

Zastosowanie metody georadarowej do określania położenia swobodnego zwierciadła wód podziemnych w trakcie próbnego pompowania

Magdalena Gańko¹, Radosław Mieszkowski¹, Adrian Gańko²

On application of ground penetration radar method in defining position of the free aquifer during of the test pumping.
Prz. Geol., 63: 721–726.

Abstract. In this paper were verify the possibilities of use the ground penetrating radar method to defining the range of depression cone during pumping test the first free aquifer. On the experimental area there were: pumping well with observation weels, geotechnical weels and cone penetration tests. This made possible the credible interpretation of the results with GPR investigations. GPR measurements were executed before pumping and after stabilizing the depression. On the echograms there were clearly appeared the free aquifer before and during of the pumping. On the basis of geophysical investigations it was successful to interpret the position of free aquifer and the range of depression cone.

Keywords: free aquifer, piezometer, depression cone, pumping well with observation weels, cone penetration test (CPT), ground penetrating radar (GPR)

Określenie położenia swobodnego zwierciadła wód podziemnych w trakcie pompowania ma istotne znaczenie praktyczne podczas przygotowania opracowań hydrogeologicznych.

Zasięg leja depresji wyznacza się na podstawie wzorów empirycznych wyprowadzonych dla różnych warunków hydrogeologicznych. Otrzymana w ten sposób wielkość promienia leja depresji jest wartością teoretyczną, odpowiadającą depresji dążącej asymptotycznie do zera. W pracy podjęto próbę zweryfikowania w sposób instrumentalny, za pomocą nieinwazyjnej metody georadarowej (GPR), rzeczywistego zasięgu leja depresji w przypadku pompowania swobodnego poziomu wód podziemnych.

Jako poligon badawczy wybrano taras zalewowy Wisły na peryferiach dzielnicy Tarchomin (Warszawa). Obszar objęty badaniami nie jest zmieniony antropogenicznie, tj. w profilu gruntowym występują tylko grunty rodzime.

Badaniami geofizycznymi kształtu leja depresji metodą potencjałów samoistnych zajmowali się np. Szymanko i Stenzel (1973) oraz Linde i in. (2007). Autorzy Ci wykazali, że kształt leja depresji jest nieregularny, zależny od uziarnienia gruntów, kierunku ruchu wód podziemnych oraz od spadku hydraulicznego. Problemem wyznaczenia zasięgu leja depresji dla zwierciadła napiętego metodami geofizycznymi (za pomocą metod: sejsmicznej, georadarowej oraz elektrooporowej) zajmowali się Birkelo i in. (1987), Endres i in. (2000) oraz Tsoflias i in. (2001). W przypadku zwierciadła napiętego metoda georadarowa dała nieprecyzyjne wyniki, natomiast metody elektrooprowa i sejsmiki refrakcyjnej umożliwiły oszacowanie jego zasięgu.

Monitoring geofizyczny zasięgu leja depresji dla swobodnego zwierciadła wód podziemnych prowadzili np. Dolynchuk i in. (1998) oraz Kirsch i in. (2009). Autorzy wykazali wyraźne odstępstwa zasięgu leja depresji, wyznaczonego za pomocą metody GPR, w odniesieniu do analiz empirycznych. W ich badaniach promień leja depresji był mniejszy od obliczonego o ok. 30–40%. Poza tym kształt leja depresji nigdy nie był okręgiem.

METODY BADAŃ

Próbne pompowanie prowadzono z wykorzystaniem hydrowężła, na który składały się:

- studnia pompowa S-0 (głęb. 11 m) zbudowana z rury PCV o średnicy wewnętrznej 200 mm, składająca się z rury podfiltrowej (dł. 0,5 m), części perforowanej z filtrem siatkowym (dł. 3,5 m) oraz rury nadfiltrowej doprowadzonej do powierzchni terenu;

- dwa piezometry obserwacyjne – P-1 i P-2 o głębokości 9 m zbudowane z rur stalowych o średnicy 50 mm – rury podfiltrowej (dł. 0,3 m), części perforowanej z filtrem siatkowym (dł. 0,9 m) oraz rury nadfiltrowej doprowadzonej do powierzchni terenu.

Zarówno w studni, jak i w piezometrach w trakcie próbnego pompowania wykonywano bezpośrednie pomiary głębokości do zwierciadła wód podziemnych przy użyciu elektrycznego gwizdka hydrogeologicznego. Jednocześnie prowadzono badania georadarowe (GPR). Idea badań geofizycznych metodą georadarową opiera się na zjawisku odbicia fal elektromagnetycznych od granic o różnych parametrach elektrycznych (stałej dielektrycznej i oporności elektrycznej) (Karczewski, 2007). Fale elektromagnetyczne są emitowane w głąb ośrodka geologicznego za pomocą specjalnych anten nadawczych. Czasy emisji wzbudzonych i odbitych fal od granic refleksyjnych są rejestrowane przez antenę odbiorczą i archiwizowane przy użyciu odpowiednio skonfigurowanych systemów rejestracji (Jol, 2009; Karczewski, 2007). Badania GPR prowadzono przed rozpoczęciem pompowania (tzw. badania tła) oraz po kilkunastu godzinach pompowania (po osiągnięciu ustalonego dopływu do studni). Na poligonie badawczym wykonano sześć profili georadarowych – trzy przy użyciu anteny 100 MHz oraz trzy na tej samej trasie z wykorzystaniem anteny 250 MHz (ryc. 1). Częstotliwość użytych anten dobrano na podstawie przewidywanej głębokości leja depresji oraz głębokości prospekcji danej anteny. Mapę dokumentacyjną wykonanych profili georadarowych przedstawiono na

¹ Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; magdalena.ganko@student.uw.edu.pl, r.mieszkowski@uw.edu.pl.

² GEOTEKO Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o., ul. Wałbrzyska 14/16, 02-739 Warszawa; adrian.ganko@geoteko.com.pl.

rycinie 1. Trasy przebiegu trzech profili georadarowych dobierano tak, żeby były możliwie jak najbliższej studni oraz piezometrów.

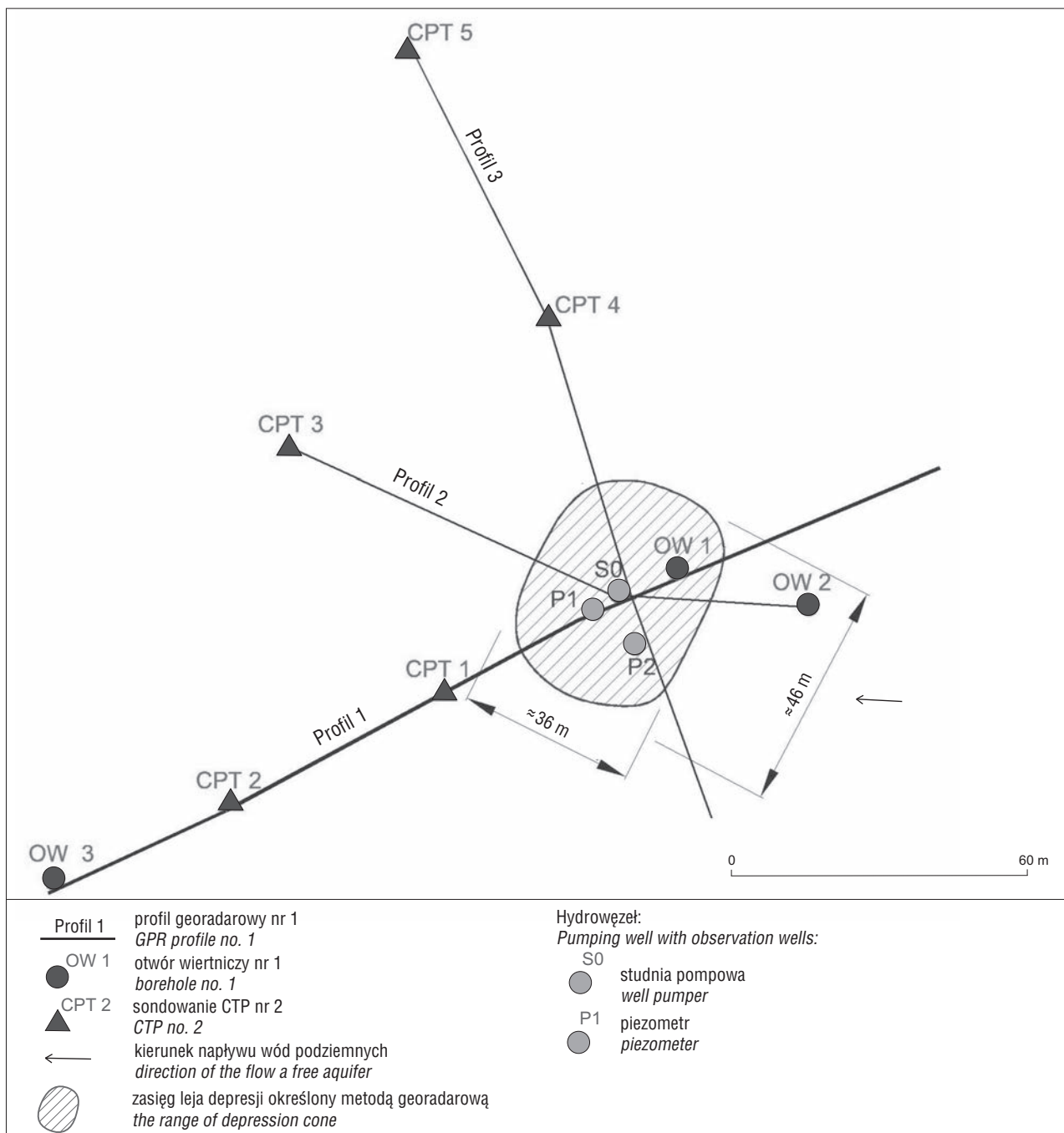
MORFOLOGIA I BUDOWA GEOLOGICZNA

Poligon badawczy jest położony na tarasie nadzalewowym niższym Wisły. Powierzchnia terenu jest płaska o rzędnych ok. 3,0–3,5 m n. „0” Wisły.

Warstwę przypowierzchniową na badanym terenie tworzy warstwa humusu o miąższości ok. 0,3 m. Poniżej leży seria osadów piaszczystych tarasu nadzalewowego niższego zlodowacenia wisły i interglacjału emskiego.

Osady te są wykształcone w postaci różnoziarnistych piasków (od drobno- do średnioziarnistych, miejscami gruboziarniste). Lokalnie w stropowych partiach utworów tarasu występują mady wykształcone w postaci piasków gliniastych i glin piaszczystych. Miąższość tej serii wynosi ok. 4 m.

Głębiej leżą osady akumulacji wodnolodowcowej, lodowcowej (gliny zwałowe) i zastoiskowej zlodowacenia odry. Osady wodnolodowcowe są wykształcone w postaci piasków średnio- i gruboziarnistych, lokalnie drobnoziarnistych oraz pospółek. Utwory morenowe są reprezentowane przez gliny piaszczyste i piaski gliniaste. Ich miąższość wynosi 1,0–9,0 m. Utwory zastoiskowe wykształcone jako gliny pylaste i pyły występują w postaci przewarstwień o miąższości do 1,5 m. Strop ilów plioceńskich występuje



Ryc. 1. Mapa dokumentacyjna obrazująca zasięg leja depresji wyznaczonego na podstawie badań georadarowych
Fig. 1. Documentary map illustrating the range of the depression cone appointed on the basis of GPR investigations

Tab. 1. Zestawienie głębokości do zwierciadła wody oraz wielkości depresji
Table 1. The comparison of depth to the free aquifer and range of the depression

Miejsce pomiaru poziomu wody podziemnej <i>The place of the measurement of free aquifer</i>	Pomiar elektrycznym gwizdkiem hydrogeologicznym <i>The measurement of the hydrogeological electric whistles</i>		Badania GPR <i>GPR tests</i>	
	pomierzona głębokość do zwierciadła wody od powierzchni terenu <i>the measurement of the hydrogeological electric whistles [m]</i>	wielkość depresji <i>size of depression [m]</i>	głębokość do zwierciadła wody od powierzchni terenu wg danych georadarowych [m] antena 100 MHz <i>depth to free aquifer from the level of the terrain according to GPR dates (antenna 100 MHz)</i>	głębokość do zwierciadła wody od powierzchni terenu wg danych georadarowych [m] antena 250 MHz <i>depth to free aquifer from the level of the terrain according to GPR dates (antenna 250 MHz)</i>
Studnia <i>Well</i>	5,65	2,65	4,20	4,10
Piezometr P1 <i>Piezometer P1</i>	3,82	0,80	3,80	3,80
Piezometr P2 <i>Piezometer P2</i>	3,62	0,65	3,40	3,40

na ogół na głębokości ok. 10–11 m p.p.t, aczkolwiek lokalnie mogą w nim występować rynny erozyjne sięgające głębokości ok. 32 m p.p.t.

WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE

Na terenie badań swobodne zwierciadło czwartorzędowego poziomu wód podziemnych w studni S-1 stwierdzono na głębokości ok. 2,5 m p.p.t. Poziom ten jest związany z serią piasków tarasu nadzalewowego niższego, interglacjału eemskiego oraz utworów wodnolodowcowych zlodowacenia odry, połączonych przewarstwieniami piaszczystymi występującymi w obrębie glin zwałowych z leżącymi wyżej warstwami. Ze względu na ciągłość warstwy nawodnionej, duże rozprzestrzenienie zarówno wzdłuż, jak i w poprzek doliny Wisły, dużą przepuszczalność gruntów tworzących warstwę nawodnioną (dobrze wysegregowane piaski średnio- i gruboziarniste) i odnawialność zasobów jest to poziom zasobny w wody podziemne. Omawiany czwartorzędowy poziom wodonośny jest zasilany w drodze bezpośredniej infiltracji wód opadowych i roztopowych z powierzchni terenu, przez dopływy boczne z wysoczyzny i wyższego tarasu nadzalewowego oraz okresowo jest zasilany wodami z Wisły (w trakcie występowania wysokich stanów wód w rzece).

OKREŚLENIE ZASIĘGU LEJA DEPRESJI

Metoda empiryczna

Do obliczenia współczynnika filtracji oraz zasięgu leja depresji wykorzystano wzory empiryczne (Pazdro & Kozerski, 1983) dla następujących założeń: ruch ustalony, obszar filtracji nieograniczony, filtracja laminarna, warstwa wodonośna o zwierciadle swobodnym. Otrzymano wartość współczynnika filtracji (k) równą $3,02 \cdot 10^{-4}$ m/s. Na podstawie wzoru Kusakina otrzymano promień leja depresji wynoszący 75 m.

Metoda georadarowa

Przetwarzanie i interpretację wyników badań geofizycznych przeprowadzono m.in. na podstawie danych pochodzących z otworów wiertniczych oraz sondowań CPT. Otrzymany obraz leja depresji porównano z głębokością

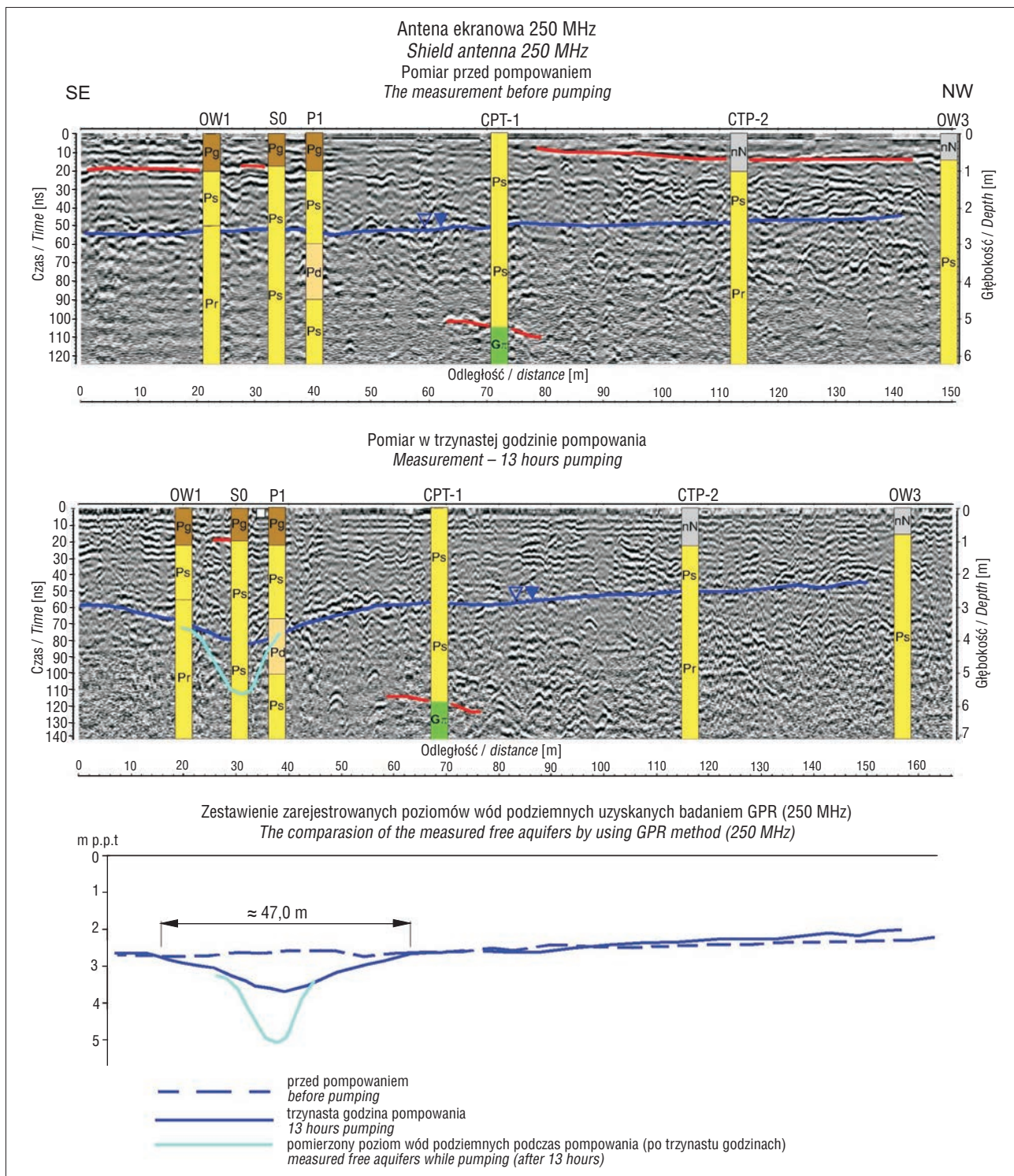
zwierciadła wód podziemnych pomierzoną w studni oraz piezometrach. Przed rozpoczęciem próbnego pompowania głębokość do swobodnego zwierciadła wód podziemnych otrzymana z badań georadarowych była zgodna z rzeczywistymi pomiarami w otworach obserwacyjnych. Sytuacja ta zmieniła się, kiedy wykonano badania po 13 godzinach próbnego pompowania. Głębokość do zwierciadła wód podziemnych z obrazu georadarowego znacząco nie pokrywała się z głębokością do zwierciadła wód podziemnych pomierzoną w studni pompowej (ryc. 2, 3). Może to wynikać z zeskoku hydraulicznego, istnienia kapilarności biernej w obrębie strefy depresji (czyli niecałkowitego odpompowania wód z przestrzeni porowej), jak również może mieć związek z tym, że kryza studni znajdowała się ponad powierzchnią terenu, przez co niemożliwe było wykonanie badań idealnie nad otworem studziennym oraz piezometrami (profil był odsunięty o ok. 30–40 cm od studni).

W tabeli 1 zestawiono głębokości do zwierciadła wód podziemnych uzyskane za pomocą pomiarów bezpośrednich w otworach hydrogeologicznych oraz metodą georadarową. Na rycinach 2 i 3 przedstawiono zinterpretowane wybrane echogramy georadarowe.

DYSKUSJA WYNIKÓW ORAZ WNIOSKI

Przed rozpoczęciem pompowania w studni wykonano profilowanie georadarowe w celu określenia, czy na obrazie georadarowym jest możliwa obserwacja wód podziemnych. Otrzymano refleks od zwierciadła wód podziemnych, którego głębokość była zgodna z pomiarami rzeczywistymi w otworach hydrogeologicznych.

Na podstawie pomiaru bezpośredniego w studni z użyciem elektrycznego gwizdka hydrogeologicznego w trakcie próbnego pompowania otrzymano rzeczywistą głębokość do zwierciadła wód podziemnych w otworze studziennym. Głębokość refleksu od wód gruntowych uzyskana z obrazowania georadarowego nie pokrywała się z obserwacjami rzeczywistymi w studni, co zapewne jest spowodowane zeskokiem hydraulicznym. Wielkość zeskoku (trudna do stwierdzenia) jest szacowana na podstawie obserwacji położenia zwierciadła wody w najbliższych piezometrach. W trakcie pompowania profile georadarowe wykonano bezpośrednio przy studni (tuż przy kryzie otworu). Można wnioskować, że linia na echogramie wyznaczająca zwierciadło wód podziemnych pokazuje rzeczywiste

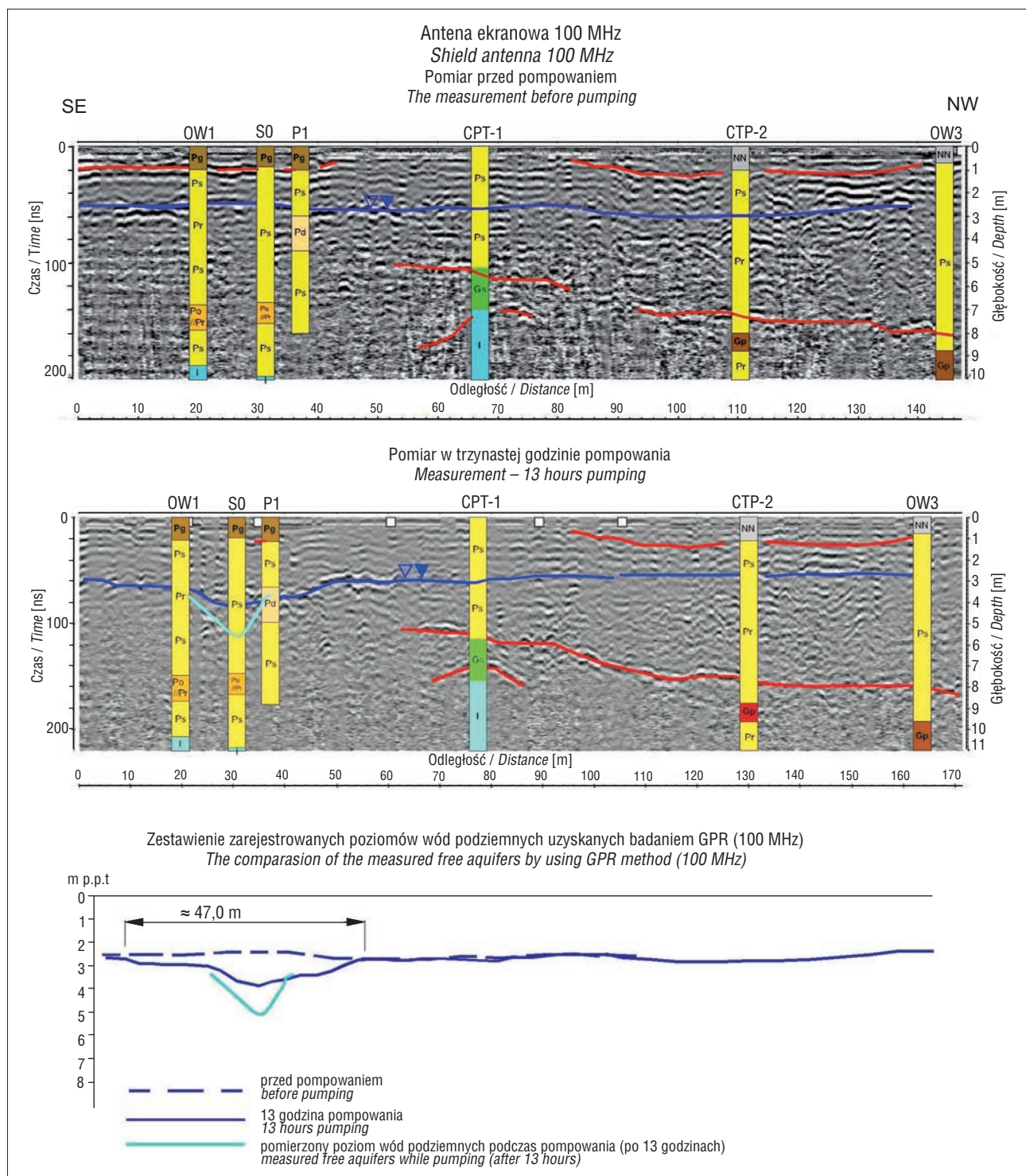


Ryc. 2. Porównanie wyników otrzymanych anteną georadarową 250 MHz (profil 1)
Fig. 2. Comparison of results received the GPR, antenne 250 MHz (profile 1)

położenie zwierciadła wody. Brak korelacji pomiędzy wartością z georadaru a wartością pomierzoną w studni nie jest błędem. Różnica ta pokazuje przybliżoną wielkość zeskoku hydraulicznego w studni. Dzięki badaniom georadarowym można obserwować różnicę między depresją w studni a depresją rzeczywistą w warstwie wodonośnej.

Próbne pompowania są prowadzone w celu oszacowania zasięgu wytworzonego lejka depresji, a co za tym idzie – wyznaczenia strefy oddziaływania studni. W analizowanym przypadku obliczony analitycznie promień lejka depre-

sji wyniósł 75 m. Metoda empiryczna zakłada, że zasięg lejka depresji jest jednakowy w każdym kierunku. Nie uwzględnia niejednorodności parametrów filtracyjnych warstwy wodonośnej ani kierunku dopływu wody. W badanym przypadku obraz lejka depresji uzyskany metodą georadarową charakteryzuje się asymetrią (ryc. 1). Uzyskany na podstawie pomiarów GPR kształt lejka depresji nie jest okrągły, przypomina elipsę o przybliżonych wymiarach osi 36 × 46 m. Taka różnica wynika prawdopodobnie ze zróżnicowania granulometrii utworów piasz-



Ryc. 3. Porównanie wyników otrzymanych anteną georadarową 100 MHz (profil 1)
Fig. 3. Comparison of results received the GPR, antenne 100 MHz (profile 1)

czystych oraz kierunku napływu wód podziemnych do studni pompowej.

W sprzyjających warunkach gruntowo-wodnych (płytko występujące zwierciadło wody oraz profil gruntowy zbudowany z osadów niespoistych) badania georadarowe wykonywane podczas pompowania mogą być wykorzystywane do określenia rzeczywistego kształtu lejki depresji oraz wielkości powstałej depresji w jego obrębie. Metoda GPR ma jednak w tym wypadku swoje ograniczenia – poziom wody podziemnej nie powinien znajdować się głębiej niż 3–4 m p.p.t. oraz między powierzchnią terenu a zwier-

ciadłem wody nie mogą występować osady nieprzepuszczalne, które tłumią fale elektromagnetyczne, a tym samym ograniczają prospekcję metody GPR.

W analizowanym przypadku okonturowany zasięg lejki depresji metodą GPR jest mniejszy o ok. 60% niż policzony analitycznie.

LITERATURA

BIRKELO B.A., STEEPLES D.W., MILLER R.D. & SOPHOCLEOUS M. 1987 – Seismic reflection study of a shallow aquifer during a pumping test. *Ground Water*, 25: 703–709.

- DOLYNCHUK J., LESMES D., URZUA A. & KILBRIDGE C. 1998 – Monitoring of groundwater pump test using GPR and electrical resistivity. [W] *Proceeding of Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*: 655–664.
- ENDRES A.L., CLEMENT W.P. & RUDOLPH D.L. 2000 – Ground penetrating radar imaging of an aquifer during a pumping test. *Ground Water*, 38: 566–576.
- JOL H.M. (red.) 2009 – *Ground Penetrating Radar: Theory and application*, 1st ed. Elsevier, Amsterdam, s. 524.
- KARCZEWSKI J. 2007 – *Zarys metody georadarowej*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Wyd. I, Kraków, s. 246.
- KIRSCH R. (red.) 2009 – *Groundwater geophysics, a tool for hydrogeology*, 2nd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, s. 548.
- LINDE N., REVIL A., BOLEVE A., DAGE'S D., CASTERMANT J., SUSKI B. & VOLTZ M. 2007 – Estimation of the water table throughout a catchment using self-potential and piezometric data in a Bayesian framework. *J. Hydrol.*, 334: 88–98.
- PAZDRO Z. & KOZERSKI B. 1983 – *Hydrogeologia ogólna*. Wyd. Geol., Warszawa, s. 575.
- SZYMANKO J. & STENZEL P. 1973 – *Metody geofizyczne w badaniach hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich*. Wyd. Geol., Warszawa.
- TSOFLIAS G.P., HALIHAN T. & SHARP J.M. 2001 – Monitoring pumping test response in a fractured aquifer using ground-penetrating radar. *Water Resources Research*, 37: 1221–1230.