



Zenon PILECKI*, Rafał CZARNY**, Rafał MATUŁA****, Krzysztof KRAWIEC***,
Paulina HARBA**, Elżbieta PILECKA***** , Maciej BARNAS**

Możliwości systemu Seismobile w przestrzennym zobrazowaniu sejsmicznym i georadarowym podłoża szlaków komunikacyjnych

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwości przestrzennego zobrazowania sejsmicznego i georadarowego podłoża szlaków komunikacyjnych za pomocą nowatorskiego systemu Seismobile. Przedstawiono badania testowe symulujące pomiar systemem Seismobile składającego się w części pomiarowej z 4 linii pomiarowych oraz anteny georadarowej. Szerzej opisano metodykę pomiarową, przetwarzania oraz interpretacji badań sejsmicznych i georadarowych. Parametry metodyki pomiarowej badań sejsmicznych zostały dobrane dla oceny możliwości zastosowania trzech metod: profilowania refrakcyjnego, profilowania MASW oraz profilowania refleksyjnego. Badania georadarowe zostały wykonane antenami o częstotliwości dominującej 250 MHz oraz 100 MHz. Sejsmiczny i georadarowy obraz 3D został wykonany dla obszaru o wymiarach 6 na 46 m i składał się z modeli 3D pół prędkości fali podłużnej i poprzecznej oraz dwóch modeli georadarowych 3D dla anten 250 i 100 MHz. Ważniejsze granice sejsmiczne i georadarowe zostały skorelowane z danymi geologicznymi pozyskanymi z otworów geologiczno-inżynierskich wykonanych w rejonie badań. Na sejsmicznych, jak i georadarowych obrazach 3D jednoznacznie zaznacza się granica stropu bardziej sztywnej warstwy żwirów i ilów pylastych na głębokości około 12 m. Pozostałe granice zaznaczają się mniej wyraźnie, przy czym najbardziej interesujące wyniki otrzymano z profilowania refrakcyjnego i profilowania georadarowego z użyciem anteny 100 MHz. W pracy pokazano również, że możliwe jest uzyskanie interesujących wyników za pomocą jednej linii strimera sejsmicznego. W tym przypadku uzyskany dwuwymiarowy obraz jest bardziej wiarygodny dla mniej skomplikowanych warunków geologiczno-inżynierskich.

Słowa kluczowe: System Seismobile, profilowanie refrakcyjne 3D, profilowanie refleksyjne 3D, profilowanie MASW 3D, profilowanie georadarowe, podłoże szlaku komunikacyjnego

* Dr hab. inż., prof. IGSMiE PAN, ** Mgr inż., *** Dr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, PAN, Kraków; e-mail: pilecki@meeri.pl

**** Mgr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.

***** Dr hab. inż., prof. PK, Politechnika Krakowska, Kraków.

Capabilities of the Seismobile system in seismic and GPR spatial imaging of the basement of the transport routes

Abstract: This article presents the capabilities of the seismic and GPR spatial imaging using the innovative Seismobile system. The presented experimental surveys simulated the measurement of the Seismobile system, with the help of four landstreamer lines and GPR antenna. The methodology of acquisition, processing and interpretation of seismic and GPR measurements was broadly described. Settings of seismic acquisition methodology were selected in terms of three techniques: refraction profiling, MASW profiling and reflection profiling. GPR measurements were performed with 250 MHz and 100 MHz antennas. 3D seismic and GPR image was taken for a 6 m x 46 m area and consisted of the P-wave and S-wave velocity fields and two 3D radarograms for 250 MHz and 100 MHz antennas. Significant seismic and GPR horizons were correlated with geological data from boreholes, drilled in the research area. The roof of harder layer of gravel and sandy loam is explicitly marked at the depth of approximately 12 m on the 3D seismic and GPR images. Other borders are marked less clearly. The most interesting results were obtained from refraction profiling and GPR profiling using 100 MHz antenna. In the paper the authors show that conducting measurements with one line of the landstreamer is also possible to obtain interesting results. In that case, the obtained two-dimensional image is more reliable for less complicated geological and engineering conditions.

Keywords: Seismobile system, 3D refraction profiling, 3D reflection profiling, 3D MASW profiling, GPR profiling, basement of transport route

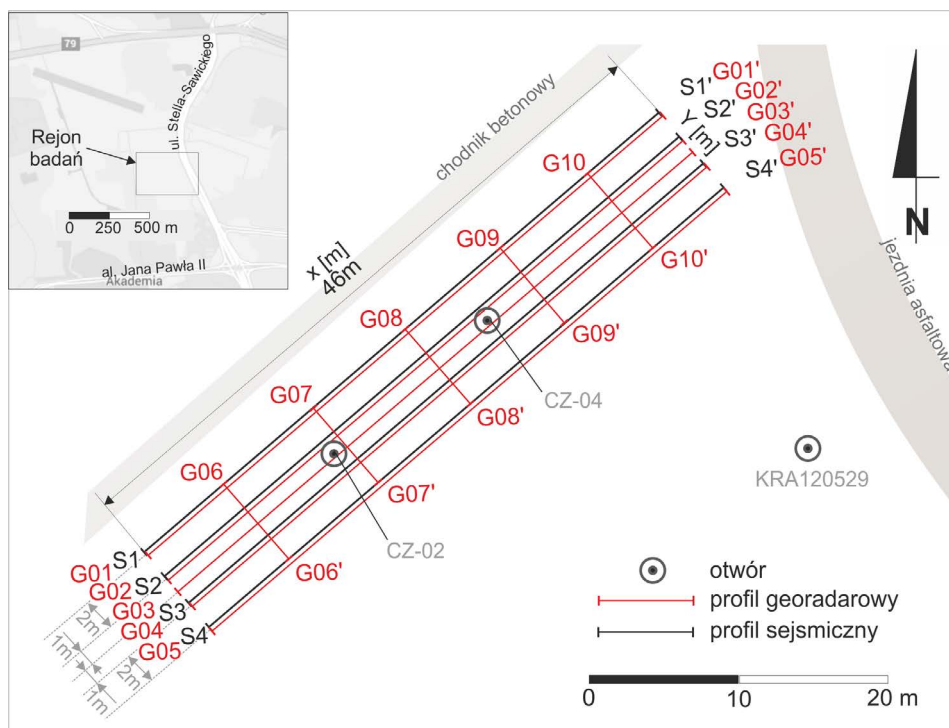
Wprowadzenie

Diagnostyka podłoża istniejących lub projektowanych szlaków komunikacyjnych może mieć istotny wpływ na właściwe przeciwdziałanie wystąpieniu większych deformacji nawierzchni drogowej. W badaniach tego rodzaju zastosowanie znajdują metody geofizyczne. Ze względu na czas realizacji pomiaru, przetwarzania oraz interpretacji danych często stosowaną metodą geofizyczną do badania podłoża szlaków komunikacyjnych jest metoda georadarowa (np. Riveiro i Solla 2016; Saarenketo i Scullion 2000). W ostatnich latach, w wyniku rozwoju tzw. strimera sejsmicznego, tj. linearnego, mobilnego układu geofonów, przystosowanego do ciągnięcia po powierzchni terenu (Pilecki i in. 2014a), stosowanie metod sejsmicznych w diagnostyce podłoża obiektów liniowych stało się bardziej efektywne. Większość badań z wykorzystaniem strimera sejsmicznego prowadzonych jest w wariancie dwuwymiarowym (Malehmir i in. 2015; Vangkilde-Pedersen i in. 2012), ale znane są również nieliczne zastosowania strimera w wariancie trójwymiarowym (Dolena i in. 2008).

W pracy przedstawiono metodykę badań sejsmicznych i georadarowych opracowaną w celu zastosowania systemu sejsmicznego Seismobile dla potrzeb diagnostyki szlaków komunikacyjnych (Kubańska i in. 2016). Metodyka została przetestowana na odcinku symulowanego szlaku komunikacyjnego. Odtworzono sejsmiczne obrazy przestrzenne fal podłużnej i poprzecznej oraz przestrzenny obraz georadarowy podłoża do głębokości kilkunastu metrów. Wyniki badań skorelowano z informacją litologiczną pochodzącą z wykonanych odwiertów w rejonie badań.

1. Warunki geologiczne w rejonie pomiarowym

Rejon badań testowanego układu pomiarowego systemu Seismobile znajdował się w pobliżu ulicy Stella-Sawickiego w Krakowie (rys. 1) na poziomie terasy wyższej Wisły (tzw.



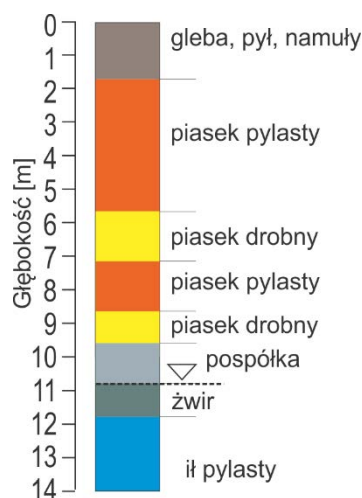
Rys. 1. Lokalizacja profili sejsmicznych (S1-S4) i profili georadarowych (G01-G10) oraz otworów geologiczno-inżynierskich na terenie badań w Krakowie

Fig. 1. Location of seismic profiles (S1-S4) and GPR profiles (G01-G10) together with geological boreholes in the research area in Krakow

terasy czyżyńskiej), reprezentowanej głównie przez plejstocenyjskie piaski i żwiry rzeczno-peryglacjalne pochodzące z okresu zlodowacenia północnopolskiego. Grubość pokrywy czwartorzędowej w rejonie pomiarowym wynosi około 11 m (strop osadów miocenu). Plejstocenyjskie grunty niespoiste są lokalnie przewarstwione gruntami spoistymi w postaci holocenyjskich mad rzecznych (pyły, gliny i mułki). Występujące w tym rejonie gleby brunatne osiągają miąższość do 0,4 m. Powierzchnią terenu jest w przybliżeniu poziomo ukształtowana.

Na podstawie kart dokumentacyjnych otworów Cz02 oraz Cz04 wykonanych dla potrzeb badań wzdłuż osi układu systemu Seismobile oraz archiwalnego otworu KRA12-0529 znajdującego się w pobliżu badanego rejonu pomiarowego (rys. 1) opracowano syntetyczny profil litologiczny (rys. 2). Na jego podstawie można wyróżnić następujące warstwy litologiczne, dla których należy spodziewać się zmian parametrów propagacji fal podłużnej, poprzecznej oraz elektromagnetycznej:

- do około 2 m – gleba, pył, namuły,
- od około 2 m do około 10 m – piasek pylasty oraz piasek drobny,
- od około 10 m do około 11 m – pospółka,
- od około 11 m do około 12 m – żwir,
- od około 12 m – ił pylasty.



Rys. 2. Syntetyczny profil geologiczny z rejonu pomiarowego

Fig. 2. Synthetic geological profile in the research area

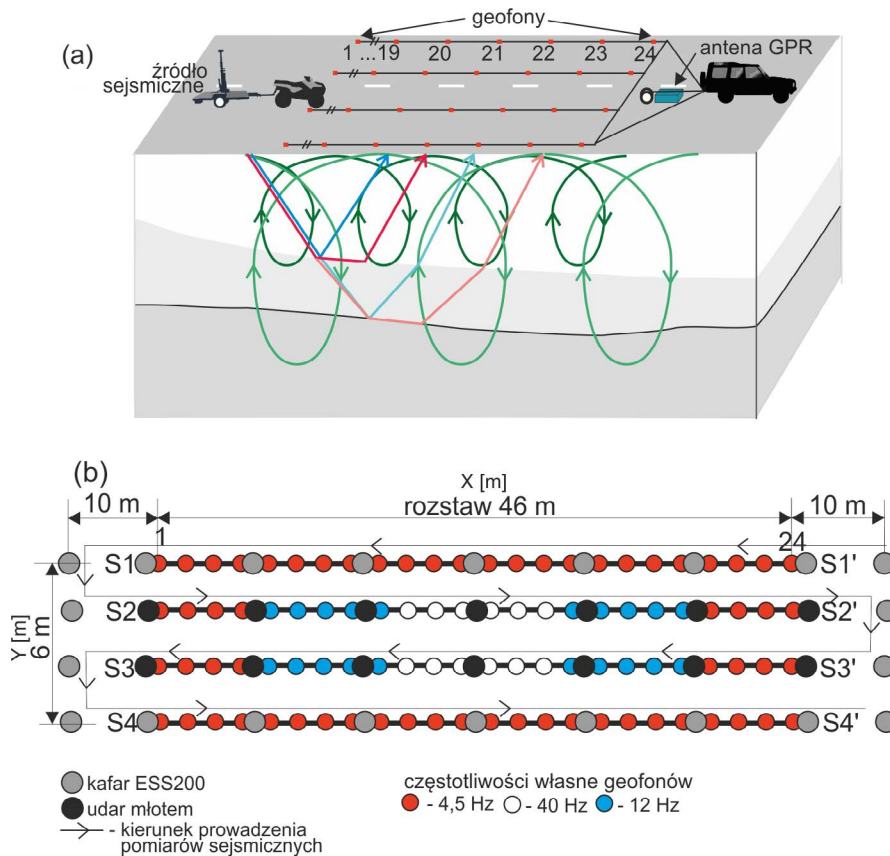
W otworze KRA12-0529 nawiercono swobodne zwierciadło wody na głębokości około 11 m. Wody nie nawiercono w pozostałych dwóch, krótszych otworach.

2. Metodyka pomiarowa

2.1. Pomiary sejsmiczne

Pomiar systemem Seismobile odbywa się poprzez przesuwanie układu czterech linii typu strimer sejsmiczny wzdłuż projektowanego i/lub wykonanego szlaku komunikacyjnego (rys. 3a). Układ punktów wzbudzenia, punktów odbioru, odległości pomiędzy geofonami oraz częstotliwość własna geofonów powinny być tak dobrane, aby zapewnić rejestrację trzech typów fal: podłużnej refrakcyjnej, podłużnej refleksyjnej oraz powierzchniowej Rayleigha. Umożliwi to kompleksowe, sejsmiczne rozpoznanie podłoża do głębokości kilkunastu metrów dla odstępu pomiędzy geofonami 2 m i długości linii pomiarowej 46 m.

W ramach przeprowadzonego testu zastosowano układ symulujący pomiar dla jednego rozstawu systemu Seismobile. Schemat pomiarowy został przedstawiony na rysunku 3b. Źródłem fal sejsmicznych były źródła impulsowe: młot o masie 5 kg oraz elektrodynamiczne źródło ESS200 o masie 90 kg. Parametry źródeł zostały szczegółowo opisane w pracy Pileckiego i in. (2014). Wykorzystano geofony o trzech różnych częstotliwościach własnych: 4,5 Hz, 12 Hz oraz 40 Hz. Geofony o wyższych częstotliwościach zostały umieszczone na dwóch wewnętrznych liniach (rys. 3b). Taki układ miał zapewnić większe możliwości rejestracji fal podłużnych refleksyjnych. Parametry rejestracji danych sejsmicznych przeprowadzanego testu zestawiono w tabeli 1.



Rys. 3. (a) Schemat pomiarowy systemu Seismobile wraz z zaznaczonymi promieniami fal wykorzystywanych w metodyce (fala podłużna refrakcyjna – kolor czerwony; fala podłużna refleksyjna – kolor niebieski, fala powierzchniowa Rayleigha – kolor zielony), (b) schemat pomiarowy testowych badań sejsmicznych

Fig. 3. (a) The outline of the Sesimobile System together with three types of seismic wave raypaths (refraction P-wave – red line, reflection P-wave – blue line, Rayleigh surface wave – green line); (b) seismic acquisition pattern used in the test

2.2. Pomiar georadarowe

Profilowanie georadarowe wykonuje się w czasie przesuwania się systemu Seismobile. Na rysunku 1 przedstawiono schemat lokalizacji profili georadarowych oznaczonych literą G w porównaniu do profili sejsmicznych oznaczonych literą S. W badaniach testowych wykonano 10 profili georadarowych: 5 podłużnych i 5 poprzecznych, antenami o częstotliwościach dominujących 100 i 250 MHz. W praktyce możliwy jest tylko pomiar na profilach podłużnych. Parametry metodyki pomiarowej zostały przedstawione w tabeli 2.

TABELA 1. Parametry testowych badań sejsmicznych

TABLE 1. Parameters of seismic acquisition

Nazwa	Opis/wartość parametru
Urządzenie rejestrujące	4 x sejsmograf Geode 24CH
Częstotliwości własne geofonów	4,5 Hz ; 14 Hz; 40 Hz
Krok próbkowania	0,125 msec
Długość rejestracji	500 msec
Format zapisu	SEGY
Typ źródła	impulsowe: elektrodynamiczne ESS200 o masie uderzającej 90 kg oraz młot 5 kg
Liczba składników pionowych	8
Liczba punktów wzbudzenia	36
Liczba kanałów aktywnych	96
Odległość między liniami strimer sejsmicznych	2 m
Odstęp pomiędzy geofonami	2 m
Interwał punktów strzałowych na rozstawie	6 m
Maksymalna odległość punktu wzbudzenia od rozstawu	10 m

TABELA 2. Parametry testowych badań georadarowych

TABLE 2. Parameters of GPR acquisition

Nazwa	Opis/wartość parametru	
Urządzenie rejestrujące	MALÅ ProEx System	
Format zapisu	MALÅ RD3	
Częstotliwość próbkowania	1007 MHz*	2619 MHz**
Odległość między trasami	0,05 m	
Okno czasowe	520 ns*	303 ns**
Liczba składników pionowych	32*	16**

* Antena 100 MHz.

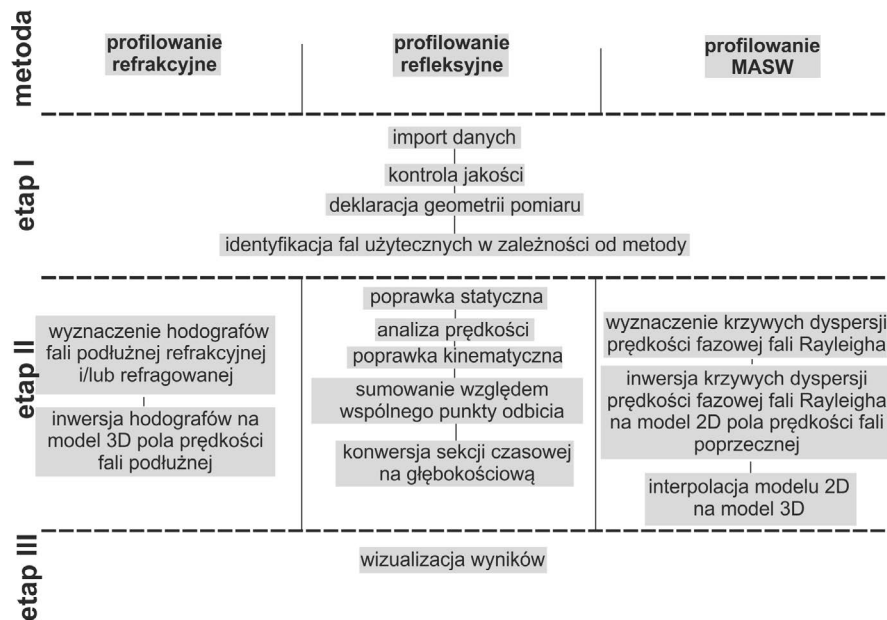
** Antena 250 MHz.

3. Metodyka przetwarzania i interpretacji danych

3.1. Pomiary sejsmiczne

Przetwarzanie i interpretacja danych z pomiarów sejsmicznych zostały wykonane w programie SeismicPro 8.0 firmy GeoGiga. Jest to oprogramowanie komercyjne umożliwiające jednoczesne, interaktywne przetwarzanie oraz interpretację metod profilowania refrakcyjnego, refleksyjnego oraz fal powierzchniowych. Kompatybilność formatów zapisu przetwarzanych danych dla wymienionych metod w znaczącym stopniu przyspiesza pracę. Uproszczo-

ny schemat przetwarzania i interpretacji danych zastosowany dla danych testowych został przedstawiony na rysunku 4.



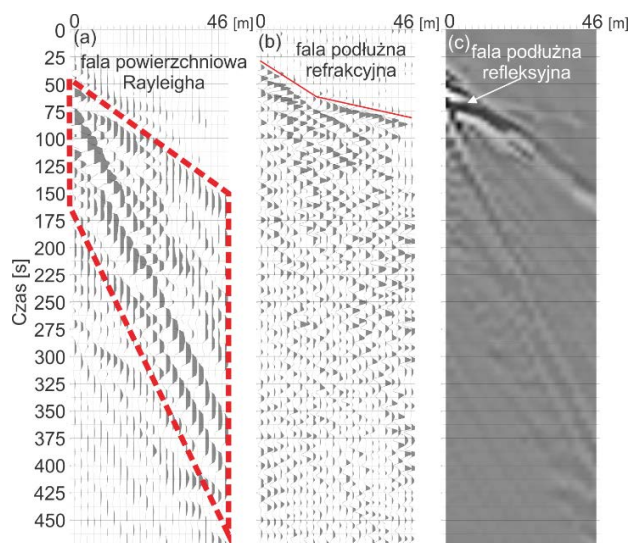
Rys. 4. Ogólny schemat przetwarzania i interpretacji danych zastosowany w badaniach testowych

Fig. 4. Processing flow chart for data from the test survey

W etapie I, po archiwizacji i uporządkowaniu danych, sprawdzono ich jakość oraz zidentyfikowano fale użyteczne (rys. 5). W tym etapie wprowadzono również geometrię pomiaru do oprogramowania.

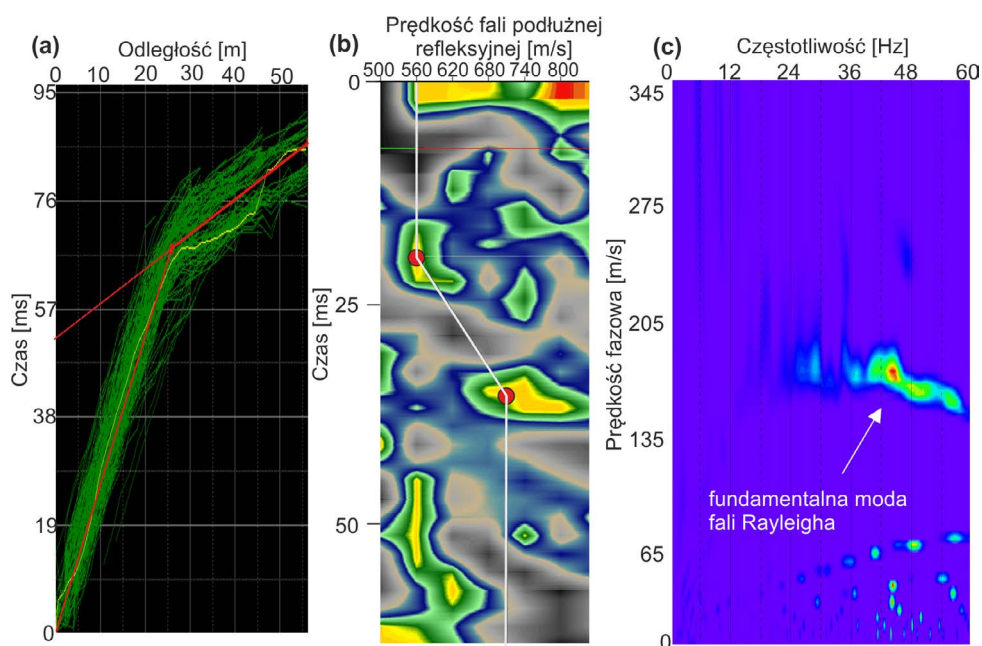
W etapie II przetwarzanie danych różniło się w zależności od metody profilowania sejsmicznego. W pierwszej kolejności wykonano przetwarzanie dla profilowania refrakcyjnego, które przyjęto za najbardziej miarodajne dla warunków pomiarowych. Na podstawie obliczonych hodografów (rys. 6a) wykonano inwersję czasów propagacji fali refrakcyjnej otrzymując w efekcie przestrzenny model pola prędkości fali podłużnej. Posłużono się modulem DWTOMO 3D tomografii refrakcyjnej dostępnej w oprogramowaniu SeismicPro.

W przypadku profilowania refleksyjnego, na wstępie wprowadzono poprawkę statyczną na podstawie wyników profilowania refrakcyjnego. W analizie prędkości (rys. 6b), identyfikacja maksymalnych energii sejsmicznych była utrudniona ze względu na przyjęty schemat i warunki pomiaru: krótki rozstaw, niewielkie odległości punkt wzbudzenia – punkt odbioru, a zwłaszcza brak granic o wyraźnym kontraście współczynnika impedancji akustycznej. W związku z tym, do obliczenia poprawki kinematycznej wykorzystano pole prędkości fali podłużnej z profilowania refrakcyjnego. Następnie wykonano sumowanie tras względem wspólnego punktu środkowego CMP (ang. *Common Mid Point*) oraz konwersję otrzymanej sekcji sejsmicznej z domeny czasu na domenę głębokości. Procedura została przeprowadzona dla wszystkich czterech strimerów sejsmicznych S1-S4.



Rys. 5. Przykładowy rekord sejsmiczny wraz z wyodrębnionymi trzema typami fal sejsmicznych: (a) powierzchniową Rayleigha, (b) podłużną refrakcyjną oraz (c) podłużną refleksyjną

Fig. 5. Seismic record example. Three types of seismic waves are presented: (a) Rayleigh surface wave, (b) refraction P-wave and (c) reflection P-wave



Rys. 6. Wybrane procedury etapu II przetwarzania danych pomiaru testowego: (a) hodografy fal refrakcyjnej, (b) analiza prędkości, (c) identyfikacja fundamentalnej mody fali powierzchniowej Rayleigha

Fig. 6. Selected procedures in the second stage of data processing: (a) refraction hodographs, (b) velocity analysis, (c) fundamental mode of Rayleigh wave identification

W etapie III wykonano wizualizację wyników z etapu II. W graficznej prezentacji modeli 3D wykorzystano program Voxler.

3.2. Pomiary georadarowe

Przetwarzanie danych pomiarów georadarowych zostało wykonane w programie Reflex 7.5 firmy Sandmeier. Pomierzone trasy antenami o częstotliwości 100 i 250 MHz podlegały identycznemu schematowi przetwarzania, który obejmował:

- a) korekcję czasu pierwszego wstąpienia fali elektromagnetycznej,
- b) usunięcie składowej stałoprądowej,
- c) wzmocnienie amplitud,
- d) filtrację pasmową,
- e) wzmocnienia według charakterystyki liniowej i eksponencjalnej,
- f) filtrację medianową,
- g) usunięcie poziomych refleksów będących szumem losowym,
- h) uśrednienie amplitud za pomocą średniej kroczącej.

Parametry dla poszczególnych procedur dobrano empirycznie, po wielokrotnych próbach dla ich różnych wartości. Parametry filtrów częstotliwościowych dobrano na podstawie analizy widma amplitudowego nieprzetworzonego sygnału z uwzględnieniem częstotliwości dominującej anten. Dla anteny 100 MHz zastosowano filtr trapezowy o narożnikach 23, 59, 183, 213 MHz, natomiast dla anteny 250 MHz odpowiednio 70, 105, 305, 390 MHz. W inwersji skali czasu na skalę głębokości przyjęto prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w ośrodku geologicznym równą 0,1 m/ns.

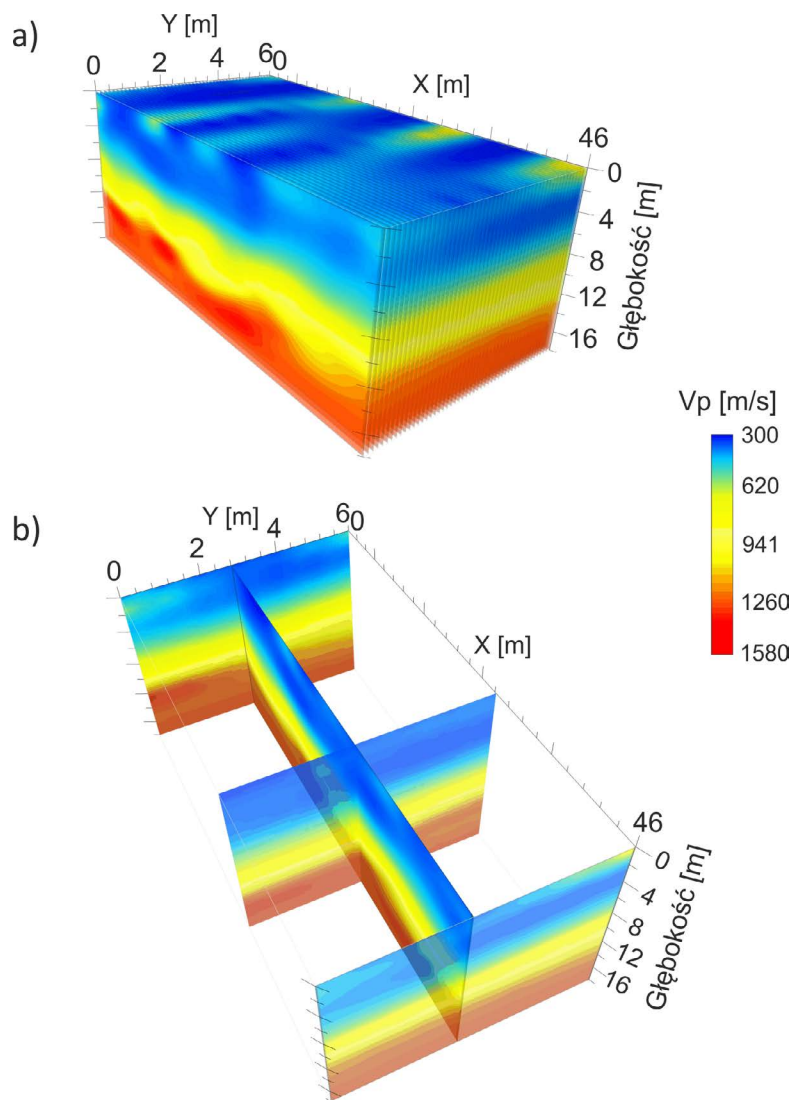
Graficzną prezentację przetworzonych danych w postaci obrazu 3D wykonano w programie Voxler, interpolując wartości amplitud pomiędzy 10 radarogramami.

4. Wyniki badań i ich analiza

W rezultacie przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych i georadarowych otrzymano model 3D pola prędkości fali podłużnej z profilowania refrakcyjnego (rys. 7), sekcje sejsmiczne 2D profilowania refleksyjnego (rys. 8), model 3D pola prędkości fali poprzecznej profilowania MASW (rys. 9), radarogram 3D dla anteny 250 MHz (rys. 10) oraz radarogram 3D dla anteny 100 MHz (rys. 11).

W profilowaniu refrakcyjnym obliczona prędkość fali podłużnej zmienia się od około 300 m/s przy powierzchni terenu do około 1580 m/s na głębokości około 12 m. (rys. 7). Na tej głębokości zaznacza się wyraźna, lecz nieregularna granica sejsmiczna, która odpowiada położeniu stropu ilów pylastych oraz zwierciadła wody (rys. 2). zaznacza się również płytsza nieregularna granica na głębokości około 8,0–10 m, którą można korelować ze stropem utworów związanych z większym udziałem frakcji żwirowej (pospółki).

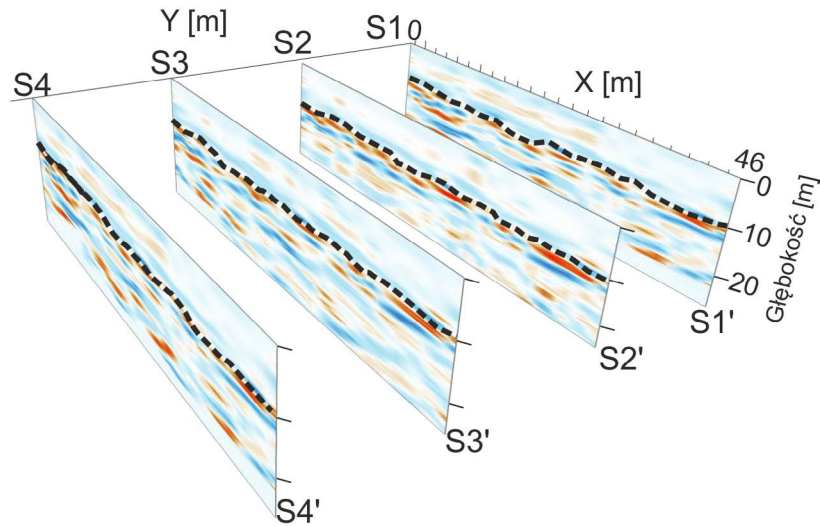
Na sekcjach sejsmicznych profilowania refleksyjnego najlepiej widoczna jest granica pomiędzy piaskami drobnymi, piaskami pylastymi, a pospółką oraz żwirem (ok. 900 m/s) na głębokości około 8–10,0 m. Fragmentarycznie zarysowuje się głębsza granica stropu ilów pylastych.



Rys. 7. Model 3D pola prędkości fali podłużnej z profilowania refrakcyjnego:
a) model ogólny, b) przekroje modelu

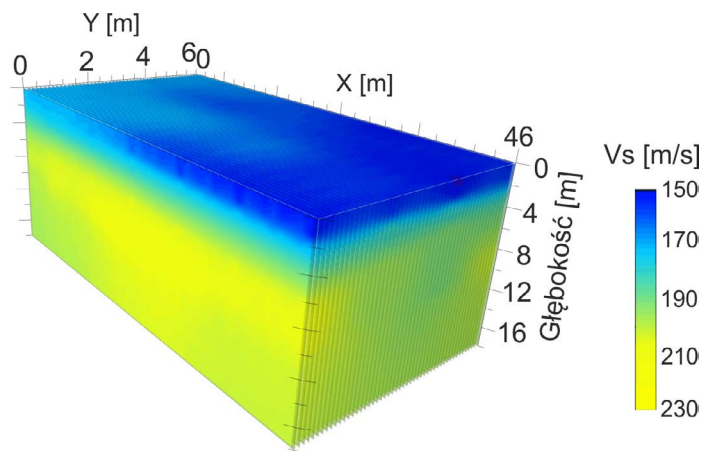
Fig. 7. P-wave velocity 3D model gained from refraction profiling:
a) overall model; b) cross-sections of the model

W przypadku modelu 3D pola prędkości fali poprzecznej opracowanego na podstawie profilowania MASW wartości prędkości zmieniają się od 150 do 230 m/s (rys. 9). Zasadniczo model 3D fali poprzecznej obrazuje ośrodek do głębokości około 8,0 m. Największe zróżnicowanie prędkości fali S wykazuje strefa najpłytsza do około 3 m. Zaznacza się granica stropu pospółki, natomiast nie zaznacza się wyraźnie granica na głębokości około 12 m. Przepuszczalnie jest to spowodowane występowaniem poziomu wody na tej głębokości.



Rys. 8. Sekcje sejsmiczne profilowania refleksyjnego.
Czarną przerywaną linią zaznaczono główną granicę refleksyjną

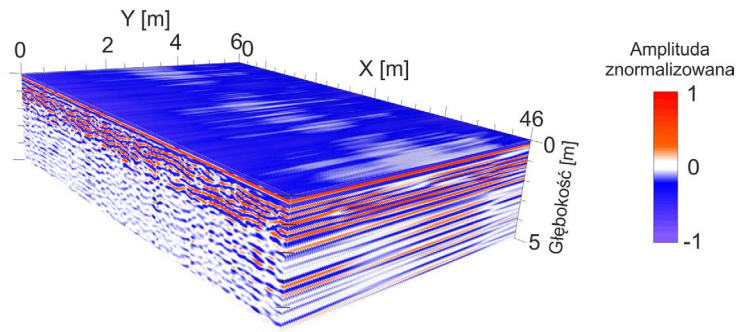
Fig. 8. Seismic cross-sections of reflecting profiling. Black dashed lines indicate main reflection boundary



Rys. 9. Model 3D pola prędkości fali poprzecznej z profilowania MASW

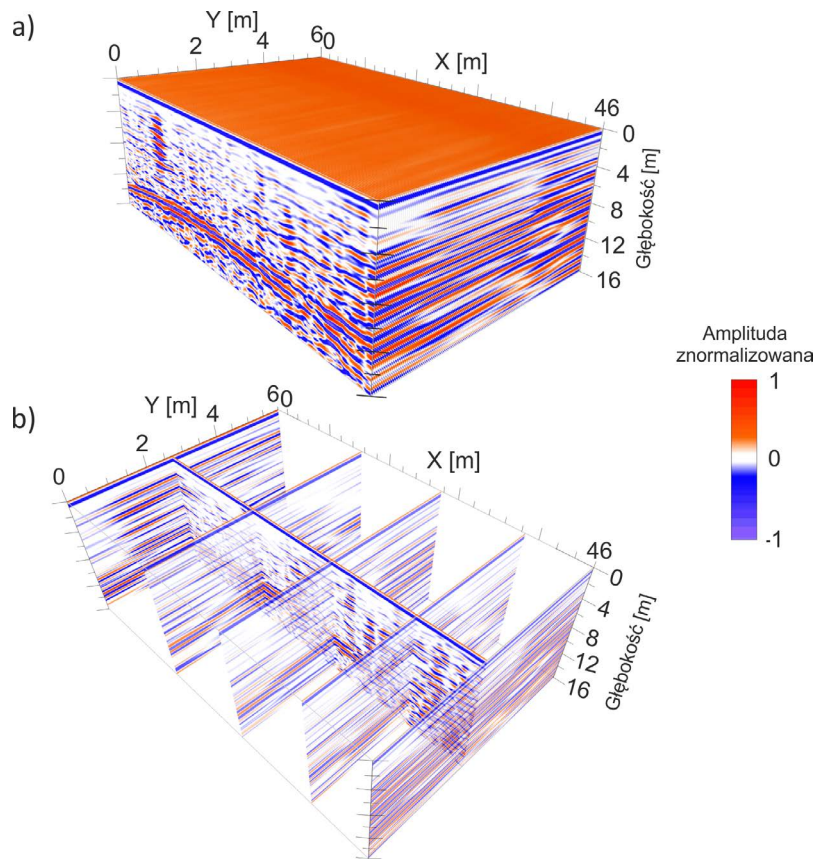
Fig. 9. 3D radarogram gained by 250 MHz antenna

Georadarowy obraz 3D uzyskany za pomocą anteny 250 MHz umożliwił szczegółowe rozpoznanie ośrodka do głębokości około 5 m (rys. 10). Na radarogramie wyraźnie zaznacza się granica pomiędzy przypowierzchniową warstwą gleby, namulów i pyłów a piaskami. Fragmentarycznie widać nieregularne warstwowanie piasków. W przypadku obrazu 3D uzyskanego anteną 100 MHz zasięg głębokościowy jest zdecydowanie większy – do około



Rys. 10. Radarogram 3D uzyskany anteną 250 MHz

Fig. 10. 3D radarogram gained by 250 MHz antenna



Rys. 11. Radarogram 3D uzyskany anteną 100 MHz:

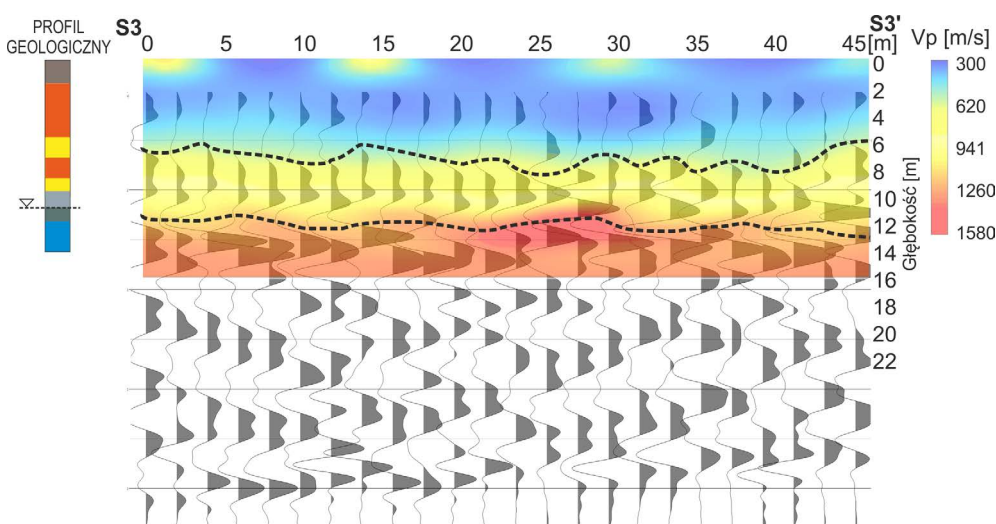
a) radarogram ogólny, b) przekroje radarogramu

Fig. 11. 3D radarogram gained by 100 MHz antenna:

a) overall radarogram; b) cross-sections of the radarogram

16 m (rys. 11). W modelu georadarowym wyraźnie zaznacza się granica ilów na głębokości ok. 12 m na całej długości profilu. Granica ta ma kształt antykliny o bardzo słabo nachylnych zboczach. W części północnej modelu silniej zaznacza się również granica przypuszczalnie warstwy żwirów. Słabo zaznacza się granica na głębokości około 8,0 m.

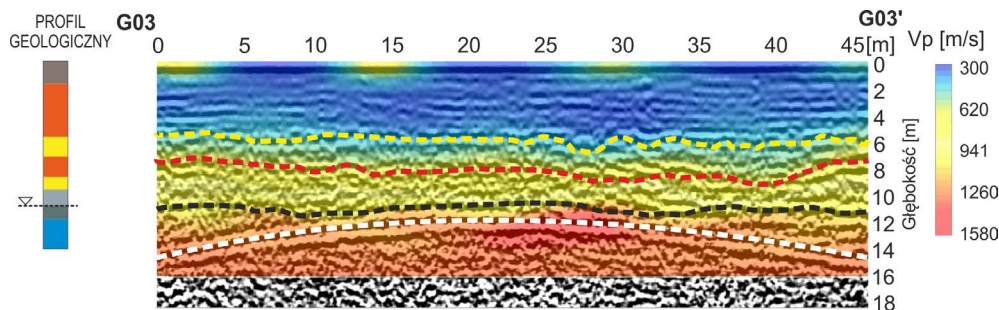
W przypadku realizacji pomiarów systemem Seismobile z użyciem jednego strimera sejsmicznego, otrzymuje się dwuwymiarowe obrazy podłoża. Na rysunku 12 przedstawiono przykład przekroju sejsmicznego z profilowania refrakcyjnego z naniesionymi wyraźniejszymi granicami na tle sekcji sejsmicznej z profilowania refleksyjnego dla wybranego strimera sejsmicznego S3 (rys. 1). Zaznaczona granica sejsmiczna na głębokości około 5,5 m jest związana z granicą pomiędzy piaskami pylastymi a piaskiem drobnym. Granica na głębokości około 12 m zaznacza się wyraźnie i jest granicą stropu warstwy ilów.



Rys. 12. Przykład przekroju sejsmicznego z profilowania refrakcyjnego z naniesionymi wyraźniejszymi granicami na tle sekcji sejsmicznej z profilowania refleksyjnego dla wybranego strimera sejsmicznego S3

Fig. 12. An example of refraction cross-section with indicated borders with the reflection section for the chosen S3 landstreamer line

W przypadku prowadzenia uzupełniających pomiarów georadarowych obraz podłoża może być uszczegółowiony. Na rysunku 13 przedstawiono radarogram G03-G03', wykonany anteną o częstotliwości 100 MHz, zestawiony z przekrojem z profilowania refrakcyjnego. Granice georadarowe na ogół pokrywają się z granicami sejsmicznymi, lecz widać więcej szczegółów związanych z ukształtowaniem się tych granic. W przypadku wyraźnej granicy na głębokości 12 m widać, że jest bardziej skomplikowana i ma kształt złożony. Dodatkowo na radarogramie można zaobserwować dwie mniej wyraźne granice georadarowe: na głębokości około 5 i 8 m.



Rys. 13. Przykład radarogramu G03-G03' wykonanego anteną o częstotliwości 100 MHz zestawionego z przekrojem z profilowania refrakcyjnego dla wybranego strimera sejsmicznego S3

Fig. 13. An example of radarogram G03-G03' performed with 100 MHz antenna compared with refraction cross-section for the chosen S3 landstreamer line

Podsumowanie

W pracy przedstawiono możliwości przestrzennego zobrazowania sejsmicznego i georadarowego podłoża szlaków komunikacyjnych za pomocą nowatorskiego systemu Seismobile. System ten można wykorzystać do diagnostyki podłoża istniejących lub projektowanych szlaków komunikacyjnych.

Przedstawiono badania testowe symulujące pomiar systemem Seismobile składającego się z 4 strimerów sejsmicznych oraz anteny georadarowej. W zależności od szerokości pasa pomiarowego rozpoznanie podłoża można prowadzić za pomocą od 1 do 4 strimerów sejsmicznych do szerokości trasy nawet do 12 m, przy odległości 4 m pomiędzy liniami pomiarowymi.

Szerzej opisano metodykę pomiarową, przetwarzania oraz interpretacji badań sejsmicznych i georadarowych. Parametry metodyki pomiarowej badań sejsmicznych zostały dobrane dla oceny możliwości zastosowania trzech metod: profilowania refrakcyjnego, profilowania MASW oraz profilowania refleksyjnego. Badania georadarowe zostały wykonane antenami o częstotliwości dominującej 250 MHz oraz 100 MHz. Sejsmiczny i georadarowy obraz 3D składał się z modeli 3D pól prędkości fali podłużnej i poprzecznej oraz dwóch modeli georadarowych 3D dla anten 250 i 100 MHz.

W rejonie przeprowadzonych badań testowych wyznaczone ważniejsze granice sejsmiczne i georadarowe zostały skorelowane z danymi z otworów geologiczno-inżynierskich z tego rejonu. Z badań wynika, że zarówno na sejsmicznych, jak i georadarowych obrazach 3D jednoznacznie zaznacza się granica stropu bardziej sztywnej warstwy ilów pylastych i żwirów na głębokości około 12 m. Najbardziej interesujące wyniki otrzymano z profilowania refrakcyjnego i profilowania georadarowego z użyciem anteny 100 MHz.

Badania pokazują, że zastosowanie systemu Seismobile może przyczynić się do szerszego rozpowszechnienia diagnostyki podłoża szlaków komunikacyjnych, a w efekcie poprawy ich jakości wykonania, co ma wpływ na wydłużenie okresu bezawaryjnego użytkowania.

Artykuł został opracowany w wyniku realizacji projektu nr UOD-DEM-1-303/001 o akronimie SEISMOBILE uzyskanego w ramach przedsięwzięcia pilotażowego Wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w skali demonstracyjnej DEMONSTRATOR+ dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

- Dolena i in. 2008 – Dolena, T.M., Speece, M.A., Link, C.A. i Duaiame, T.E. 2008. A 3D seismic land-streamer system. *Near Surface Geophysics*. doi: 10.3997/1873-0604.2007028.
- Malehmir i in. 2015 – Malehmir, A., Zhang, F. i Dehghannejad, M. et al 2015. Planning of urban underground infrastructure using a broadband seismic landstreamer — Tomography results and uncertainty quantifications from a case study in southwestern Sweden. *Geophysics* 80, B177–B192. doi: 10.1190/geo2015-0052.1.
- Kubańska i in. 2016 – Kubańska, A., Isakow, Z. i Pilecki, Z. 2016. Założenia funkcjonalne systemu Seismobile. *Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN* nr 93, s. 133–142, Kraków.
- Pilecki, Z., Czarny, R., Harba, P. i in. 2014a. Źródła drgań w sejsmice inżynierskiej. *Przegląd Górniczy* 70, s. 22–31.
- Pilecki, Z., Harba, P., Laszczak, M. i in. 2014b. Strimery w sejsmice inżynierskiej. *Przegląd Górniczy* 70, s. 32–38.
- Riveiro, B. i Solla, M. 2016. Non-Destructive Techniques for the Evaluation of Structures and Infrastructure. CRC Press.
- Saarenketo, T. i Scullion, T. 2000. Road evaluation with ground penetrating radar. *J. Appl. Geophys.* 43, s. 119–138. doi: 10.1016/S0926-9851(99)00052-X.
- Vangkilde-Pedersen i in. 2012 – Vangkilde-Pedersen, T., Rasmussen, E.S. i Kristensen, M. 2012. *Detailed mapping of Miocene sand-rich deposits in Denmark with high-resolution 2D land streamer vibroseis.*

