwiększonej wilgotności w gruntach na otrzymywany sygnał radarowy

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 miedzy komorami na materiał i wodę.

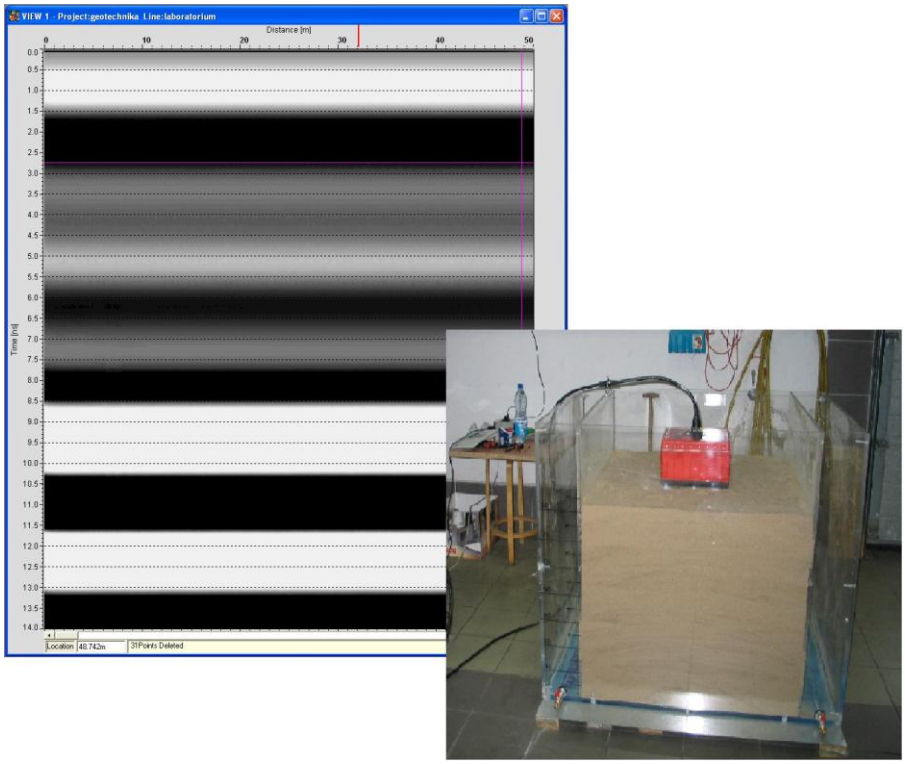


Rysunek 5.1 Stanowisko badawcze

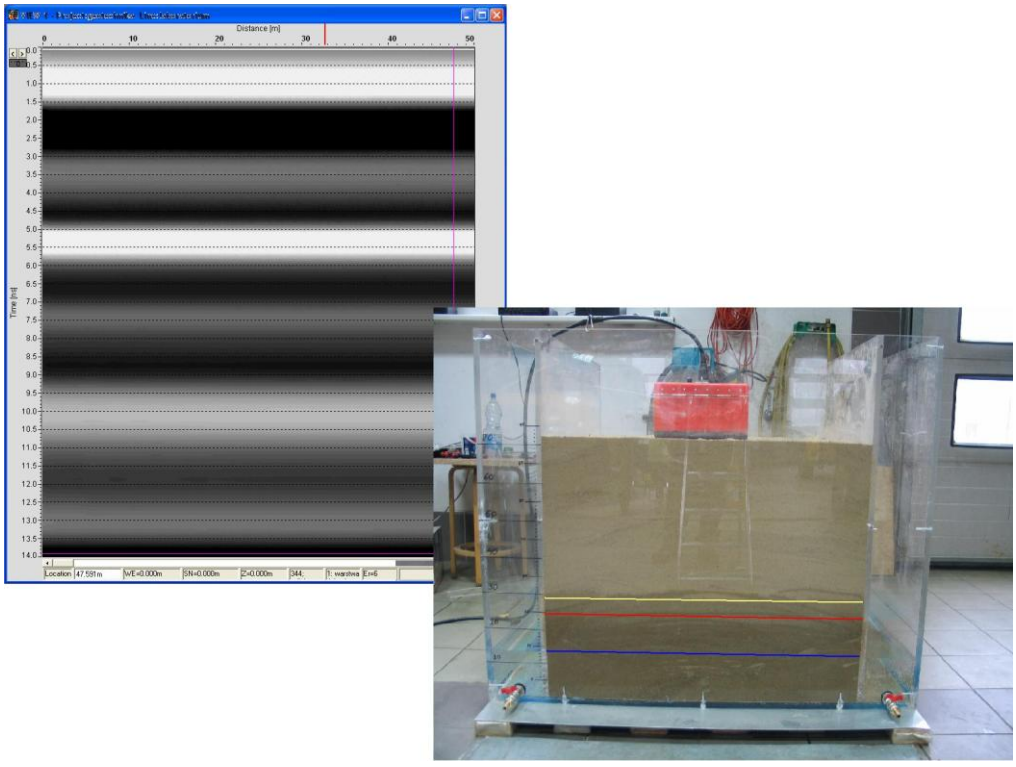
Na Rysunkach 5.2-5.6 przedstawiono wybrane wyniki pomiarów piasku przy zmieniającym się poziomie zwierciadła wody. Wyniki przeprowadzonych pomiarów w wskazują na wysoką czułość układu pomiarowego na zmianę zawilgocenia podłoża. Ten poziom czułości obserwowany jest jeszcze przy ustabilizowanym poziomie 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.

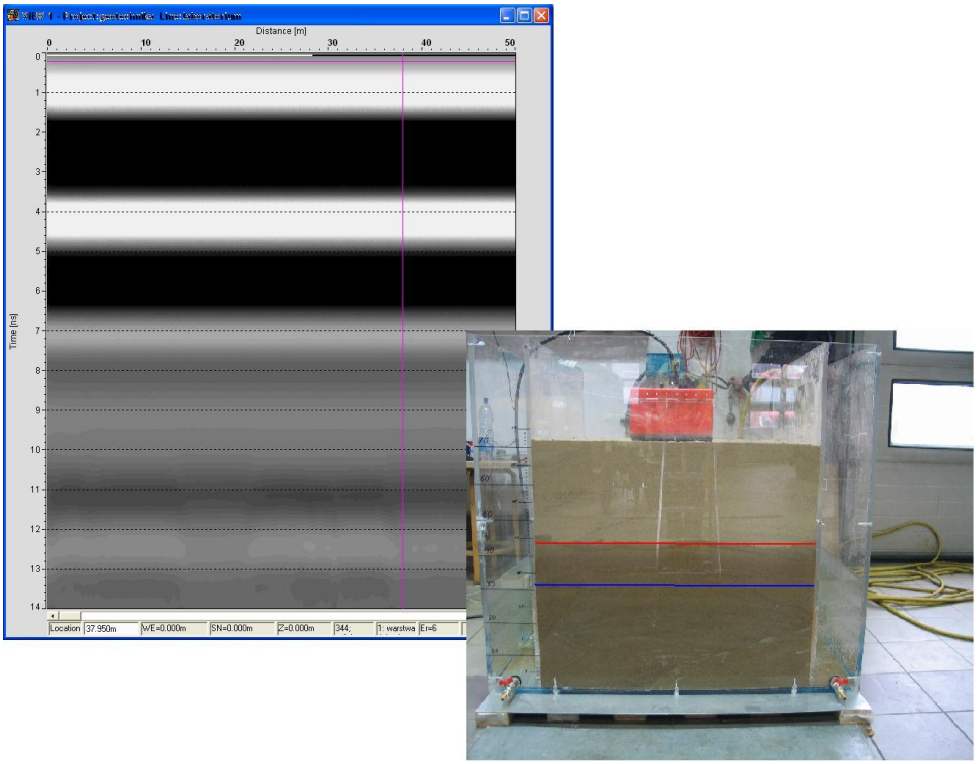
W praktyce ocena układu warstw gruntów mocno zawilgoconych z płytko zalegającym zwierciadłem wody gruntowej może, zwłaszcza w przypadku zastosowania jedynie anteny 400 MHz, okazać się trudna lub wręcz niemożliwa. Dlatego istotne jest aby każdorazowo wykonywać pomiary przynajmniej podwójnym zestawem anten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



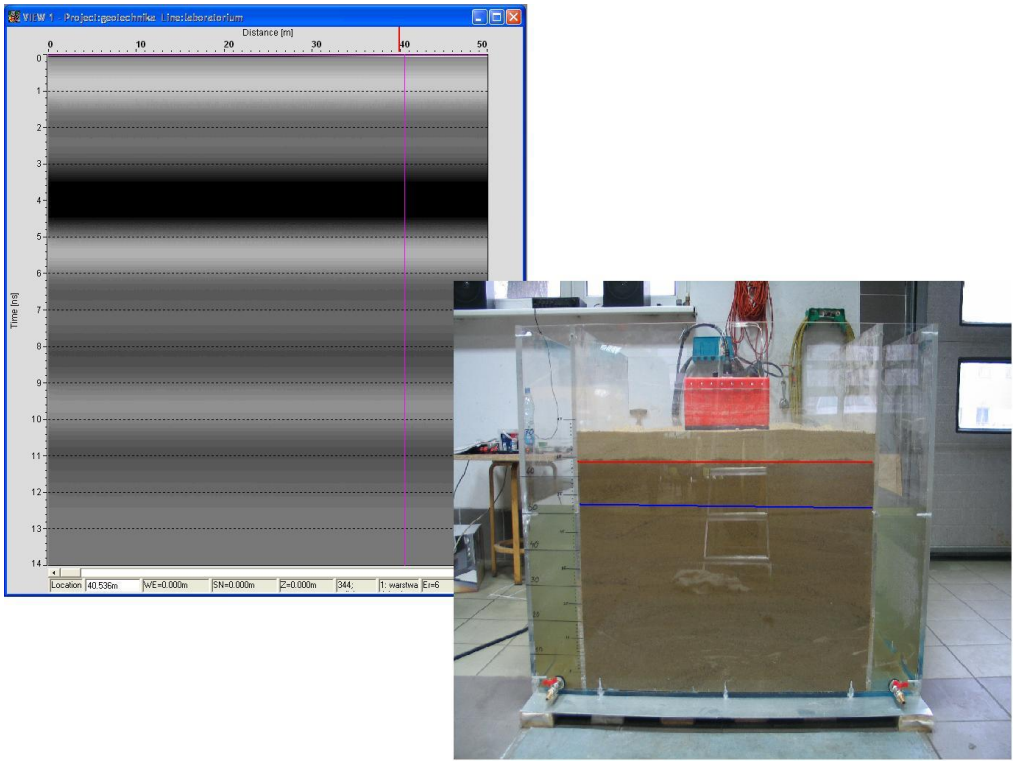
Rysunek 5.2 Pomiar piasku przed dolaniem wody



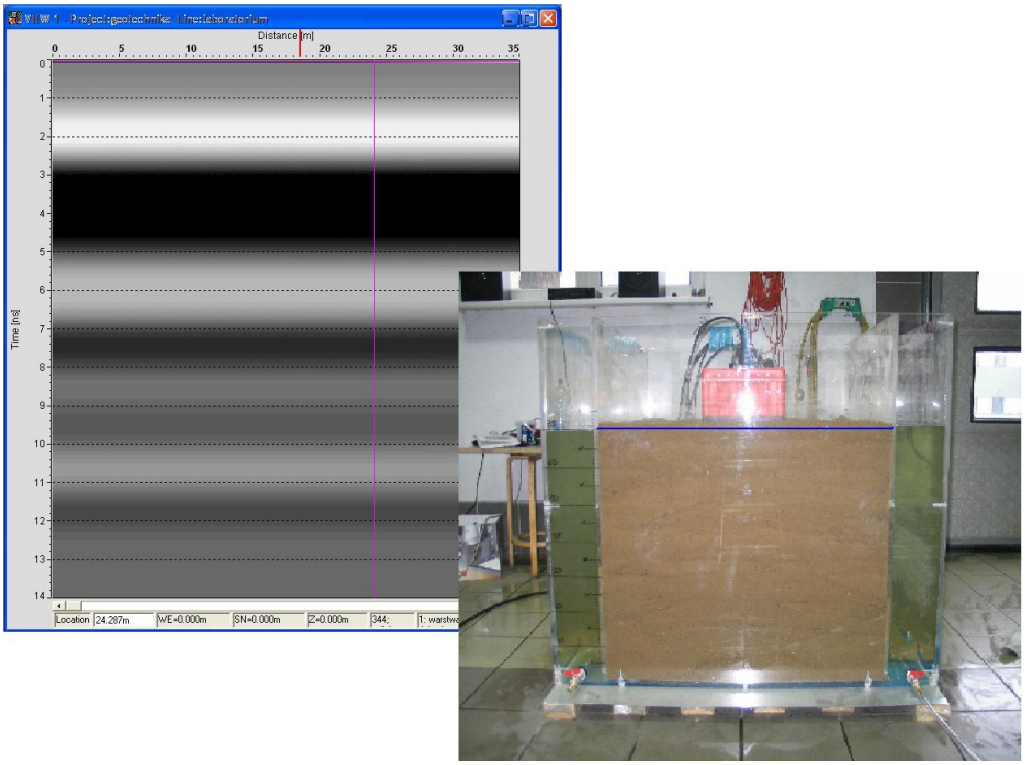
Rysunek 5.3 Pomiar po ustabilizowaniu się zwg na głębokości 59 cm, linia niebieska oznacza ustabilizowany poziom wody, linia czerwona oznacza zasięg podciągania kapilarnego



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

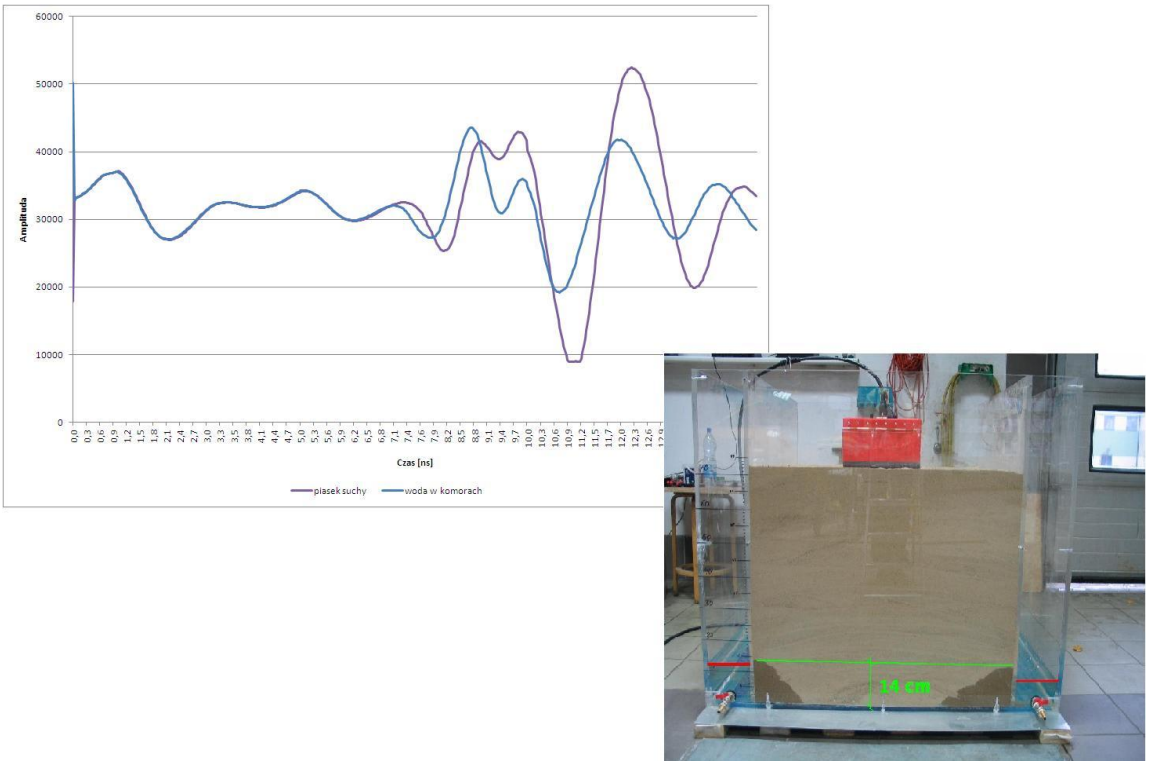


Rysunek 5.6 Pomiar po ustabilizowaniu się zwg na głębokości 0 cm, linia niebieska oznacza ustabilizowany poziom wody

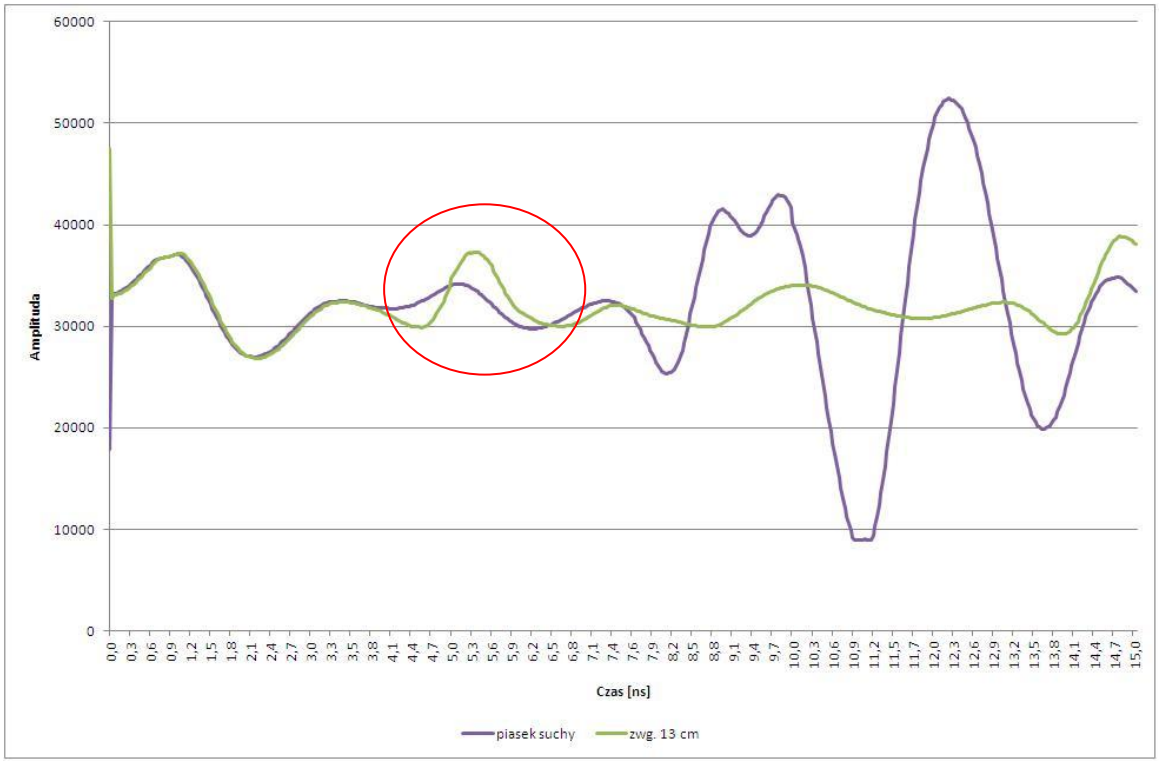
Poniżej zaprezentowano obrazy oscyloskopów pojedynczych sygnałów w porównaniu z refleksem uzyskanym podczas pomiaru piasku suchego.

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 niezmieniony, lecz jego przesuniecie w kierunku początku okna pomiarowego.

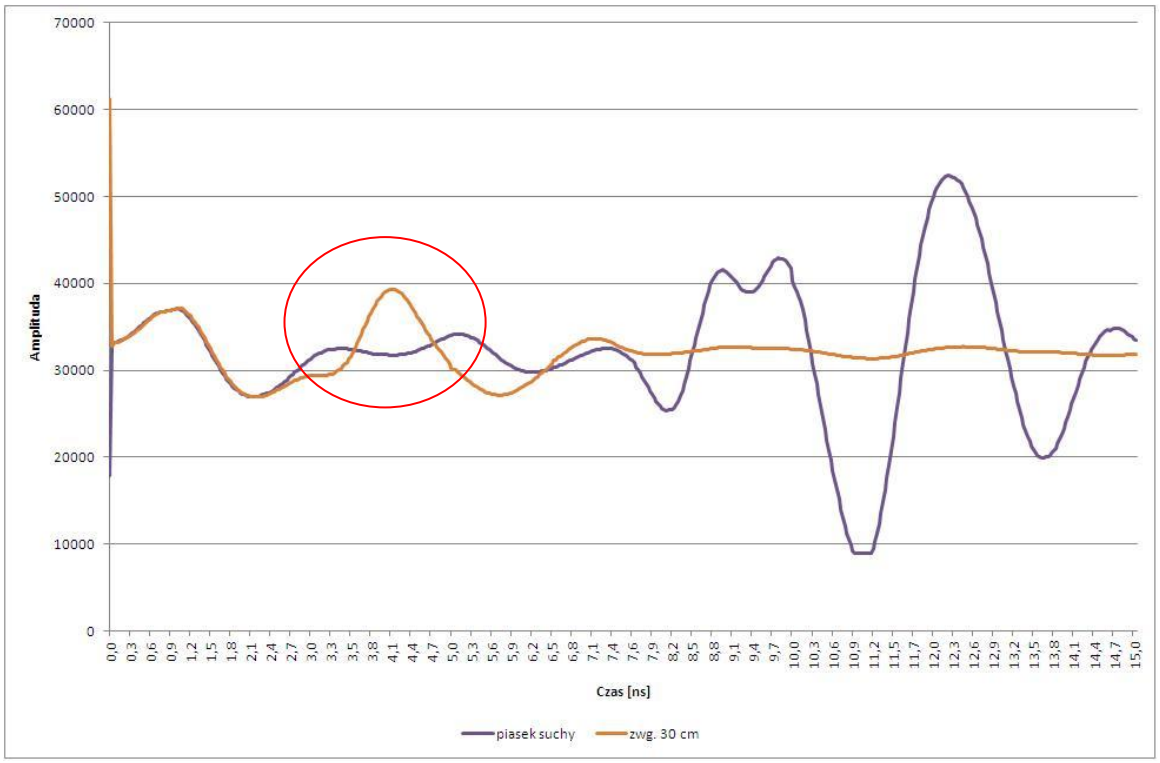
Rysunki 5.8 – 5.11 przedstawiają zmianę kształtu sygnału w zależności od głębokości ustabilizowanego poziomu wody w gruncie. Jak wcześniej wspomniano interpretacja poziomu zwierciadła wody możliwa jest jeszcze przy głębokości ok. 25 cm (Rysunek 5.10). Płytsze położenie powoduje, że refleks zwierciadła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



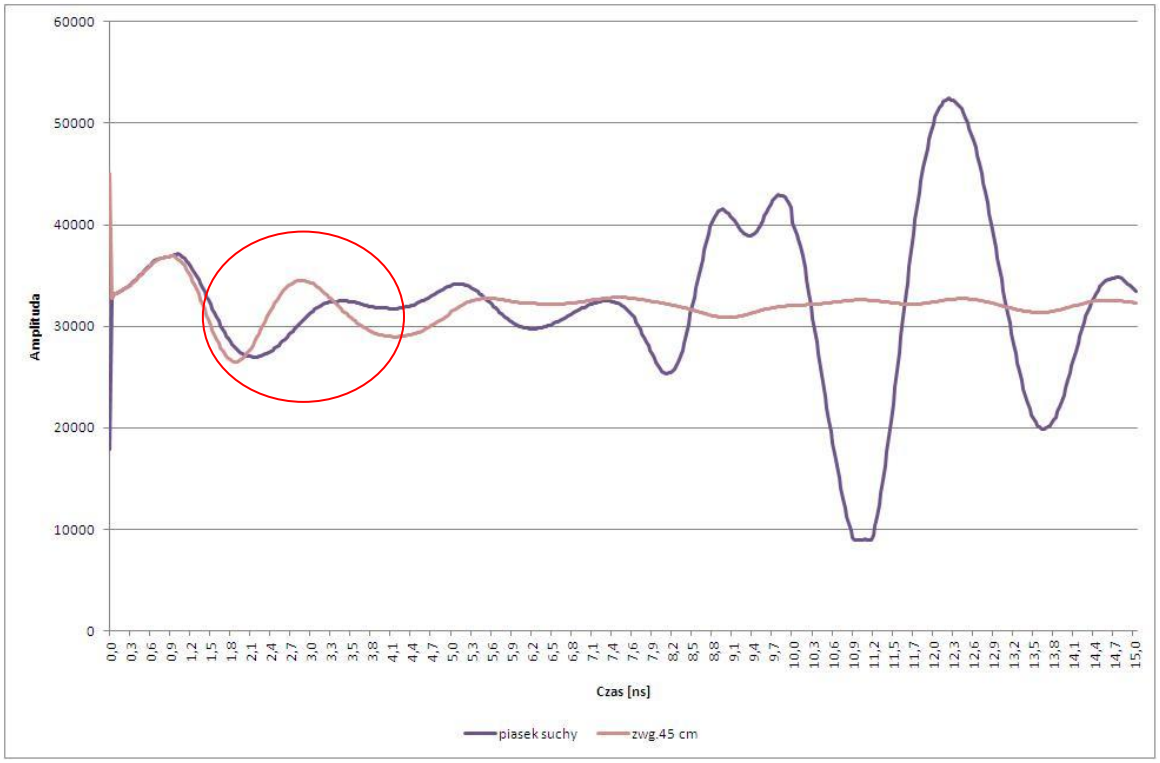
Rysunek 5.7 Oscyloskop sygnału przed i po dolaniu wody do komór



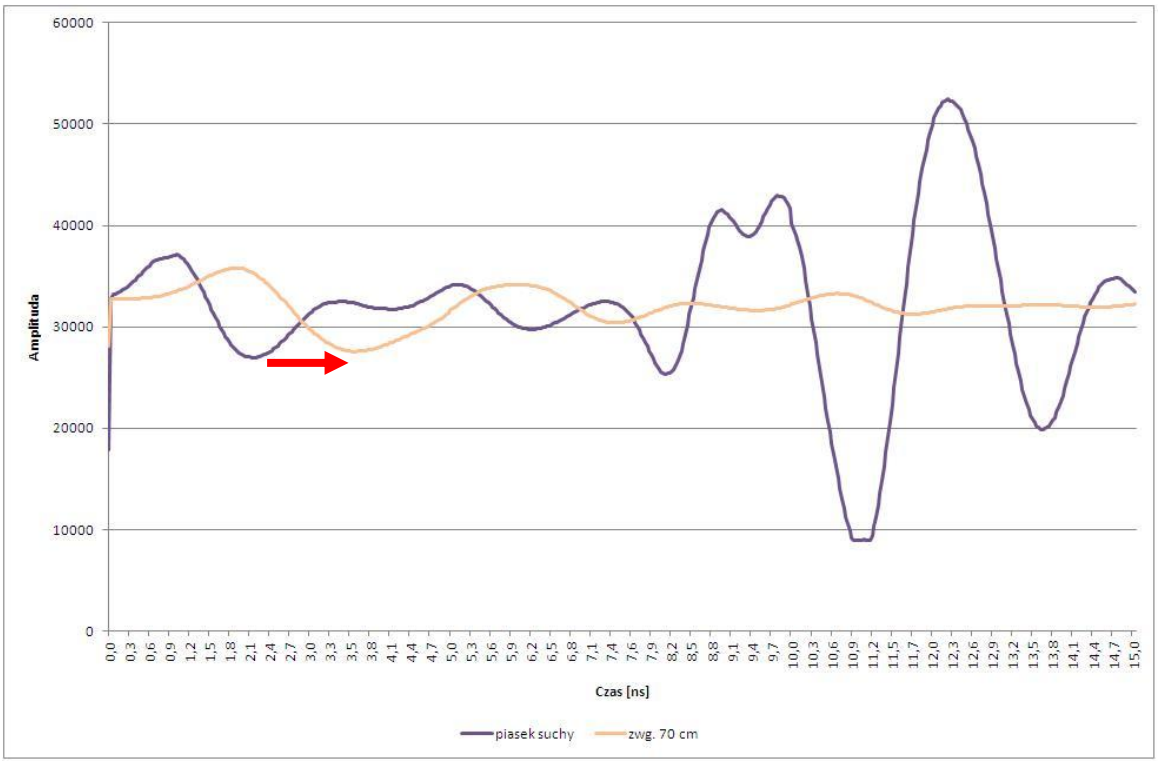
Rysunek 5.8 Oscyloskop sygnału po ustabilizowaniu się zwg. na głębokości 59 cm oraz pojedynczy skan z pomiaru piasku suchego



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.

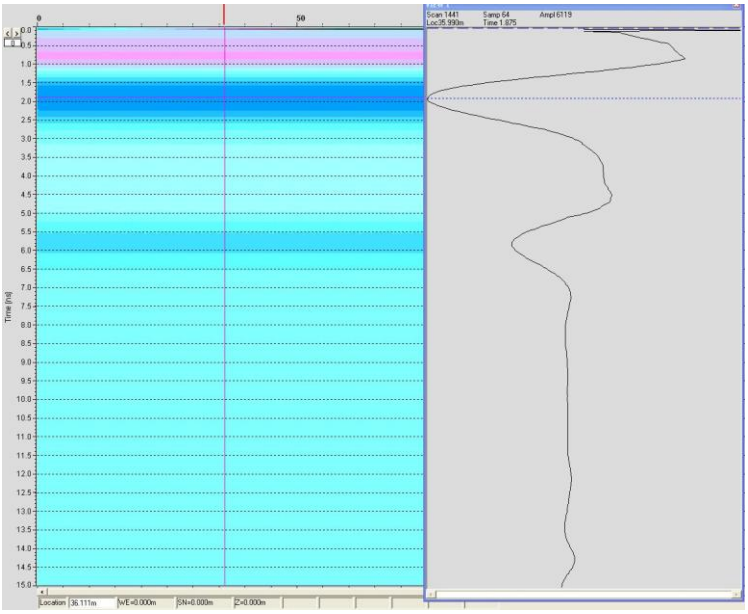
Istotną obserwacją dokonaną w trakcie badań jest to, że znacznie łatwiejsze jest zidentyfikowanie warstwy zawilgoconej wskutek podciągania kapilarnego niż bezpośredniego położenia zwierciadła wody gruntowej. W badaniach terenowych zjawisko to może okazać się trudne do wyeliminowania, a podczas interpretacji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

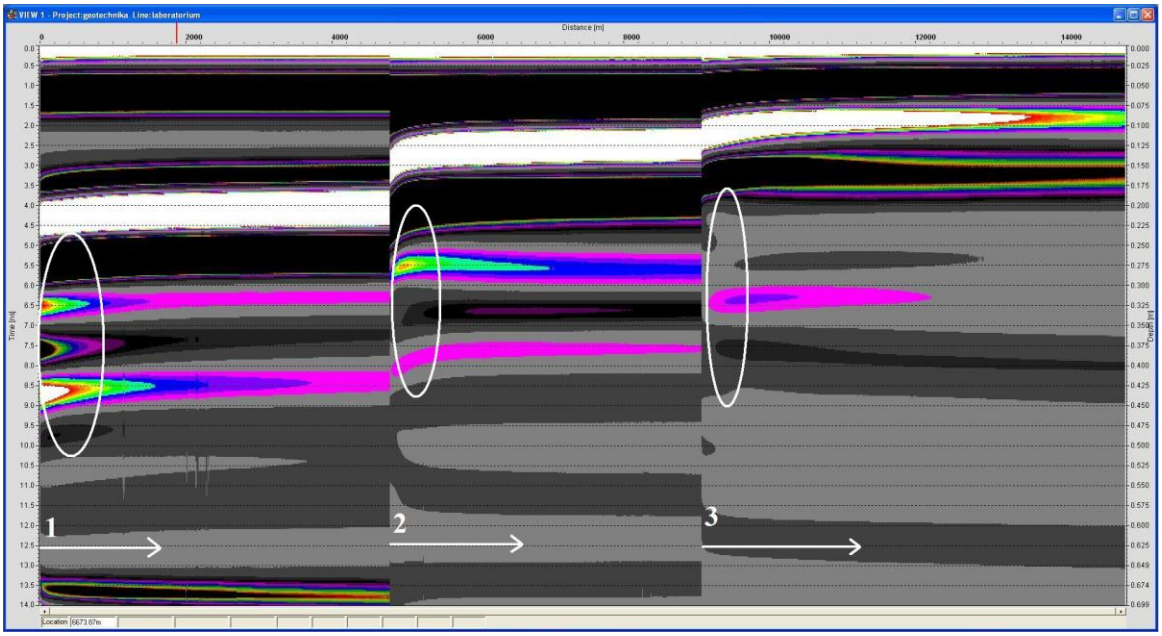
Przeprowadzone pomiary wykazały, że niestabilność systemu pomiarowego jest niewielka, a niekorzystne efekty z tym związane można zredukować poprzez odpowiednie wygrzewanie aparatury.



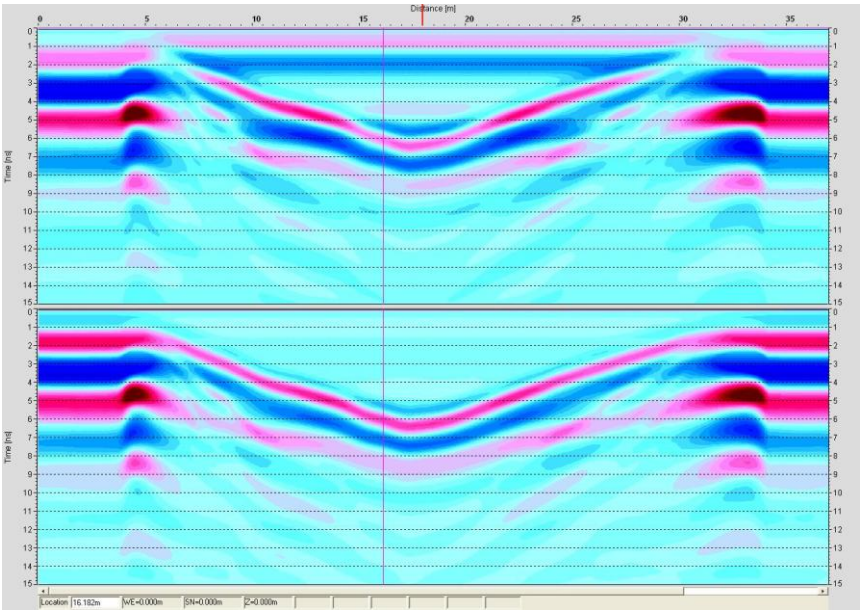
Rysunek 5.12 Ocena stabilności sygnału emitowanego przez pomiar sygnału tła

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.



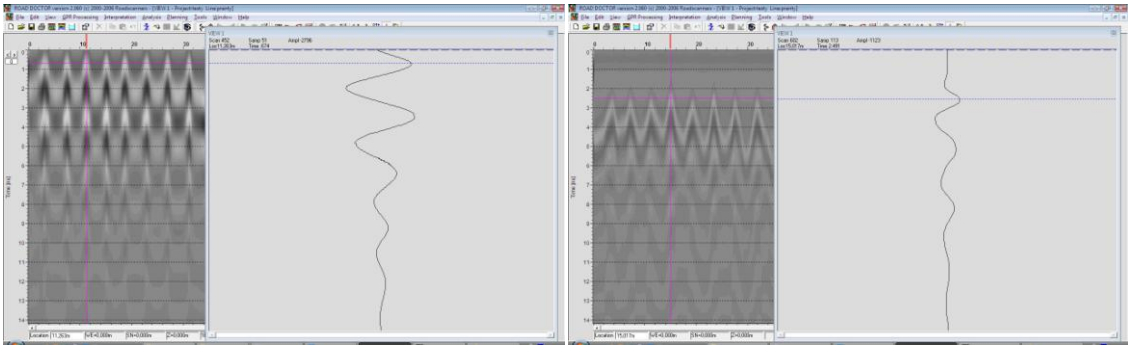
Rysunek 5.13 Ocena stabilności sygnału emitowanego – pomiar długotrwały (po ok. 8h każdy), cyfry 1,2 i 3 oznaczają rozpoczęcie kolejnego pomiaru, zmiany związane z niestabilnością systemu oznaczono elipsami



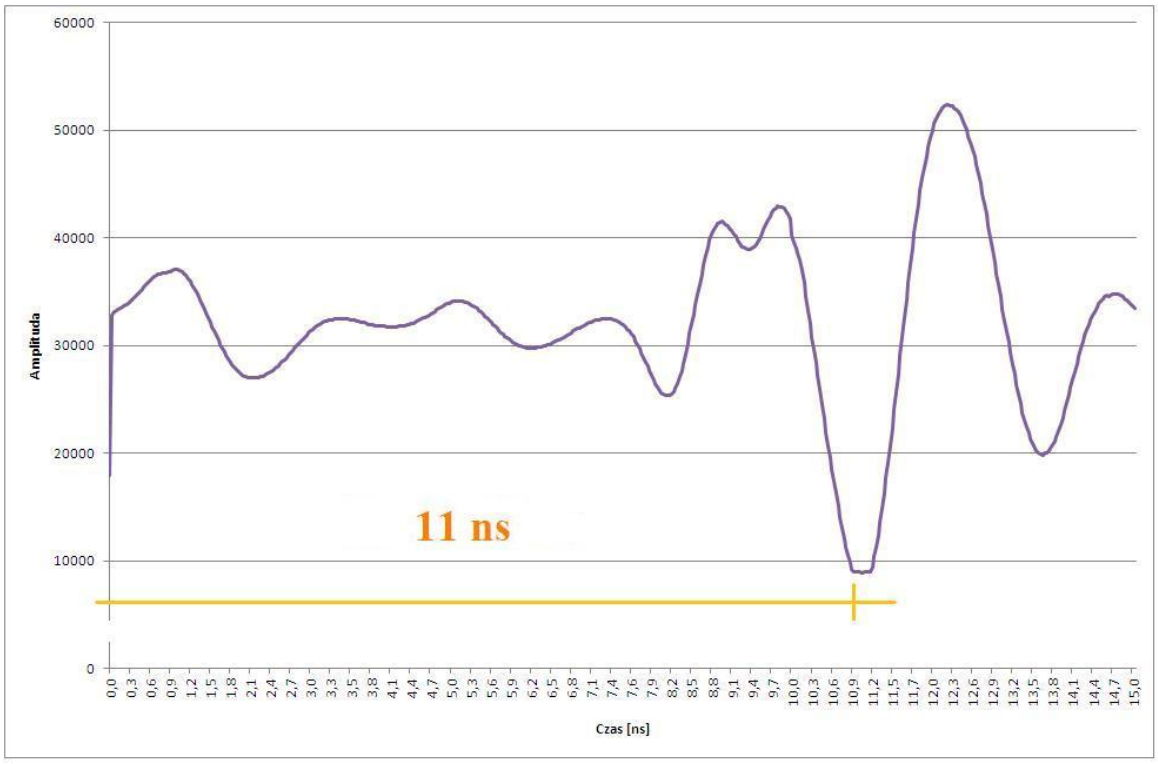
Rysunek 5.14 Test podnoszenia anteny nad blachą (rysunek górny bez background removal, rysunek górny z background removal)

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 ∅ 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,
- wzmocnienie 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 stacking[14] 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

Badania terenowe przeprowadzono na trzech wytypowanych odcinkach badawczych:

- odcinek „Płońsk" zlokalizowany przy obwodnicy Płońska, w pasie rozdziału miedzy jezdnią główną a jezdnią rozprowadzającą (Rysunek 6.1),
- odcinek „Ząbki" zlokalizowany w Ząbkach koło Warszawy na niezabudowanej działce przy ul. Piłsudskiego (Rysunek 6.2),
- odcinek „Soczewka" zlokalizowany na terenie IBDiM (Rysunek 6.3).

Na odcinkach tych wykonano badania radarowe w dwóch seriach: serii letniej (26.08.09) i serii jesiennej (25.11.09). Również w dwóch 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 zostaną dołączone w formie załącznika do sprawozdania końcowego. Wyniki badań geotechnicznych zamieszczono w Załączniku.

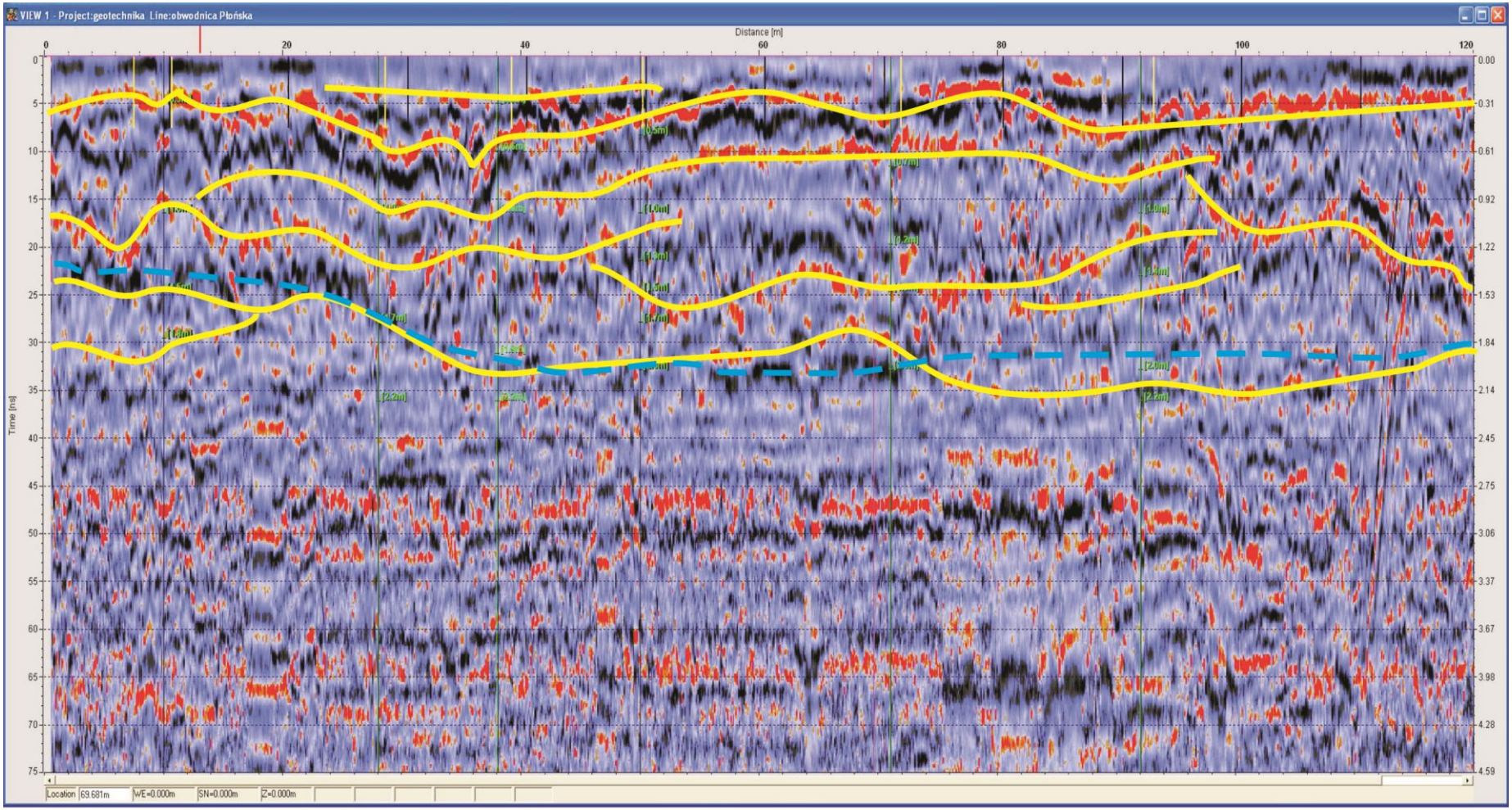
Przedstawioną poniżej interpretację danych radarowych należy traktować jako wstępną i wymagającą szczegółowej analizy zwłaszcza w miejscach, w których widoczne są znaczne różnice miedzy danymi radarowymi, a wynikami badań metodami klasycznymi. Pełna analiza uzyskanych danych zostanie przeprowadzona po wykonaniu kolejnych serii pomiarowych. Zgodnie z założeniami programu niniejszej pracy wykonane zostaną pomiary w dwóch seriach: zimowej i wiosennej.

[14] stacking – funkcja uśredniająca określoną przez operatora liczbę skanów

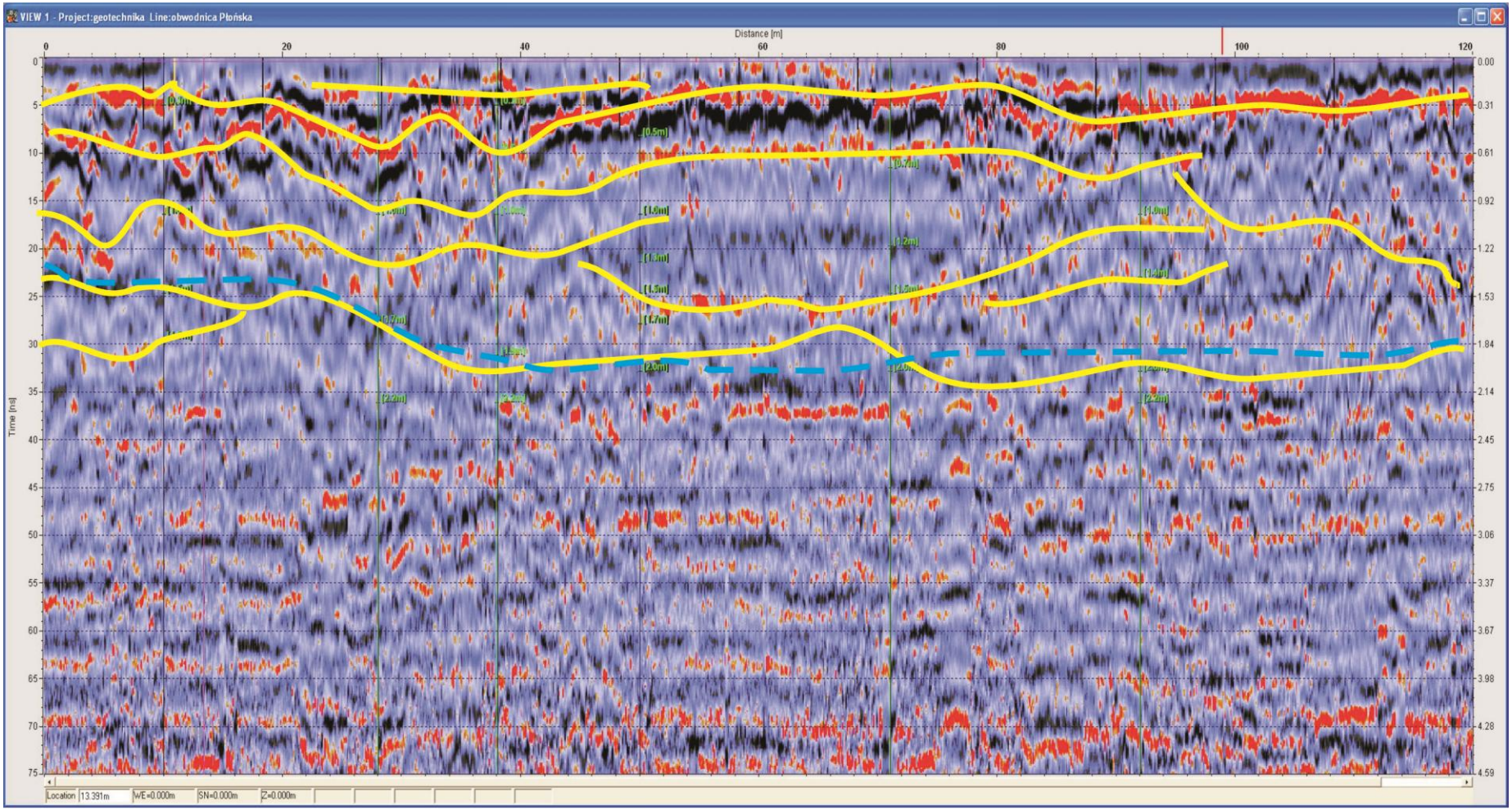
Rysunek 6.1 Lokalizacja odcinka Płońsk (zdjęcia z www.maps.google.pl)

Rysunek 6.2 Lokalizacja odcinka Ząbki (zdjęcie z www.zumi.pl)

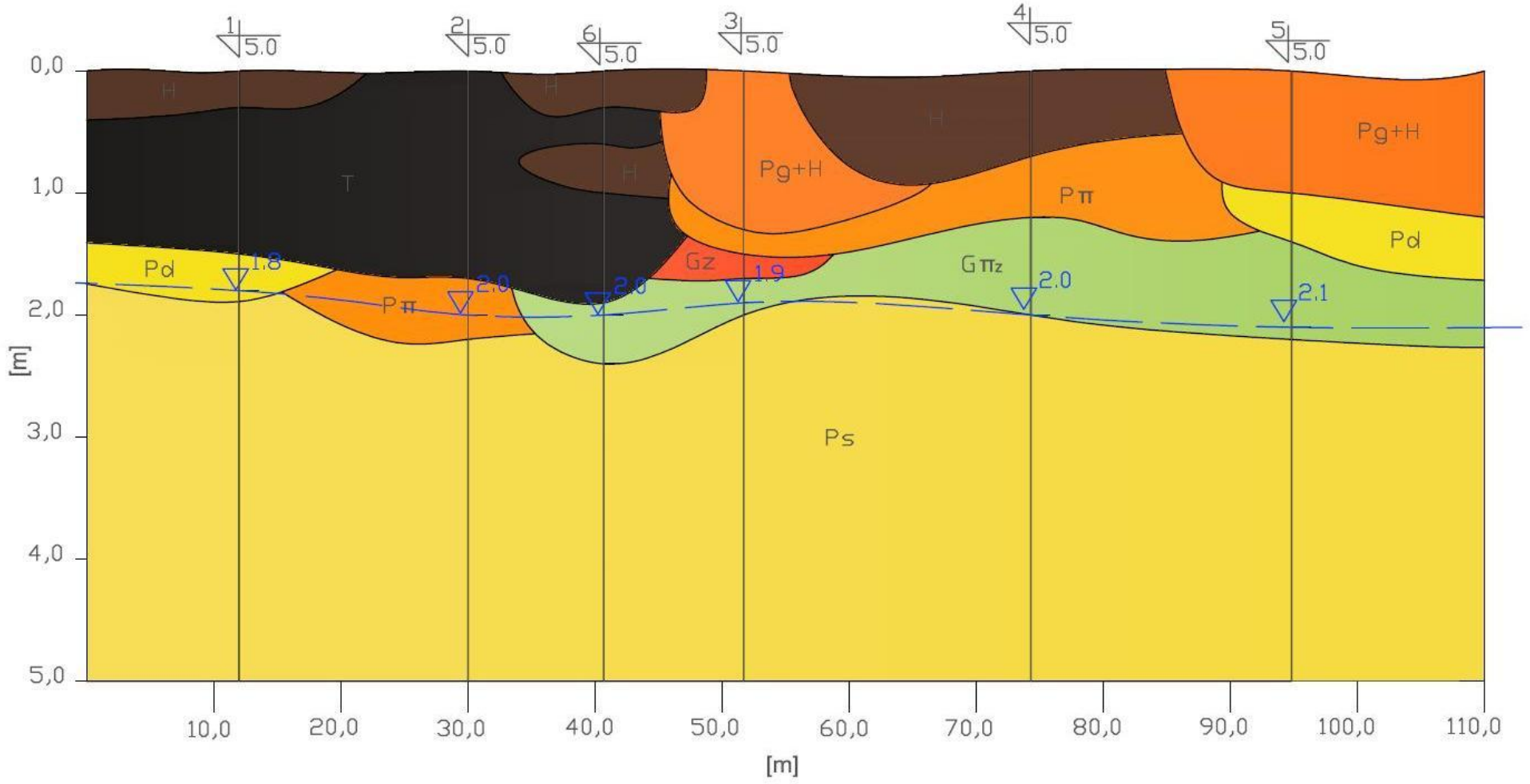
Rysunek 6.3 Lokalizacja odcinka Soczewka (zdjęcie z www.zumi.pl)



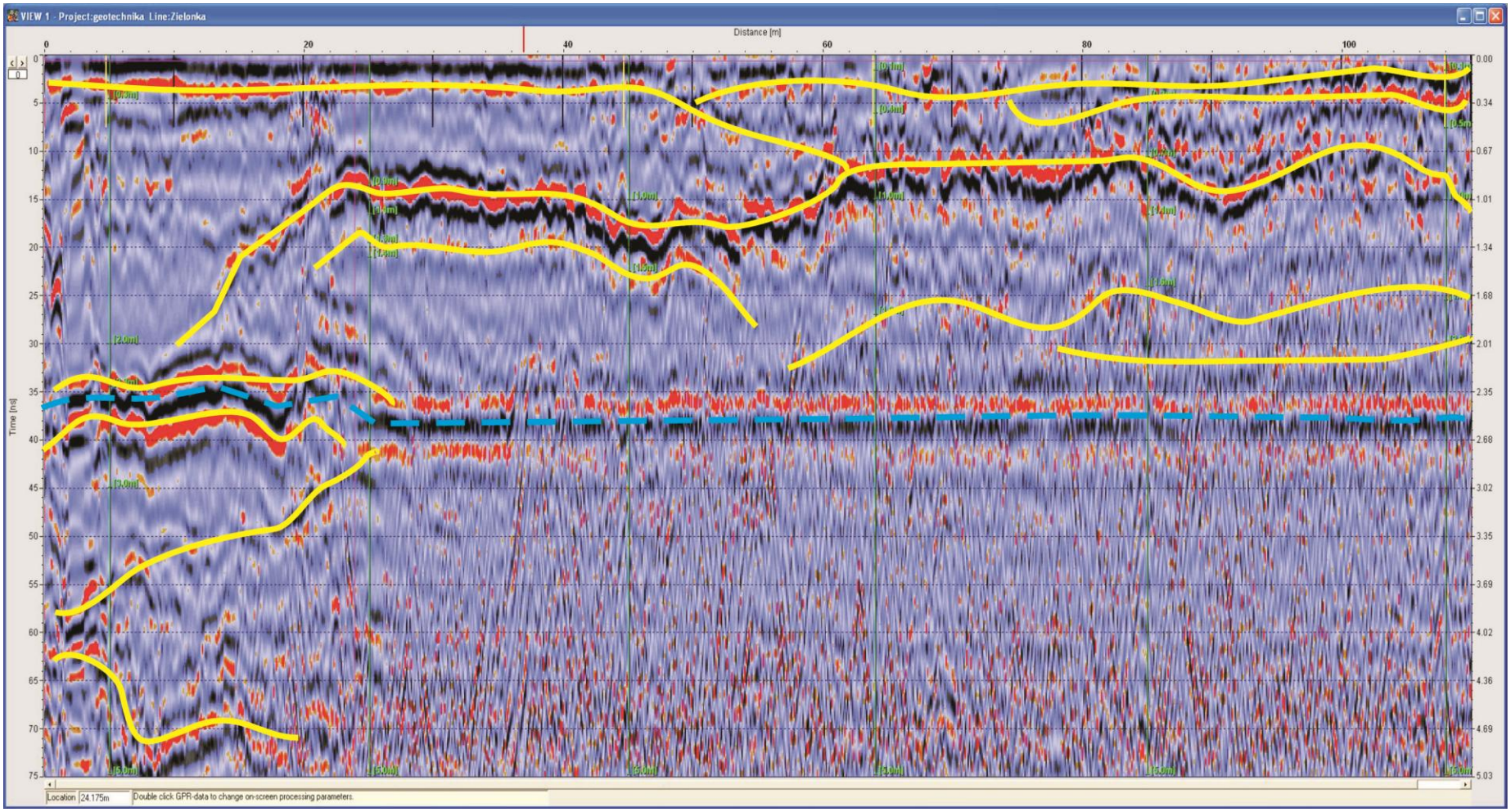
Rysunek 6.4 Pomiary radarowe na odcinku Płońsk – seria I



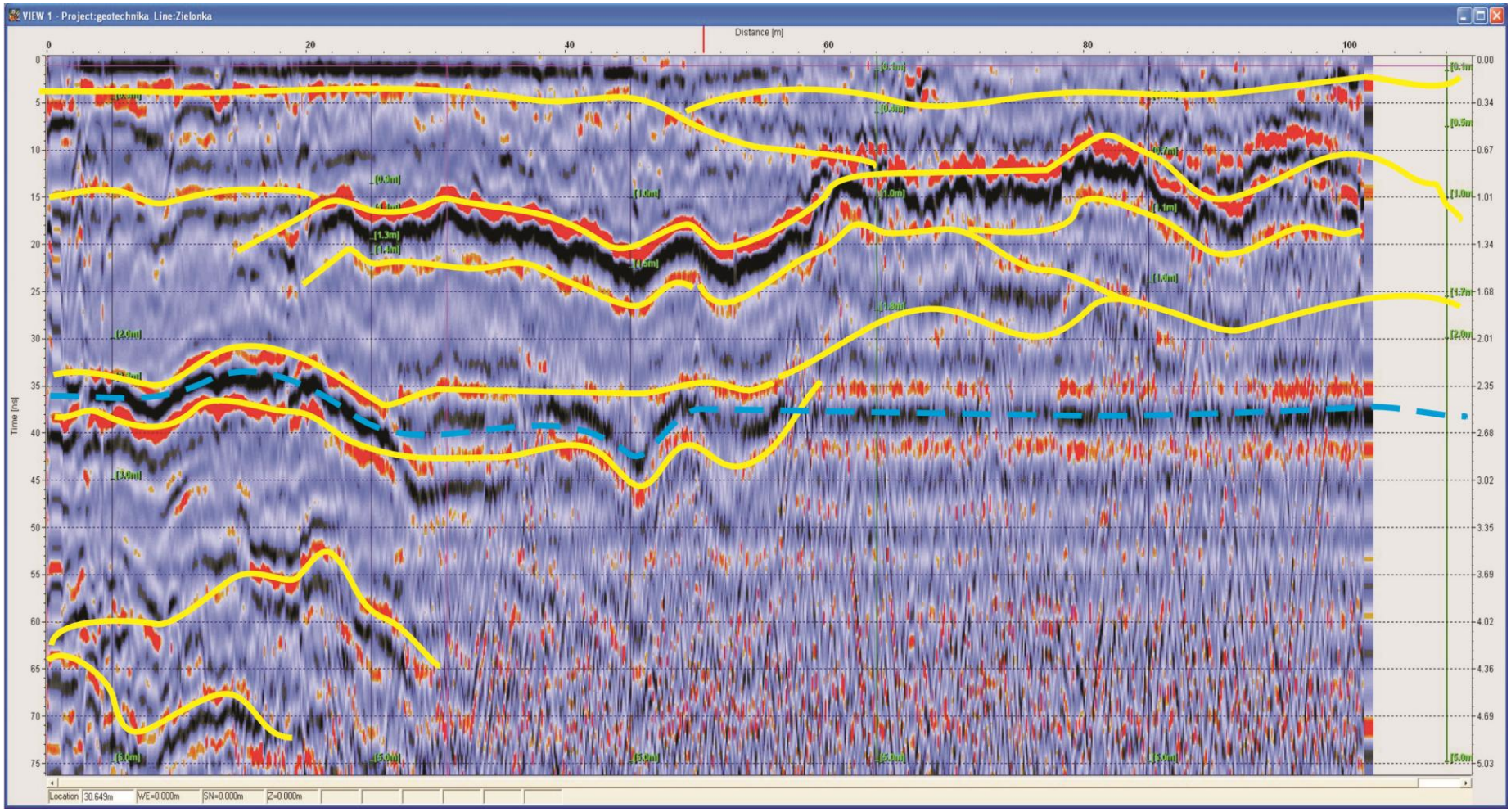
Rysunek 6.5 Pomiary radarowe na odcinku Płońsk – seria II



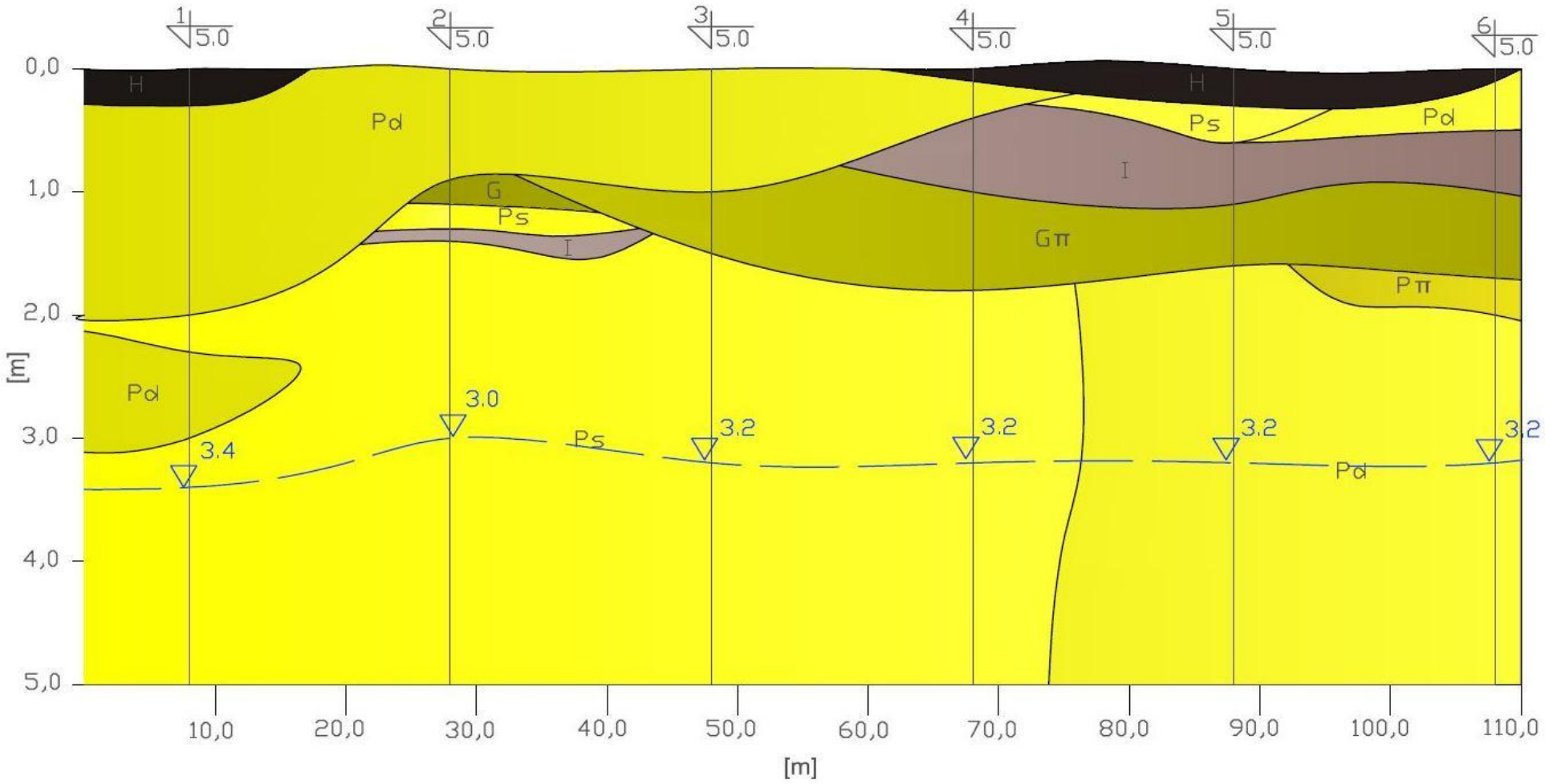
Rysunek 6.6 Profil geotechniczny opracowany na podstawie badań klasycznych - odcinek Płońsk



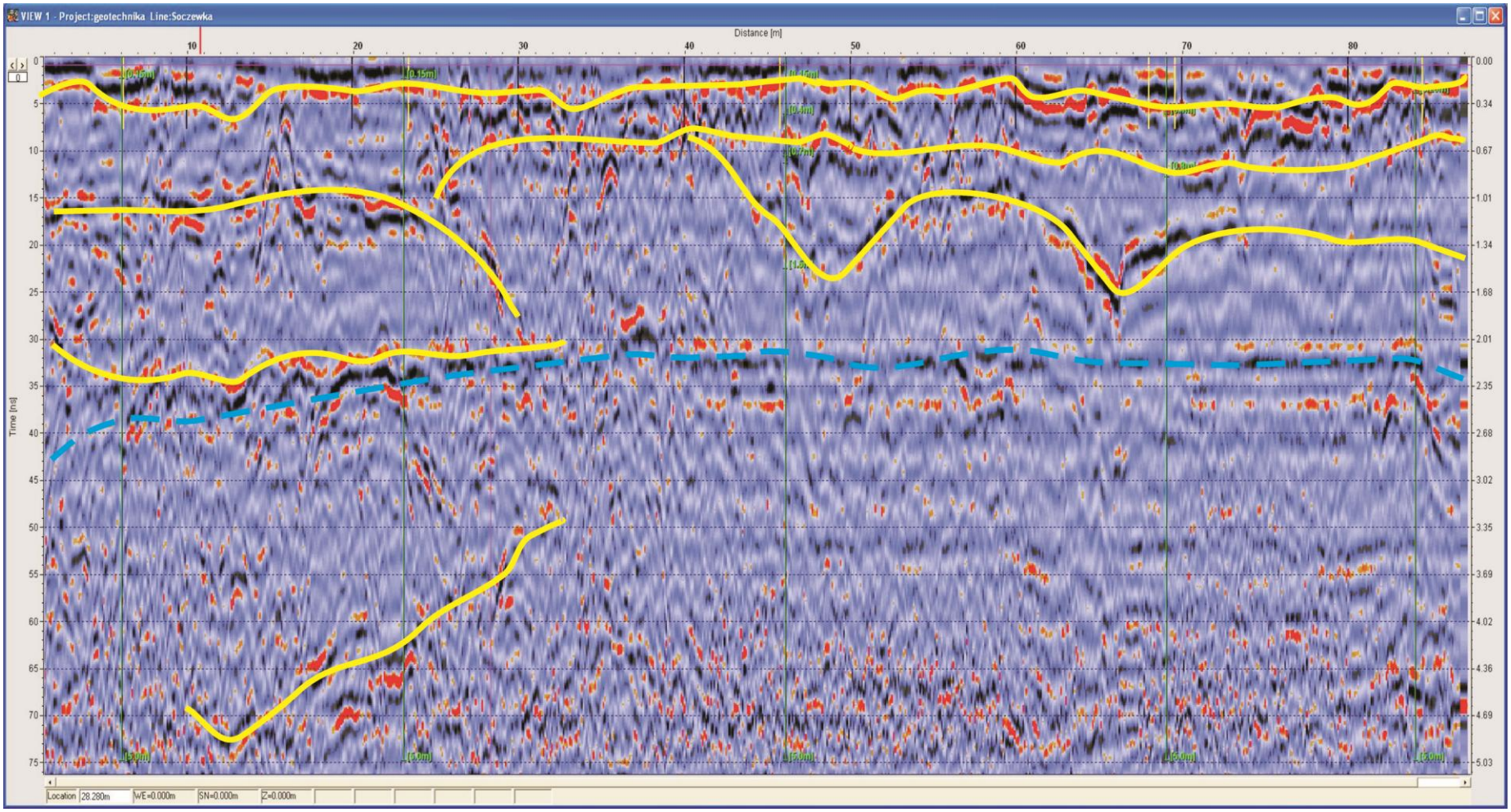
Rysunek 6.7 Pomiary radarowe na odcinku Ząbki -seria I



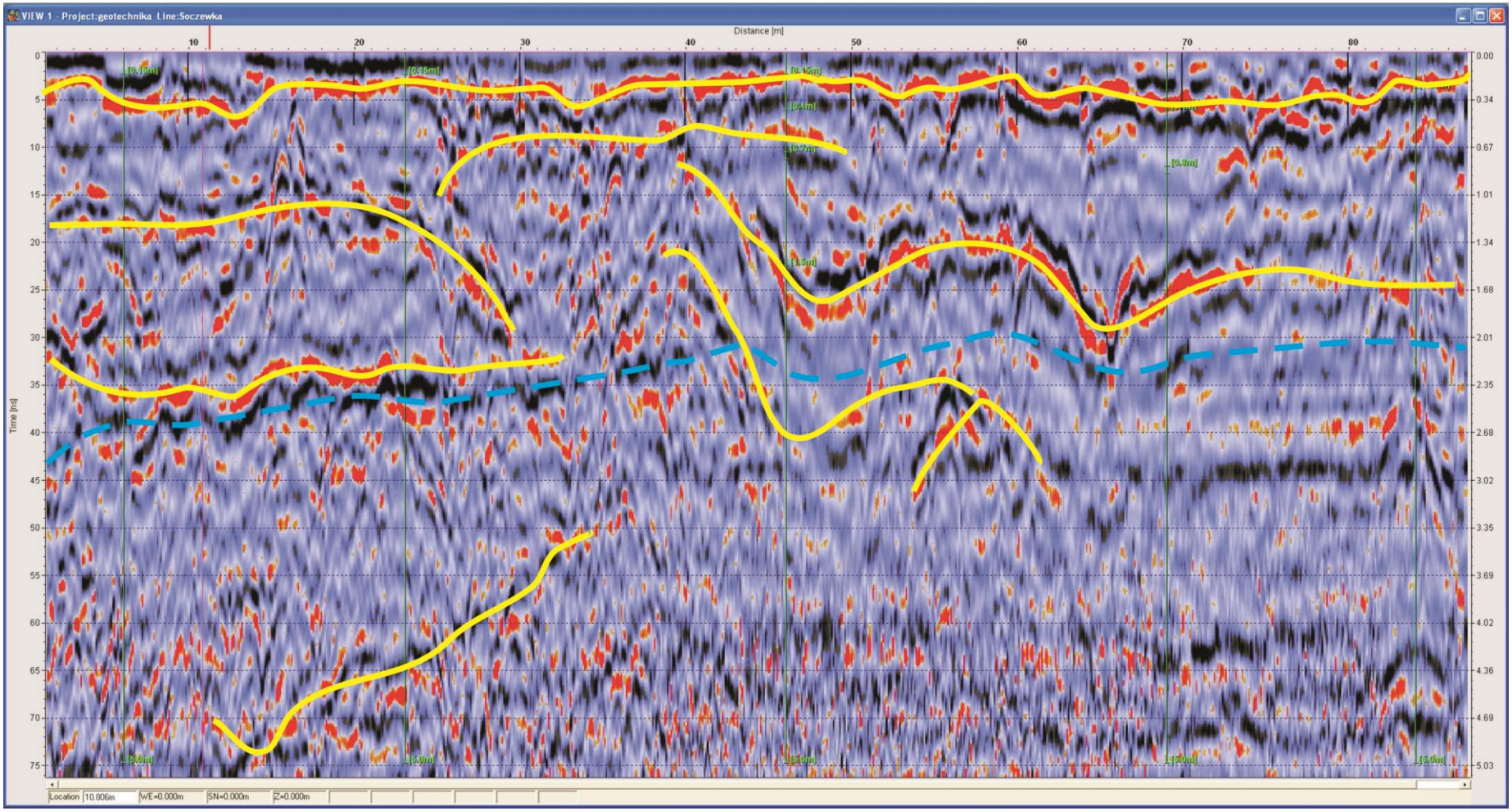
Rysunek 6.8 Pomiary radarowe na odcinku Ząbki -seria II



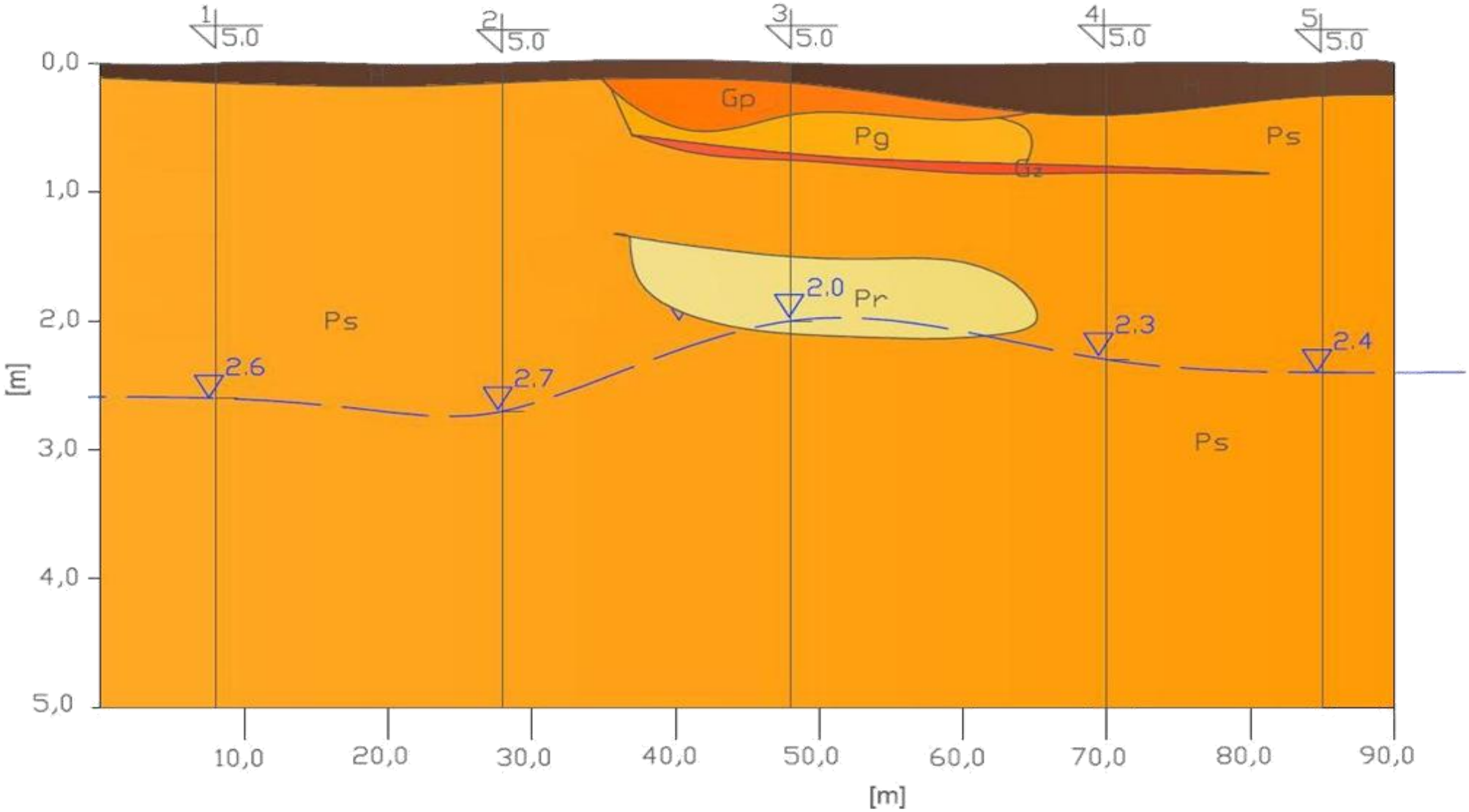
Rysunek 6.9 Profil geotechniczny opracowany na podstawie badań klasycznych - odcinek Ząbki



Rysunek 6.10 Pomiary radarowe na odcinku Soczewka – seria I



Rysunek 6.11 Pomiary radarowe na odcinku Soczewka – seria II



Rysunek 6.12 Profil geotechniczny opracowany na podstawie badań klasycznych - odcinek Soczewka

7 Podsumowanie

Wstępne wyniki badań wskazują, że pomiary radarowe istotnie mogą poprawić jakość oceny geotechnicznej podłoża. Oczywistym 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. Ograniczeniem metody jest z pewnością potrzeba dużego doświadczenia operatora w pomiarach i obróbce sygnałów radarowych.

Wstępna interpretacja wykazała, że przy pomocy metody radarowej rejestrowane są granice warstw gruntów, jednak identyfikacja ta często jest jedynie zbliżona do danych uzyskanych metodą klasyczną. Często też rejestrowane są zmiany i zaburzenia, które nie zostały wykryte przy pomocy badań klasycznych. Sytuacja ta wymaga szczegółowej analizy danych geotechnicznych, co zostanie wykonane w kolejnych etapach pracy.

W ramach Etapu I pracy przeprowadzono następujące prace:

- przegląd istniejących metod oceny podłoża gruntowego z wykorzystaniem techniki radarowej.
- opracowanie założeń do programu badań geotechnicznych i georadarowych
- laboratoryjna ocena zdolności metody radarowej pod kątem możliwości pomiaru podstawowych cech dielektrycznych różnych rodzajów gruntów.
- ocena wpływu zwiększonej wilgotności w gruntach na otrzymywany sygnał radarowy.
- analiza zdolności systemu pomiarowego oraz jego kalibracja na podstawie badań laboratoryjnych.
- badania na wytypowanych odcinkach badawczych o zróżnicowanym podłożu gruntowym i warunkach gruntowo-wodnych w okresie lato-jesień.

W następnym etapie pracy planuje się:

- badania na wytypowanych odcinkach badawczych o zróżnicowanym podłożu gruntowym i warunkach gruntowo-wodnych w okresie zima-wiosna.
- analiza porównawcza wyników badań podłoża gruntowego metodami klasycznymi i przy pomocy georadaru.
- opracowanie metodyki oceny geotechnicznej podłoża gruntowego z zastosowaniem techniki radarowej

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 Graund Penetrating Radar fundamentals // Appendix to Reprot 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] // Geophisics. - 1992. - Vol. Vol. 57. - p. pp. 495.

Forest R and Utsi V Non Destructive crack depth measurements with Graund 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] // Geophisics. - 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 sczepności 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 sczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni asfaltowej [Report]. - Gdańsk : Raport z badań I i II etapu badań, 2005/2006.

Judycki J Sczepność miedzy 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 Geophisics. - 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 ugieciomierza 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 Internationa Conference on Ground Penetrating Radar. - Waterloo : Waterloo Centre of Groundwater Research, 1994. - pp. vol 1 of 3: 145-152.

Pałys M, Zawadzki J and Skierczynski P Połączenie miedzy warstwami nawierzchni asfaltowej- metoda badania wymagania [Conference] // VIII Miedzynarodowa 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. - Viena : [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. 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.

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 Gesellschaf fur Zerstorungsfreie Prufung E.V, 2008.

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

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

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 polaczenia miedzywarstwowego nawierzchi ugieciomierzem 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 subsurafce radar pulses [Journal] // Geophisics. - 1994. - No. 8 : Vol. Vol. 59. - pp. pp. 1192-1200.

Von Becker Wpływ sczepności 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, Skierczynski P and Mechowski T Wpływ połączenia miedzy warstwami asfaltowymi na trwałość nawierzchni [Conference] // IX Miedzynarodowa 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.