

**ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA
GEORADAROWYCH FAL REFRAKCYJNYCH
DO LOKALIZACJI ZMIAN W BUDOWIE
WAŁÓW PRZECIWPOWODZIOWYCH**

**Analysis of possibility of using GPR refraction
for location changes in river embankments**

**Henryk MARCAK, Tomisław GOŁĘBIOWSKI
& Sylwia TOMECKA-SUCHOŃ**

*Akademia Górniczo-Hutnicza; Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
Zakład Geofizyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: marcak@agh.edu.pl, tomgoleb@agh.edu.pl, tomecka@agh.edu.pl*

Treść: Refrakcyjne fale georadarowe mogą być wykorzystywane do wyznaczenia parametrów charakteryzujących dwuwarstwową ośrodek geologiczny, w którym warstwa górna ma większą wartość stałej dielektrycznej niż warstwa dolna. Taka sytuacja może mieć miejsce w wałach przeciwpowodziowych, w których nad strefą zagęszczoną, a więc o mniejszym nasyceniu wodą, zalega warstwa silnie rozluźniona, charakteryzująca się dużym nasyceniem wodami opadowymi.

W pracy przedstawiono wyniki badań georadarowych przeprowadzonych na wałach przeciwpowodziowych w Krakowie i pokazano, że istnieją możliwości wyznaczenia stref skonsolidowanych i rozluźnionych w obwałowaniach na odcinkach pomiędzy geotechnicznymi otworami badawczymi.

W artykule zaprezentowano nowatorską technikę profilowania georadarowego przy zmiennym rozstawie anten oraz opisano sposób identyfikacji różnego typu fal georadarowych, ze szczególnym uwzględnieniem fal refrakcyjnych.

Słowa kluczowe: badania georadarowe, wały przeciwpowodziowe

Abstract: The GPR refracted waves can be used for evaluation of parameters, which characterize two-layer ground, where upper layer has higher value of dielectric constant than lower one. Such situation can take a place in a river embankments, where over the zone of consolidation with low water content is placed a loose zone with large amount of rain-water.

The results of GPR measurements carried out on the embankments in Krakow, give possibility for identification the consolidated and loose zones, between geotechnical bench-marks.

The paper presents new technology of GPR profiling with various offset of antennas and it describes the technique of identification the different kinds of GPR waves, with special treatment of refracted waves.

Key words: GPR surveys, river embankments

WSTĘP

O tym, jak ważna jest stabilność i odporność na przesiąkanie wałów przeciwpowodziowych, przekonaliśmy się podczas ostatnich powodzi. Wały przeciwpowodziowe w Małopolsce są konstrukcjami powstałymi w ubiegłym wieku, a zachowana fragmentaryczna dokumentacja dotycząca ich budowy i stanu technicznego wskazuje, że duże odcinki tych obiektów hydrotechnicznych wymagają gruntownej modernizacji. Z drugiej jednak strony nie ma na to wystarczających funduszy. W tej sytuacji prawidłowa identyfikacja odcinków, które powinny być naprawiane w pierwszej kolejności staje się problemem istotnym.

Obecnie standardową metodą badania stanu technicznego obwałowań rzecznych jest metoda sondowania dynamicznego, która daje punktowe informacje geotechniczne. W metodzie tej jakość zagęszczenia gruntu bada się przy użyciu sondy wbijanej poprzez wyliczenie tzw. oporu mechanicznego. Badanie struktury wałów za pomocą metody georadarowej mogłoby pomóc w identyfikacji stref najbardziej zniszczonych w obwałowaniach, a co najważniejsze metoda ta daje informację ciągłą o stanie technicznym wałów. Metoda georadarowa może być także przydatna do weryfikacji stanu zagęszczenia gruntu po remoncie obwałowania.

Wytrzymałość gruntu (określana poprzez kąt tarcia wewnętrznego i współczynnik kohezji) zależy od stopnia zagęszczenia gruntu I_D [-], który opisany jest zależnością

$$I_D = \frac{V_{\max} - V}{V_{\max} - V_{\min}} \quad (1)$$

gdzie:

- V_{\max} – maksymalna objętość, jaką przyjmuje jednostkowa masa gruntu [m^3],
- V_{\min} – minimalna objętość, jaką przyjmuje jednostkowa masa gruntu [m^3],
- V – objętość, jaką przyjmuje jednostkowa masa badanego gruntu [m^3].

Na podstawie stopnia zagęszczenia I_D grunty można podzielić na kategorie (Wilun 2000):

- luźny ($I_D \leq 0.33$),
- średniozagęszczony ($0.33 \leq I_D \leq 0.67$),
- zagęszczony ($I_D \geq 0.67$).

Parametrem, który jest skorelowany z zagęszczeniem, jest wilgotność gruntu. Jest to stosunek objętości zajętej przez wodę do pełnej objętości próbki gruntu.

Dla piasków drobnoziarnistych i pylastych przyjmuje się następujący podział (Wilun 2000):

- na podstawie wilgotności:
 - zagęszczony – 14%,
 - średniozagęszczony – 16%,
 - luźny – 19%;
- na podstawie gęstości:
 - zagęszczony – 1.85 t/m^3 ,
 - średniozagęszczony – 1.75 t/m^3 ,
 - luźny – 1.70 t/m^3 .

Rozluźnione (zniszczone) części wałów przeciwpowodziowych charakteryzować się będą większą porowatością w stosunku do części lepiej skonsolidowanych (niezniszczonych). Większa porowatość spowoduje, że w uszkodzonych częściach wałów następować będzie gromadzenie się wód opadowych, co wpłynie wyraźnie na zmianę w ośrodku gruntowym parametrów elektromagnetycznych. Powstanie silnych kontrastów elektromagnetycznych pomiędzy zniszczoną a skonsolidowaną częścią wału daje duże szanse na wykrycie granic pomiędzy tymi strefami za pomocą metody georadarowej. Obecność wody w gruncie bardzo silnie wpływa na prędkość propagacji fali georadarowej oraz na parametry elektromagnetyczne tego ośrodka, tj. względną stałą dielektryczną ϵ_r [-] i przewodność elektryczną σ [mS/m]. Podstawowe zależności pomiędzy parametrami elektromagnetycznymi gruntu oraz porowatością i ilością wody w ośrodku przedstawiono na figurze 1.

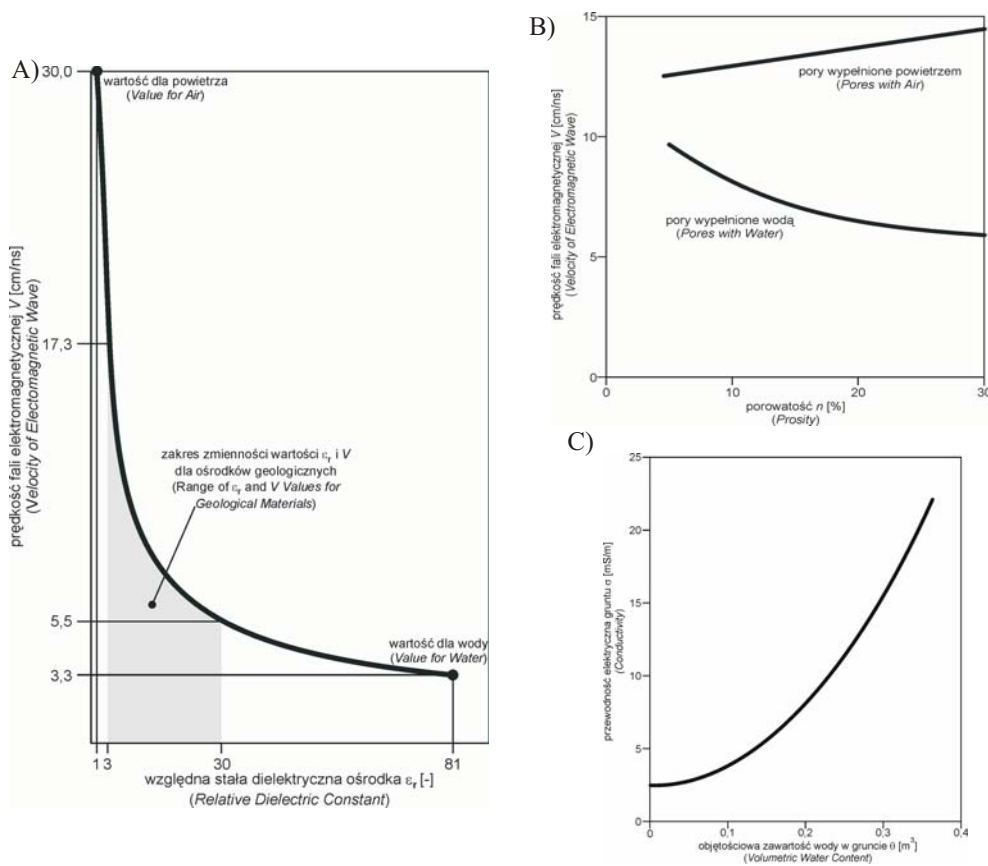


Fig. 1. Zależności pomiędzy: A) względną stałą dielektryczną gruntów i prędkością fali georadarowej; B) porowatością i prędkością fali georadarowej; C) zawadnieniem ośrodka i przewodnością elektryczną (Reynolds 1999)

Fig. 1. Relationships between: A) relative dielectric constant and GPR wave velocity; B) porosity and GPR wave velocity; C) water saturation and electrical conductivity (Reynolds 1999)

Z relacji zobrazowanych na figurze 1 można wyciągnąć następujące wnioski przydatne w analizach przeprowadzonych w dalszej części artykułu:

- wzrost porowatości ośrodka z porami wypełnionymi powietrzem powoduje spadek wartości względnej stałej dielektrycznej ϵ_r gruntu oraz wzrost prędkości fali georadarowej (Fig. 1A, B);
- wzrost porowatości ośrodka z porami wypełnionymi wodą powoduje wzrost wartości względnej stałej dielektrycznej ϵ_r gruntu oraz spadek prędkości fali georadarowej (Fig. 1A, B);
- wzrost zawartości wody w gruncie powoduje wzrost przewodności elektrycznej σ ośrodka oraz wzrost tłumienia fal elektromagnetycznej (Fig. 1C).

Istnieje wiele opracowań dotyczących związku pomiędzy wilgotnością a własnościami dielektrycznymi ośrodków gruntowych, m.in. Dobson *et al.* (1985), Roth *et al.* (1990), Friedman (1998), Jones & Friedman (2000). W opracowaniach tych zaproponowano tzw. **Model Zespolonego Indeksu Refrakcyjnego** wiążący wartość stałej dielektrycznej gruntu ϵ_{grunt} z własnościami charakteryzującymi składniki gruntu i ich objętościowym udziałem w strukturze gruntu (Jones & Friedman 2000)

$$\epsilon_{grunt} = \sqrt[\alpha]{\theta \epsilon_w^\alpha + (1-n) \epsilon_s^\alpha + (n-\theta) \epsilon_p^\alpha} \quad (2)$$

gdzie:

- n – porowatość gruntu [%],
- $\epsilon_w, \epsilon_s, \epsilon_p$ – względna stała dielektryczna wody, szkieletu skalnego i powietrza [-],
- θ – zawartość wody w jednostce objętości [%],
- α – parametr zależny od kierunku pola elektrycznego w stosunku do uwarstwienia ośrodka gruntowego ($\alpha = 1$, jeżeli pole elektryczne jest równoległe do uwarstwienia, $\alpha = -1$ dla pola elektrycznego prostopadłego do uwarstwienia, $\alpha = 1/2$ dla ośrodków izotropowych) [-].

Dla celów badań georadarowych prowadzonych na wałach wykonano obliczenia testowe zależności pomiędzy wilgotnością gruntu a wartością stałej dielektrycznej i prędkością fali georadarowej (Fig. 2). Wartości względnej stałej dielektrycznej ϵ_r wyznaczono z Zespolonego Indeksu Refrakcyjnego, przyjmując do obliczeń wartość średnią $n = 30\%$ (ponieważ dla gruntu zbudowanego z ziaren kulistych o jednakowych średnicach porowatość zmienia się w zakresie od 25.8% do 47.6%).

Dla wyznaczenia prędkości fali elektromagnetycznej v [m/ns] z wartości ϵ_r skorzystano ze wzoru

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

gdzie c – prędkość światła [m/ns].

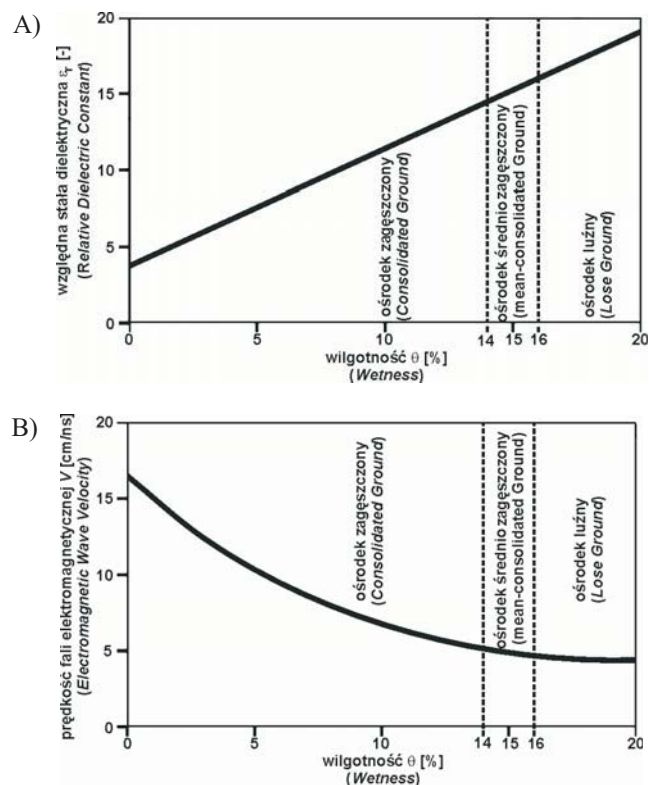


Fig. 2. Zależności pomiędzy wilgotnością ośrodka a względną stałą dielektryczną (A) oraz prędkością fali georadarowej (B)

Fig. 2. Relationships between ground wetness and relative dielectric constant (A) and electromagnetic wave velocity (B)

Wyniki obliczeń (Fig. 2) wskazują na istotny wpływ wilgotności na zmianę własności dielektrycznych ośrodka. Wzrost wilgotności od 0 do 20% powoduje 4-krotny wzrost ϵ_r . Jak już wspomniano, zmiany wilgotności gruntu mogą być skorelowane ze zmianami zagęszczenia gruntu w wale przeciwpowodziowym.

BUDOWA I PARAMETRY WAŁÓW PRZECIWPOWODZIOWYCH

Badania georadarowe przeprowadzono w trzech miejscach w Krakowie opisanych dokładniej w dalszej części artykułu i nazwanych: „Rudawa”, „Bielany” oraz „Zwierzyniec”. Poniżej zamieszczono krótką charakterystykę wałów przeciwpowodziowych w miejscach, w których przeprowadzono badania georadarowe.

Wały przeciwpowodziowe w Polsce to głównie budowle ziemne o różnym składzie gruntów. Buduje się je warstwami, każda warstwa jest zagęszczana mechanicznie walcem przed nałożeniem następnej. Do najlepszych materiałów zalicza się piaski gliniaste i pyły

piaszczyste, natomiast nie stosuje się materiałów o zawartości frakcji ilastej większej niż 30% (Fig. 3A). Wały w razie potrzeby, można wzmacniać, umieszczając w ich wnętrzu rdzeń z materiału słabo przepuszczającego wodę, np. il lub bentonit.

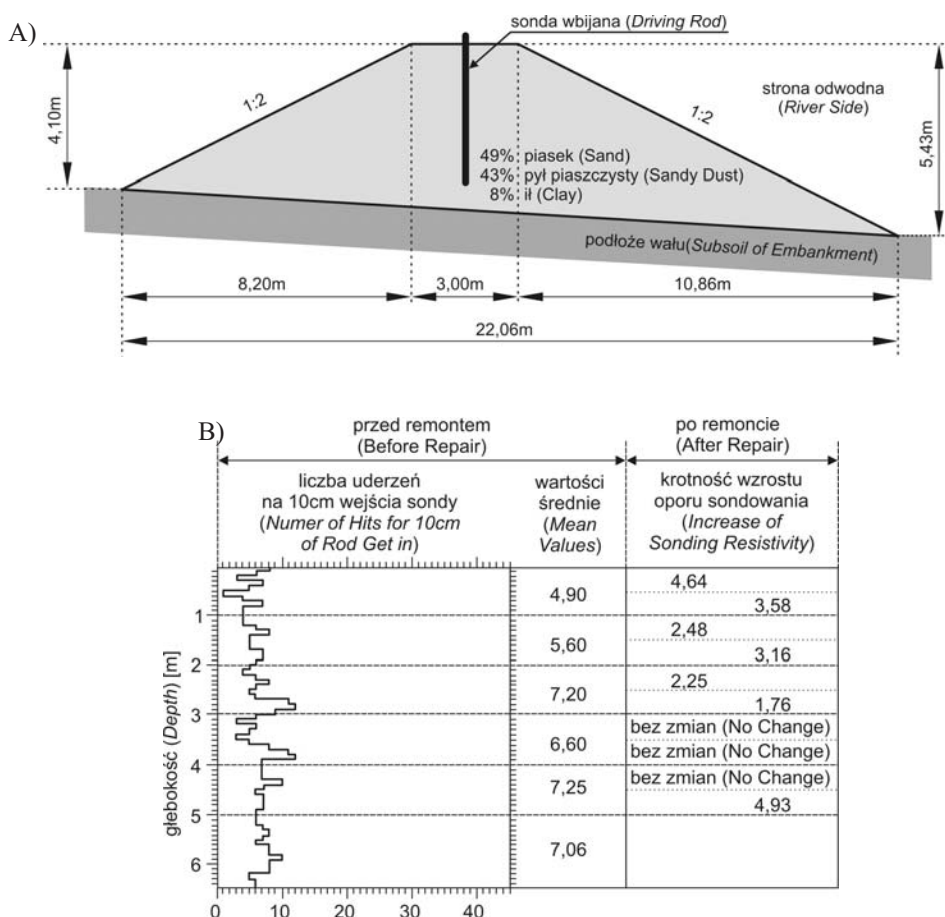


Fig. 3. Schematyczny przekrój wału wiślanego w rejonie badań na Bielanych (A); wyniki sondowania dynamicznego przed i po remoncie wału na Bielanych (B)

Fig. 3. Schematical crossection of embankment in the measurement site – Bielany, Kraków (A); the results of dynamic sonding before and after repair of embankment (Bielany, Kraków) (B)

Remont wałów przeciwpowodziowych polega na mechanicznym dogęszczaniu materiału budującego wał. W rejonie pomiarów georadarowych na Bielanych przeprowadzono sondowanie dynamiczne przed remontem i po remoncie tego fragmentu obwałowania (Fig. 3B). Należy zwrócić uwagę na ciągły spadek wartości oporu gruntu występujący po remoncie do głębokości ok. 1.5 m, który zgodnie z tym, co napisano we wstępie, można traktować jako warstwę rozluźnioną o zwiększonej zawartości wody.

REFRAKCYJNE FALE GEORADAROWE

Podstawowym sposobem prowadzenia pomiarów georadarowych jest profilowanie i rejestracja fal odbitych od granic geologicznych i obiektów podziemnych. Na figurze 4 pokazano różne typy fal powstających w czasie badań georadarowych.

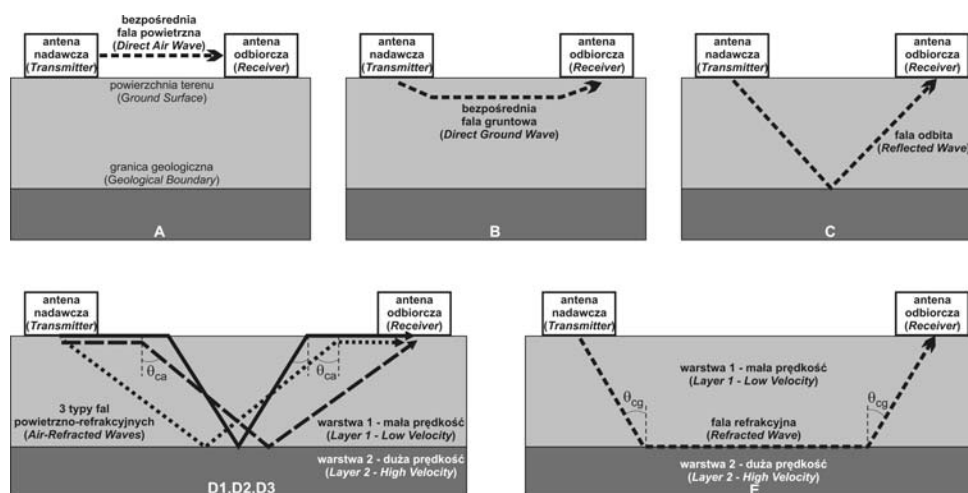


Fig. 4. Różne typy fal georadarowych: θ_{ca} , θ_{cg} – kąty krytyczne dla fali powietrzno-refrakcyjnej i fali refrakcyjnej (pozostałe objaśnienia w tekście)

Fig. 4. The different kinds of GPR wave: θ_{ca} , θ_{cg} – critical angles for air-refracted and refracted waves (other explanations in text)

W czasie standardowego profilowania georadarowego odległość między anteną nadawczą a odbiorczą jest stała i relatywnie mała (np. dla anten 200 MHz – 0.6 m), a na echogramie pomiarowym rejestrowane są tylko: bezpośrednia fala powietrzna i gruntowa oraz fala odbita (Fig. 4A, B, C). W przypadku prowadzenia niestandardowego profilowania ze zmiennym rozstawem anten (zwłaszcza dla dużych rozstawów) pojawiają się dodatkowe typy fal, jak pokazano na figurze 4 (D1, D2, D3, E).

Podobnie jak w przypadku badań sejsmicznych, istnieje możliwość wykorzystania opisanych rodzajów fal georadarowych, w szczególności fal refrakcyjnych, do rozpoznania własności geotechnicznych gruntów. Jest stosunkowo dużo publikacji dotyczących wykorzystania tego typu fal (Annan & Davis 1976, Fisher *et al.* 1992, Arcone *et al.* 1998, Bohidar & Hermance 2002, Hubbard *et al.* 2003). Badanie za pomocą georadarowych fal refrakcyjnych dotyczy sytuacji, w której nad warstwą o małej wartości stałej dielektrycznej znajduje się warstwa o dużej wartości tego współczynnika. W płytkich badaniach inżynierskich z taką sytuacją mamy do czynienia najczęściej, gdy nad ośrodkiem suchym występuje warstwa o zwiększonej zawartości wody.

Na granicy pomiędzy ośrodkiem suchym i nadległym ośrodkiem silnie zawodnionym może zostać spełniony warunek krytycznego załamania promienia falowego. Jedną z powstających fal refrakcyjnych jest tzw. fala powietrzno-refrakcyjna na granicy pomiędzy

pierwszą warstwą a powietrzem, która jest specyficzną falą powstającą jedynie w badaniach georadarowych. Dla powstania tej fali wymagane jest jedynie istnienie poziomego odbijającego i odpowiednio dużej odległości pomiędzy antenami (Fig. 4D). Czasy rejestracji tej fali t_a w odległościach większych od tzw. odległości krytycznej x_{kr-a} (odległość, przy której pojawia się na echogramie fala powietrzno-refrakcyjna) wynoszą:

$$t_a = \frac{x}{V_0} + \frac{2d \cos(\theta_{ca})}{V_1} \quad (4)$$

$$\theta_{ca} = \arcsin\left(\frac{V_1}{V_0}\right) \quad (5)$$

gdzie:

V_1, V_0 – prędkości fali elektromagnetycznej w pierwszej warstwie i w powietrzu,
 d – odległość do granicy odbijającej (refrakcyjnej).

Kolejną falą jest właściwa fala refrakcyjna (nazywana czasami falą gruntowo-refrakcyjną), która jest wynikiem ślizgania się fali georadarowej na granicy refrakcyjnej. Czasy rejestracji tej fali t_g przy odległościach większych od odległości krytycznej x_{kr-g} i przy spełnieniu kąta krytycznego θ_{cg} wynoszą:

$$t_g = \frac{x}{V_2} + \frac{2d \cos(\theta_{cg})}{V_1} \quad (6)$$

$$\theta_{cg} = \arcsin\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (7)$$

gdzie V_2 – prędkość fali elektromagnetycznej w drugiej warstwie.

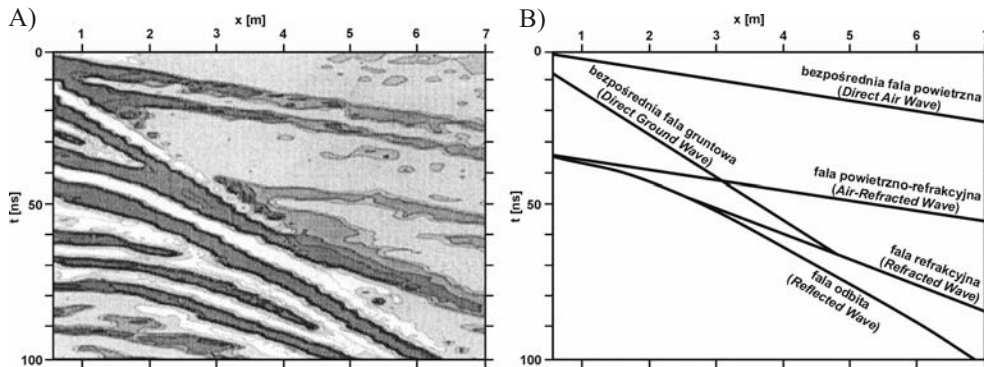


Fig. 5. Wyniki badań metodą wspólnego punktu odbicia (CMP) w ośrodku dwuwarstwowym (A); identyfikacja różnych typów fal georadarowych z echogramu pomiarowego (B) (Bohidar & Hermance 2002)

Fig. 5. Results of CMP profiling for two-layer ground (A); identification of all kinds of GPR waves from measurement echogram (B) (Bohidar & Hermance 2002)

Na figurze 5 pokazano przykładowy echogram pomiarowy z profilowania prędkości metodą wspólnego punktu odbicia CMP (*Common Mid Point*) oraz wynik interpretacji różnych typów fal georadarowych.

BADANIA TERENOWE

Opis miejsc badań

Badania georadarowe przeprowadzono w trzech miejscach w Krakowie na obwałowaniach rzecznych (Fig. 6).

- A) Miejsce badań nazwane „Bielany” – lewobrzeżny wał przeciwpowodziowy rzeki Wisły w dzielnicy Krakowa – Bielany; pomiary przeprowadzono w listopadzie 2004 r. po okresie intensywnych opadów atmosferycznych, które spowodowały nasycenie słodką wodą opadową rozluźnionych (uszkodzonych) stref wału przeciwpowodziowego; profilowanie przeprowadzono na osi korony wału; profil pomiarowy zaprojektowano tak, aby przecinał część silnie zniszczoną (rozluźnioną) wału i część zagęszczoną (wyremontowaną); długość profilu – 100 m.
- B) Miejsce badań nazwane „Rudawa” – wał przeciwpowodziowy rzeki Rudawy (dopływ Wisły) w krakowskiej dzielnicy Zwierzyniec; pomiary polowe przeprowadzono w lutym 2004 r. w czasie odwilży, gdy wierzchnia warstwa gruntu była silnie nasycona wodą z topniejącego śniegu; teren badań był silnie uzbrojony (kable, dreny itp.); profilowanie georadarowe przeprowadzono na wypłaszczeniu pomiędzy korytem rzeki a stroną odwodną wału; pomiary przeprowadzono testowo w celu przygotowania technologii pomiarowo-interpretacyjnej dla pomiarów właściwych przeprowadzonych na Bielanych; długość profilu – 50 m.
- C) Miejsce badań nazwane „Zwierzyniec” – profilowanie georadarowe przeprowadzono w okresie relatywnie suchym (wrzesień 2004 r.) w celu określenia granicy pomiędzy dwoma częściami wału o różnej konsolidacji, przy małej ilości wody w ośrodku; długość profilu – 100 m.

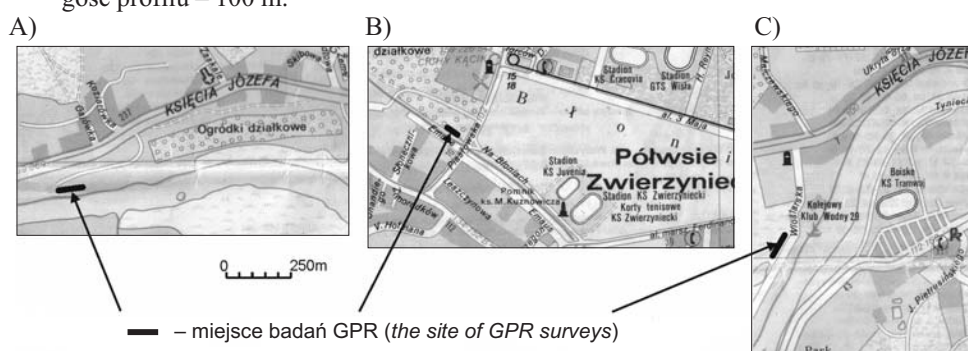


Fig. 6. Miejsca badań georadarowych na obwałowaniach rzecznych w Krakowie: A) „Bielany”; B) „Rudawa”; C) „Zwierzyniec”

Fig. 6. The sites of GPR surveys on river embankments in Krakow: A) “Bielany”; B) “Rudawa”; C) “Zwierzyniec”

Opis aparatury pomiarowej i techniki badań

Badania terenowe przeprowadzono przy użyciu georadaru RAMAC/GPR, szwedzkiej firmy MALA GeoScience. Nadajnik i odbiornik w tym georadarze zamontowane odpowiednio na antenie nadawczej i odbiorczej połączone są z jednostką centralną światłowodami. RAMAC jest georadarem impulsowym, a pomiar polega na wysłaniu przez antenę nadawczą impulsu sondującego w głąb ośrodka geologicznego i rejestracji przez antenę odbiorczą sygnałów odbitych od granic geologicznych i obiektów podziemnych (Fig. 4). Georadar sterowany jest z laptopa, a wyniki pomiarów zapisywane są w komputerze w formacie cyfrowym. Georadar pozwala na rejestrację do 200 tras na sekundę, a minimalna odległość między trasami może wynosić 1 mm. Georadar RAMAC współpracuje z antenami ekranowanymi i nieekranowanymi w zakresie częstotliwości od 12.5 MHz–1.6 GHz. Szeroki zakres częstotliwościowy metody pozwala na głębsze badania geologiczne oraz na płytsze badania inżynierskie z dużą rozdzielczością.

Pomiary przeprowadzono w trzech wcześniej opisanych miejscach, prowadząc profilowania georadarowe w każdym z miejsc wzdłuż tego samego profilu i zmieniając rozstaw anten w przedziale od 0.5 m do 2.0 m co 0.5 m. Nie było sensu stosować większych rozstawów, ponieważ z badań przeprowadzonych sondą geotechniczną wynikało, że granica refrakcyjna znajdowała się na głębokości pomiędzy 0.5 m a 1.5 m (Fig. 3B). Pomiary przeprowadzono z użyciem anten 200 MHz, przyjmując odległość między trasami 5 cm oraz 64-krotne składanie pionowe, co wpłynęło na polepszenie stosunku sygnał – szum.

PRZETWARZANIE ECHOGRAMÓW POMIAROWYCH I ICH INTERPRETACJA

Uzyskane w czasie badań terenowych echogramy poddano następującym procedurom przetwarzania (z użyciem programu Reflex-W v.3.5):

- orientacja profili,
- korekcja sygnałów przesterowanych,
- zmiana kroku próbkowania,
- korekcja faz,
- wyznaczenie czasu zerowego,
- usunięcie dudnień i przesunięć stałoprądowych,
- usunięcie rewerberacji,
- filtracja częstotliwościowa,
- wzmocnienie,
- interpolacja tras.

W celu identyfikacji różnych typów fal na echogramach analizowano tę samą fazę dla danej grupy refleksów dla różnych rozstawów. W celu szybkiej i dokładnej identyfikacji fal napisano program, w którym poprzez modelowanie ośrodka dwuwarstwowego można wyznaczyć wszystkie powstające w nim fale. Program pozwala również na obliczenie procentowej zawartości wody w warstwie rozluźnionej na podstawie wzoru Toppa. Parametrami zmiennymi w modelowaniu są prędkości warstwowe i miąższość pierwszej warstwy oraz rozstawy anten. Wynikiem modelowania dla wybranych punktów na profilu są hodografy, za pomocą których można wyznaczyć typ fali georadarowej powstającej w gruncie.

Dla określenia różnych typów fal przyjęto na hodografach następujące skróty:

- BFP – bezpośrednia fala powietrzna,
- FPR – fala powietrzno-refrakcyjna,
- BFG – bezpośrednia fala gruntowa,
- FGR – fala gruntowo-refrakcyjna,
- FO – fala odbita.

Punktami zaznaczono wyniki uzyskane z pomiarów terenowych.

Hodografy wraz z interpretacją typów fal dla badań georadarowych przeprowadzonych nad Rudawą przedstawiono na figurze 7. Odpowiednie echogramy pomiarowe dla tych badań pokazano na figurze 8.

Interpretacja pomiarów georadarowych znad Rudawy, oparta na opisanym modelowaniu i analizie echogramów, pokazuje, że:

- na echogramach (Fig. 8) można zidentyfikować fale typu (Fig. 7): BFP, BFG, FO, FGR;
- na echogramach zauważa się dużą zmienność w rejestrowanej fali BFG, co wiąże się z dużą zmiennością wilgotności w przypowierzchniowej części gruntu;
- odległość krytyczna x_{kr-g} wynosi ok. 1.5 m;
- granica pomiędzy strefami o różnym nasyceniu wodą, różnej konsolidacji i zmrozeniu gruntu jest nieciągła i łatwa do zinterpretowania (na czasach 25–45 ns) dla rozstawów 0.5–2.0 m (Fig. 8); średnia głębokość do horyzontu refrakcyjnego wynosi ok. 1.2 m;
- średnia prędkość w warstwie luźniej i zawodnionej ok. 8 cm/ns, a w warstwie skonsolidowanej i zmrożonej ok. 15 cm/ns;
- jak wspomniano wcześniej, teren badań był silnie uzbrojony, co wpłynęło na wzrost zakłóceń przy większych rozstawach anten i utrudnienia w interpretacji np. pomiędzy 26 m a 34 m na profilu (Fig. 8).

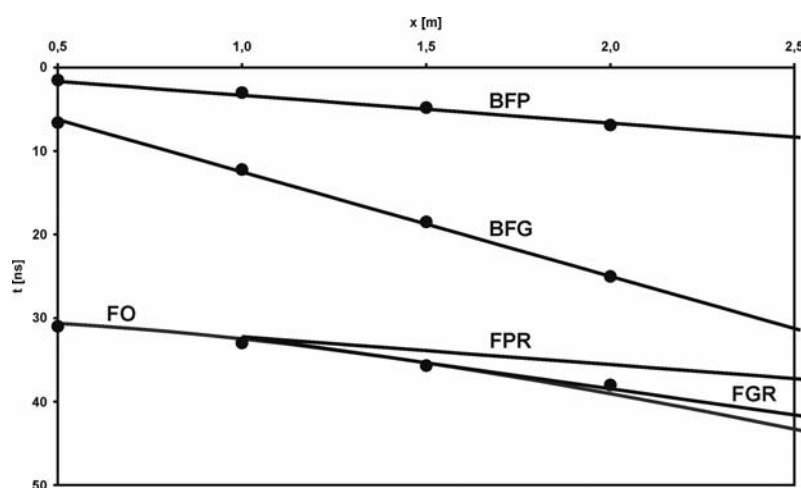


Fig. 7. Hodografy dla badań georadarowych nad Rudawą; analiza dla punktu na 10. metrze profilu

Fig. 7. Hodographs for GPR surveys in “Rudawa” site; analysis for point at 10th meter of profile

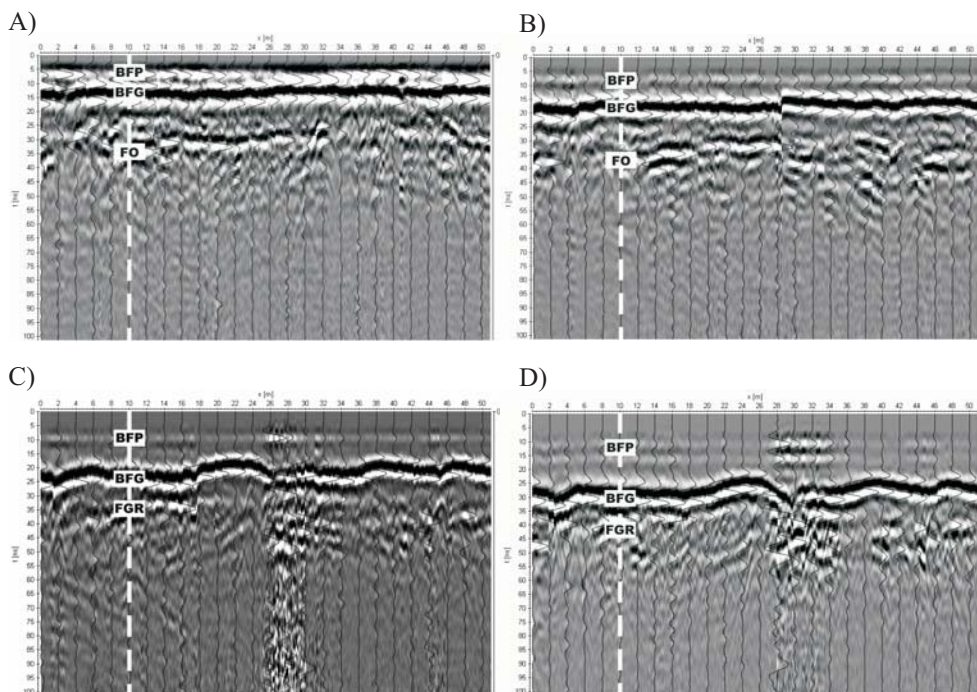


Fig. 8. Echogramy po przetworzeniu z badań nad Rudawą dla różnych rozstawów anten: A) 0.5 m; B) 1.0 m; C) 1.5 m; D) 2.0 m

Fig. 8. Echograms after processing for measurements with various offset carried out in “Rudawa” site: A) 0.5 m; B) 1.0 m; C) 1.5 m; D) 2.0 m

Wymodelowane hodografy dla badań przeprowadzonych na Bielanych przedstawiono na figurze 9, a echogramy dla różnych rozstawów anten na figurze 10. Podobnie jak poprzednio, dla analizy wyników badań georadarowych z Bielanych użyto programu do identyfikacji typów fal i do modelowania geometrii oraz rozkładu prędkości w ośrodku.

Interpretacja pomiarów z Bielanych oparta na opisanym modelowaniu i analizie echogramów pokazuje, że:

- na echogramach (Fig. 10) można zidentyfikować fale (Fig. 9): BFP, BFG, FO, FGR;
- granica pomiędzy strefami o różnym nasyceniu wodą, a co za tym idzie – różnej konsolidacji gruntu, jest nieciągła i łatwa do zinterpretowania (na czasach 10–35 ns) dla rozstawów 0.5–2.0 m (Fig. 10); średnia głębokość do horyzontu refrakcyjnego wynosi ok. 0.7 m;
- odległość krytyczna x_{kr-g} wynosi ok. 1.5 m;
- średnia prędkość w warstwie luźniej i zawodnionej wynosi ok. 11 cm/ns, a w warstwie skonsolidowanej ok. 15 cm/ns.

Na przedstawionych echogramach zarówno z badań na Bielanych (Fig. 10), jak i nad Rudawą (Fig. 8) widać przerwanie w horyzontach refrakcyjnych, co wynika z braku warunków do powstawania fal refrakcyjnych. Związane jest to z przejściem stref rozluźnionych w strefy skonsolidowane.

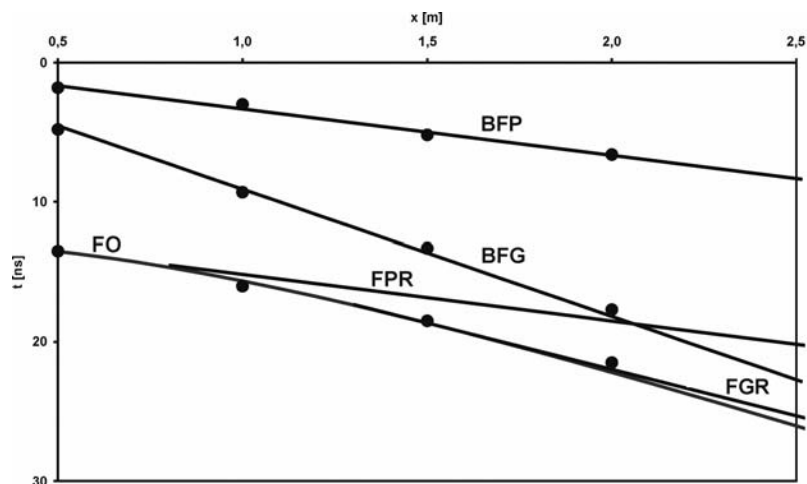


Fig. 9. Hodograpy dla badań georadarowych na Bielanych; analiza dla punktu na 20. metrze profilu
Fig. 9. Hodographs for GPR surveys in “Bielany” site; analysis for point at 20th meter of profile

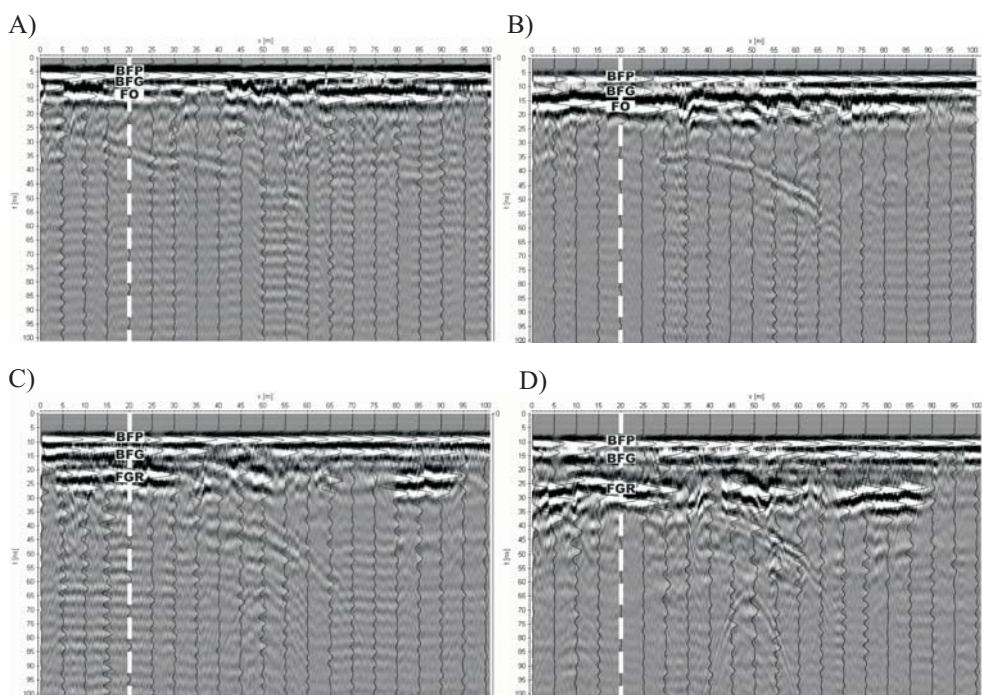


Fig. 10. Echogramy po przetworzeniu z badań na Bielanych dla różnych rozstawów anten: A) 0.5 m; B) 1.0 m; C) 1.5 m; D) 2.0 m

Fig. 10. Echograms after processing for measurements with various offset carried out in “Bielany” site: A) 0.5 m; B) 1.0 m; C) 1.5 m; D) 2.0 m

Wyniki pomiarów, które przeprowadzono na wałach wiślanych w miejscu „Zwierzyńiec”, pokazują jednoznacznie granicę dwóch stref wału o różnej konsolidacji gruntu, pomimo że pomiary przeprowadzono w okresie stosunkowo suchym. Charakterystyczna zmiana zapisu na echogramie widoczna jest na 35–40 m profilu (Fig. 11), co jest zgodne z informacjami geotechnicznymi o stopniu konsolidacji gruntu. Strefa silnej zagęszczenia znajduje się w pierwszej połowie profilu.

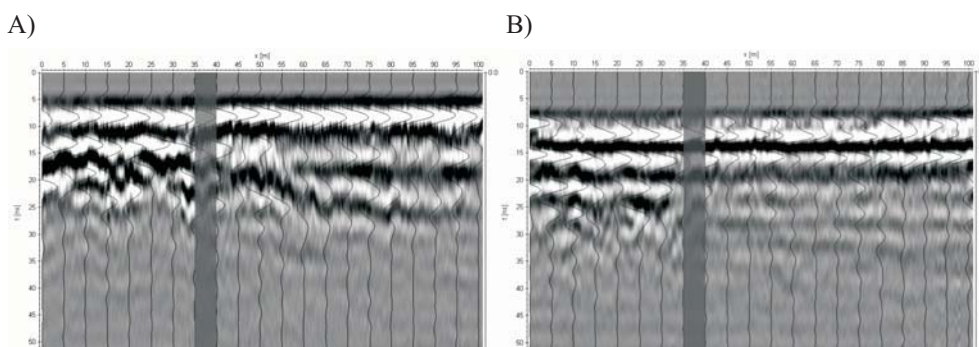


Fig. 11. Echogramy po przetworzeniu z badań na Zwierzyńcu dla różnych rozstawów anten: A) 1.0 m; B) 2.0 m

Fig. 11. Echograms after processing for measurements with various offset carried out in “Zwierzyńiec” site: A) 1.0 m; B) 2.0 m

PODSUMOWANIE

Rozpoznanie własności geotechnicznych wałów przeciwpowodziowych stanowi w Polsce istotny problem, zwłaszcza jeśli potrzebna jest informacja ciągła, a nie punktowa, z konkretnego miejsca sondowania geotechnicznego.

Stan techniczny wałów można połączyć bezpośrednio ze stopniem konsolidacji gruntu oraz jego nasyceniem wodą. Z kolei obecność wody w ośrodku powoduje powstawanie odpowiednich kontrastów parametrów elektromagnetycznych, które pozwalają na zastosowanie do badania wałów metody georadarowej, dającej informację ciągłą o stanie technicznym obwałowania. Przy odpowiednich warunkach, w czasie badań georadarowych na wałach rzecznych można rejestrować fale refrakcyjne, dające dodatkowe informacje o stanie technicznym wału.

Wyniki pomiarów georadarowych przeprowadzone w rejonie Krakowa udowodniły, że fale refrakcyjne rzeczywiście powstają na granicach ośrodka gruntowego o różnym stopniu zagęszczenia.

Interpretacja wyników badań georadarowych wymaga przyjęcia całego szeregu założeń, z których najważniejsze to znalezienie zależności pomiędzy własnościami mechanicznymi gruntu a własnościami dielektrycznymi. Dlatego niezbędna jest korelacja wyników badań georadarowych z wynikami sondowań dynamicznych w określonych punktach reperowych.

Zaproponowana w pracy technologia profilowania ze zmiennym rozstawem anten pozwala także na konstruowanie map rozkładu prędkości fali georadarowej w warstwie ponad granicą refrakcyjną z bardzo dużą dokładnością, co ze względów technicznych nie jest możliwe do uzyskania przy zastosowaniu standardowego profilowania CMP lub WARR. W obecnie prowadzonych pracach wspomniane mapy służą do dokładnego odzwierciedlenia przebiegu pierwszej granic strefy rozluźnionej w wale przeciwpowodziowym.

Autorzy pragną podziękować panom A. Nonckiewiczowi i T. Nawrockiemu za udostępnienie materiałów i pomoc merytoryczną w realizacji badań.

Praca finansowana ze środków statutowych (nr 11.11.140.06) Zakładu Geofizyki WGGiOŚ Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

LITERATURA

- Annan A.P. & Davis J.L., 1976. Impulse radar sounding in permafrost. *Radio. Sci.*, 11, 383–394.
- Arcone S.A., Lawson D.E., Delaney A.J., Strasser J.C. & Strasser J.D., 1998. Ground penetrating radar reflection profiling of groundwater and bedrock in an area of discontinuous permafrost. *Geophysics*, 63, 1573–1584.
- Bohidar R.N. & Hermance J.F., 2002. The GPR refraction method. *Geophysics*, 67, 1474–1485.
- Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T. & Elrayes M.A., 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil. Part II. Dielectric mixing models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 23, 35–46.
- Fisher E., McMechan G.A. & Annan A.P., 1992. Acquisition and processing of wide-aperture ground penetrating radar data. *Geophysics*, 57, 495–504.
- Friedman S.P., 1998. A saturation degree-dependent composite spheres model for describing the effective dielectric constant of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 34, 2949–2961.
- Hubbard S.S., Redman J.D. & Annan A.P., 2003. Measuring soil water content with ground penetrating radar. *Review Vadose Zone Journal*, 2, 476–491.
- Jones S.B. & Friedman S.P., 2000. Particle shape effect on the effective permittivity of anisotropic or isotropic media consisting of aligned or randomly oriented ellipsoidal particles. *Water Resour. Res.*, 36, 2821–2833.
- Reynolds J.M., 1999. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons, W. Brytania, 420–510.
- Roth K., Schulm R., Fluhler H. & Attinger W., 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resour. Res.*, 26, 2267–2273.
- Wilun Z., 2000. *Zarys geotechniki*. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1–723.

Summary

One of non-destructive method for testing the river embankments is GPR (Ground Penetrating Radar) method, which gives continuous information about construction and condition of embankments.

GPR method bases on using the changes of dielectric constant ϵ_r [-] and conductivity σ [mS/m] in the ground. Lose (destructive) part of embankment is characterized by increasing porosity and water saturation, what is connected with changes in electromagnetic properties (ϵ_r , σ) of the ground (Figs 1, 2).

GPR measurements were carried out in three sites in Krakow (Fig. 6) called: "Rudawa" (measurements were carried out in February, during thaw), "Bielany" (measurements in November after the rain) and "Zwierzyniec" (measurements in September – dry season).

Information about construction and condition of embankment in one of those sides is shown in Figure 3.

All kinds of georadar waves, which are created during GPR measurements are shown in Figure 4 and the results of registration are shown in Figure 5. In the paper mainly refractive waves were used for detection a boundary between lose and consolidated parts of the ground.

Terrain measurements were carried out in described sites making surveys on the same profile with changeable offset of transmitter-receiver in range 0.5 m to 2.0 m with step 0.5 m. All surveys were made using RAMAC/GPR set with antenna 200 MHz and with 5 cm distance between traces.

Interpretation was based on computer program for identification GPR waves. This program gave as result two-layer model with solved depth to refractive boundary and velocities in the layers. In hodographs following description used (Figs 7, 9): BFP – direct air wave, FPR – air refracted wave, BFG – direct ground wave, FGR – ground refracted wave, FO – reflected wave, points – results from terrain surveys.

Results of interpretation are:

- Rudawa site (Fig. 8): average depth to refractive boundary – 1.2 m, velocity in upper layer – 8 cm/ns and in lower layer – 15 cm/ns; in this site strong interferences accrued (Fig. 8);
- Bielany site (Fig. 10): average depth to refractive boundary – 0.7 m, velocity in upper layer – 11 cm/ns and in lower layer – 15 cm/ns;
- Zwierzyniec site (Fig. 11): one can notice a characteristic changes in the echogram at the distance 35–40 m what is connected with changes in ground consolidation (first part of the profile shows the consolidated ground).