

INTERPRETACJA WYNIKÓW POMPOWAŃ TESTOWYCH W REŻIMIE NIEUSTALONYM W ODMIENNYCH WARUNKACH HYDROGEOLOGICZNYCH

INTERPRETATION OF RESULTS OF THE PUMPING TEST IN UNSTEADY FLOW IN DIFFERENT HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS

BOGUSŁAW BIELEC¹, GRAŻYNA HOŁOJUCH¹

Abstrakt. Pompowania testowe w warunkach nieustalonego dopływu są nadal rzadko stosowane przy dokumentowaniu zasobów wód podziemnych, zwłaszcza w odniesieniu do wód słodkich (zwykłych). W niniejszej pracy zinterpretowano wyniki testów przeprowadzonych w trzech otworach (A, B i C), charakteryzujących różne warunki hydrogeologiczne. Pompowanie w każdym z otworów miało postać testu wielostopniowego (*step test*). Interpretacji dokonano przy użyciu programu obliczeniowego Aquifer^{Win32}. W pracy poddano analizie prawidłowość doboru schematu i czasu wykonywania testu. W zależności od warunków hydrogeologicznych zastosowano odmienne metody interpretacji. Prawidłowa interpretacja wyników testu hydrodynamicznego zależy w dużej mierze od właściwego zaprojektowania sposobu jego przeprowadzenia. Bardzo ważny jest także dobór odpowiedniej aparatury pomiarowej oraz właściwych urządzeń zapewniających utrzymanie założonego reżimu pompowania. Czynniki te bowiem gwarantują wiarygodność uzyskanych wyników (pomiar depresji przy stałym wydatku). Dopiero rzetelne dane pomiarowe, w połączeniu z właściwie dobraną do warunków hydrogeologicznych metodą interpretacji, pozwolą na obliczenie wiarygodnych parametrów filtracyjnych warstwy wodonośnej.

Słowa kluczowe: zasoby wód podziemnych, pompowania testowe, reżim nieustalony, parametry hydrogeologiczne, programy komputerowe.

Abstract. Test pumpings under conditions of transient flow are still rarely used in documenting groundwater resources, particularly in relation to fresh water. This paper presents interpretation of the results of pumping test conducted in three wells (A, B and C) characterized by different hydrogeological conditions. All of them were multi-step tests. Interpretations were made using the Aquifer^{Win32} software. We examined the correctness of the selection scheme and the timing of the test. Depending on the hydrogeological model, different methods of interpretation were implemented. Correct interpretation of hydrodynamic tests depends largely on the proper design of the test method (pumping scheme). Very important is also the selection of an appropriate measuring apparatus and appropriate devices for securing the assumed pumping regime. These factors ensure the reliability of the results (measured depression at the constant discharge). Only reliable measurement data, in conjunction with a properly matched method of interpretation of the hydrogeological conditions, will allow for reliable calculation of the filter parameters of the aquifer.

Key words: groundwater resources, pumping test, transient regime, hydrogeological parameters, computer programs.

WSTĘP

Próbne pompowanie jest podstawowym badaniem, na podstawie którego są ustalane parametry filtracyjne warstwy wodonośnej oraz zasoby eksploatacyjne ujęcia wody podziemnej. Najpowszechniej stosowane są pompowania kilkustopniowe (najczęściej 3-stopniowe), przy czym czas pom-

powania na każdym stopniu dynamicznym wynosi zazwyczaj od jednej do kilku dób. Przyjmuje się, że po tym czasie, przy założonym wydatku pompowania, ustala się już wartość depresji. Parametry filtracyjne wyliczane są wówczas przy zastosowaniu wzorów jak dla warunków ustalonych.

¹ Polska Akademia Nauk, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, ul. Wybickiego 7, 31-261 Kraków;
e-mail: bielec@meeri.pl, grazia@meeri.pl

Długi czas pompowania liczony w dobach, zwłaszcza przy dużym wydatku studni, sprawia, że mamy do czynienia ze znaczną ilością pompowanej wody. W przypadku wody zwykłej (słodkiej), nie ma kłopotów z jej odprowadzeniem. Możliwy jest wówczas jej zrzut bezpośrednio do cieku powierzchniowego lub odprowadzenie do gruntu (po uzyskaniu stosownych pozwoleń). Inaczej przedstawia się sytuacja, gdy pompowanie przeprowadzane jest w otworze zaprojektowanym w celu ujęcia wody o dużej mineralizacji i/lub wysokiej temperaturze (wody termalne, solanki), zwłaszcza przy spodziewanym znacznym wydatku. Duża ilość takiej wody stwarza znaczny problem z jej utylizacją (Kapuściński i in., 1997). W takim przypadku zazwyczaj są projektowane

krótkie testy w warunkach niustalonego dopływu, trwające kilka lub kilkanaście godzin. W zasadzie, poza wspomnianą sytuacją, pompowania testowe są wciąż rzadko stosowane w praktyce dokumentacyjnej. Być może jest to spowodowane bardzo pracochłonną metodyką interpretacji. W ostatnich latach jednak pojawiło się szereg aplikacji komputerowych w znaczący sposób ułatwiających interpretację danych pomiarowych. W niniejszej pracy wykorzystano wyniki rzeczywistych pompowań testowych wykonanych w otworach studziennych w trakcie dokumentowania ich zasobów eksploatacyjnych. Do obliczenia parametrów filtracyjnych warstwy wodonośnej posłużył jeden z dostępnych programów komputerowych.

UWAGI O METODYCE POMPOWAŃ TESTOWYCH

Istnieje wiele metod interpretacji pompowań testowych prowadzonych w reżimie niustalonym. Wybór odpowiedniej metody powinien być poprzedzony dokładną analizą warunków geologicznych i hydrogeologicznych, w jakich usytuowany jest badany otwór. Równie istotne jest także właściwe zaprojektowanie przebiegu testu w odniesieniu do stwierdzonych warunków hydrogeologicznych. Zastosowany schemat pompowania wpływa bowiem po części na późniejszy wybór metody interpretacji. W praktyce stosuje się kilka schematów pompowania (fig. 1) (Kapuściński i in., 1997; Dąbrowski, Przybyłek, 2005).

Do najbardziej rozpowszechnionych należą testy: jedno-stopniowy (fig. 1A) i wielostopniowy (fig. 1B) oraz jedno-stopniowy powtarzalny w dwóch odmianach – z jednakowym wydatkiem (fig. 1C) lub z wydatkiem wzrastającym (fig. 1D).

Równie ważny jest także odpowiedni dobór czasu pompowania. Zbyt długi czas na poszczególnych stopniach dynamicznych może spowodować, że już w praktyce warunki będą *quasi*-ustalone.

Podstawowym założeniem przy wykonywaniu testów w warunkach dopływu niustalonego jest zachowanie stałego wydatku w trakcie pompowania. Jest to dość trudne do realizacji bez zastosowania odpowiednich urządzeń sterujących pracą pompy (tzw. falowników). Aby z odpowiednią dokładnością określić parametry filtracyjne warstwy wodonośnej, a tym samym prawidłowo udokumentować zasoby eksploatacyjne ujęcia, powinno się dysponować również precyzyjnymi pomiarami wielkości depresji. Dodatkowo muszą one być wykonywane z odpowiednią (z reguły dość dużą) częstotliwością. Dlatego zaleca się w tym przypadku użycie odpowiednich sond pomiarowych sprzężonych z aparaturą do ciągłej, automatycznej rejestracji wyników. Dopiero uwzględnienie wszystkich wymienionych powyżej czynników gwarantuje wiarygodność uzyskanych danych. Znając warunki hydrogeologiczne, w jakich usytuowany jest badany otwór oraz mając świadomość dysponowania wiarygodnymi wynikami pomiarów, można właściwie dobrać metodę interpretacji.

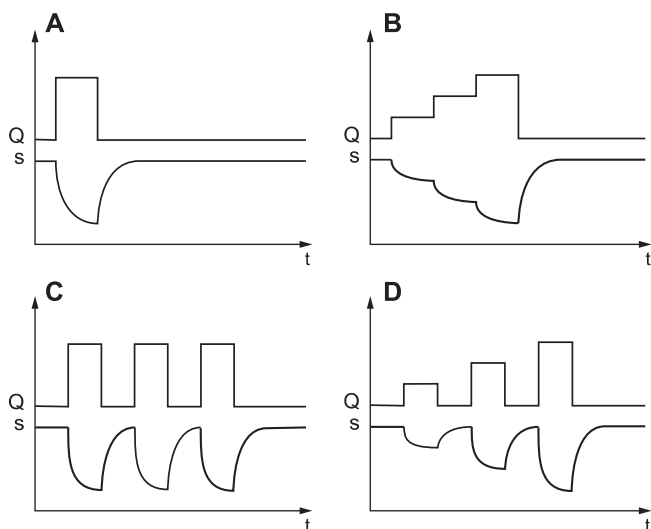


Fig. 1. Najczęściej stosowane schematy pompowania testowego

A – test jedno-stopniowy, B – test wielostopniowy, C – test jedno-stopniowy powtarzalny z jednakowym wydatkiem, D – test jedno-stopniowy powtarzalny ze wzrastającym wydatkiem

The most commonly used pumping test schemes

A – single test, B – step test, C – single test repeated with the same pumping rate, D – single test repeated with increasing pumping rate

DANE WEJŚCIOWE DO INTERPRETACJI

Na potrzeby niniejszego artykułu poddano analizie wyniki pompowań testowych wykonanych w trzech otworach: A, B i C. Otwory wykonane zostały w miejscach o odmiennych warunkach hydrogeologicznych. Otwór A o głębokości 20 m ujmuje czwartorzędowy poziom wodonośny o zwierciadle swobodnym na całej jego miąższości. Warstwę wodonośną stanowią tu osady piaszczysto-żwirowe, zatem jest to ośrodek porowy. Otwór B wykonano w utworach paleogenu do głębokości 120 m. Poziom wodonośny o charakterze naporowym związany jest z osadami fliżowymi (piaskowce i łupki). Odcinek zafiltrowany znajduje się w obrębie strefy ak-

tywnej wymiany wód. Ujęte osady stanowią ośrodek szczelinowo-porowy. Otwór C, wykonany do głębokości 3000 m, ujmuje wody termalne w utworach triasu (wapienie i dolomity). Przewiercono w nim całą miąższość warstwy wodonośnej o charakterze naporowym i warunkach artezyjskich. W tym przypadku ujęte osady reprezentują ośrodek szczelinowo-krasowy.

W każdym z otworów pompowanie testowe wykonane zostało według tego samego schematu. W tym przypadku przeprowadzono test wielostopniowy (*step test*; fig. 1B). Jednakże czas trwania testów był zróżnicowany w poszcze-

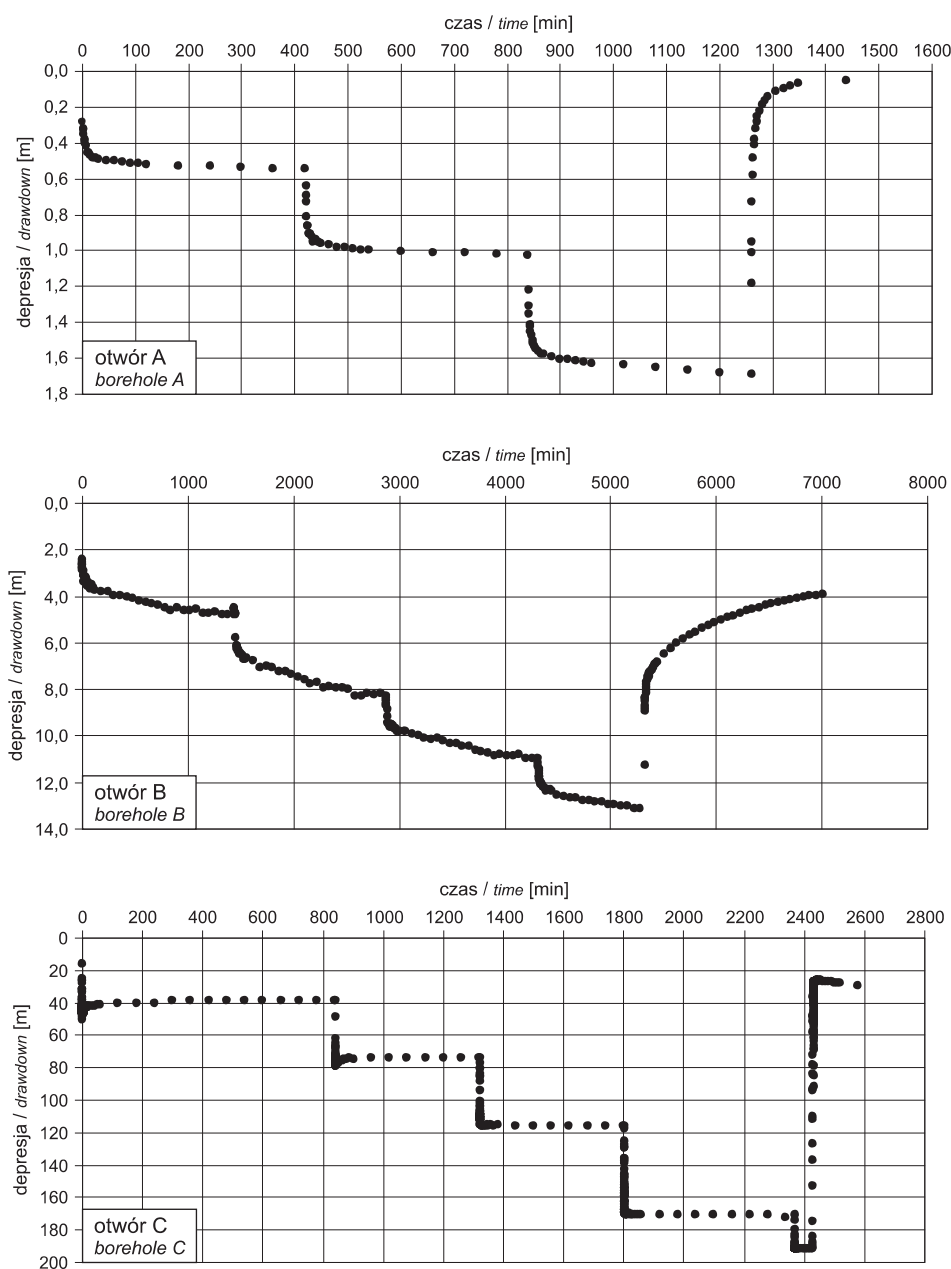


Fig. 2. Zmiany depresji w otworach A, B i C podczas pompowania testowego

Drawdown changes in boreholes A, B and C during the pumping test

gólnych otworach, a także na poszczególnych stopniach dynamicznych. Na figurze 2 pokazano zmiany depresji w analizowanych otworach podczas wykonywania testu.

Do interpretacji wyników pompowania wykorzystano program obliczeniowy Aquifer^{Win32} 3.0 Modeling Version (Environmental Simulations Inc., 2003). Aplikacja ta umożliwia analizę testów jednostopniowych (*single test*), wielostopniowych (*step test*) i testów szczyptywania (zalewania)

otworu (*slug test*) (Environmental Simulations Inc., 2003). Interpretację danych można przeprowadzić jedną z następujących metod: Theisa, Thiema, Coopera i Jacoba, Papadopulos i Coopera, Hantusha i Jacoba, Hantusha, Neumana, Mencha, Edena i Hazela, Birsoya i Summersa, Hvorsleva, Bouwera i Rice'a, Blacka, Coopera, Bredehoefta i Papadopulos, KGS Model oraz Kippa (Kruseman, de Ridder, 1990).

METODYKA INTERPRETACJI

W każdym z opisanych otworów przeprowadzono pompowanie kilkustopniowe, zakończone stabilizacją zwierciadła wody. W związku z powyższym przy interpretacji posłużono się metodą Edena i Hazela (Eden, Hazel, 1973), stosowaną dla testów wielostopniowych (*step test*). Metodę tę zastosowano do każdego z analizowanych otworów, również do otworu A, mimo że zakres jej stosowania ograniczony jest do warunków naporowych (*confined*). Zdecydowano się na taki krok, ponieważ stosunek depresji (s) do miąższości warstwy wodonośnej (H) w tym otworze (ujmującym poziom o zwierciadle swobodnym – *unconfined*) wynosi mniej niż 0,1 ($s < 0,1 H$), co według Dąbrowskiego i Przybyłka (2005) pozwala na zastosowanie metod jak dla warunków naporowych.

Podstawowym założeniem przy interpretacji wyników pompowania testowego w reżimie niestabilnym jest stałość wydatku na poszczególnych stopniach dynamicznych. Niejednokrotnie warunek ten jest dość trudny do spełnienia

i wymaga, o czym już wspomniano, stosowania urządzeń stabilizujących pracę pompy. Najczęściej wydatek ulega niewielkim wahaniom w trakcie testu. W takim przypadku do obliczeń bierze się jego średnią wartość z każdego stopnia dynamicznego. Problem wahań wydatku nie występuje przy analizie wzniosu (*recovery*; Theis, 1935), ponieważ jest on wówczas równy zero ($Q = 0$). Z powyższych względów ta właśnie metoda uważana jest za dającą stosunkowo najbardziej wiarygodne wyniki. W niniejszej pracy analizę wzniosu zastosowano w odniesieniu do każdego z analizowanych otworów. Poza wymienionymi powyżej metodami interpretacji zastosowano jeszcze kilka, dla których za dane wejściowe posłużyły obserwacje zmian depresji na pierwszym poziomie pompowania. W zależności od warunków hydrogeologicznych w analizowanych otworach, zastosowano metodę Coopera i Jacoba (Cooper, Jacob, 1946) – dla otworu A, Hantusha (Hantush, 1961) – w przypadku otworu B oraz Moench (Moench, 1984) – dla otworu C.

OMÓWIENIE UZYSKANYCH WYNIKÓW

Wyniki przeprowadzonej interpretacji danych pomiarowych uzyskanych w trakcie testów w otworach A, B i C zestawiono w tabeli 1. Podano w niej przyjętą metodę interpretacji, opis warunków hydrogeologicznych, w jakich jest stosowana oraz wartości przewodności T [m^2/s], obliczone przy pomocy tej metody dla poszczególnych otworów.

Pompowanie testowe w otworze A, ujmującym swobodny poziom wodonośny w utworach czwartorzędu, przeprowadzono na trzech stopniach dynamicznych. Czas pompowania na każdym stopniu był jednakowy i wynosił 7 godzin. Pomiaru depresji w tym przypadku wykonywano ręcznie, przy użyciu gwizdka hydrogeologicznego (tzw. świstawki), zaś do pomiarów wydajności posłużył wodomierz. Również pracę pompy głębinowej regulowano ręcznie, bez dodatkowych urządzeń sterujących. Pod koniec pierwszego i drugiego stopnia testu zmiany depresji były bardzo niewielkie; w zasadzie można już mówić o ustaleniu depresji. Dopiero na trzecim stopniu zmiana była bardziej zauważalna (fig. 2). Wydaje się więc, że czas pompowania na poszczególnych

stopniach był zbyt długi. W związku z charakterem ujętej warstwy wodonośnej, do interpretacji danych pomiarowych, w przypadku otworu A, wykorzystano metodę Theisa z poprawką dla warunków swobodnych. Dodatkowo, z uwagi na stosunek depresji do miąższości warstwy wodonośnej, wynoszący mniej niż 0,1 (Dąbrowski, Przybyłek, 2005), w analizowanym przypadku zastosowano klasyczną metodę Theisa, jak dla warunków naporowych. Wartości przewodności hydraulicznej uzyskane jedną i drugą metodą są bardzo zbliżone i wynoszą odpowiednio $2,34 \cdot 10^{-3} m^2/s$ i $2,26 \cdot 10^{-3} m^2/s$. Również wartość przewodności hydraulicznej uzyskana metodą Coopera i Jacoba jest tego samego rzędu i wynosi $2,26 \cdot 10^{-3} m^2/s$. Nieco niższą wartość przewodności, wynoszącą $1,74 \cdot 10^{-3} m^2/s$, uzyskano analizując cały okres pompowania metodą Edena i Hazela, co może być wynikiem ograniczenia stosowania tej metody do warunków naporowych (*confined*). Zdecydowanie najniższą wartość analizowanego parametru otrzymano w trakcie interpretacji wzniosu. W tym przypadku przewodność hydrauliczna wynosiła $4,86 \cdot 10^{-4} m^2/s$

Tabela 1

Wyniki interpretacji pompowania testowego w otworach A, B i C

Results of pumping test data analysis for boreholes A, B and C

Metoda interpretacji	Zakres stosowania metody	Przewodność T [m ² /s]		
		otwór A	otwór B	otwór C
Theis, 1935 (warunki naporowe)	jednorodna i nieograniczona warstwa wodonośna, studnia dogłębiona, stały wydatek, warunki naporowe	2,26·10 ⁻³	7,83·10 ⁻⁵	3,89·10 ⁻⁴
Theis, 1935 (warunki swobodne)	jednorodna i nieograniczona warstwa wodonośna, studnia dogłębiona, stały wydatek, warunki swobodne	2,34·10 ⁻³	–	–
Cooper i Jacob, 1946	jednorodna i nieograniczona warstwa wodonośna, studnia dogłębiona, stały wydatek, warunki naporowe	2,26·10 ⁻³	–	–
Hantush, 1961	jednorodna i nieograniczona warstwa wodonośna, studnia niedogłębiona, stały wydatek, brak przesiąkania z warstw sąsiednich, warunki naporowe	–	1,07·10 ⁻⁴	–
Moench, 1984	warstwa wodonośna o charakterze szczelinowym, podwójna porowatość, dominujący udział przepływu szczelinami	–	–	4,05·10 ⁻⁴
Theis, 1946 (analiza wzniosu)	jednorodna i nieograniczona warstwa wodonośna, studnia dogłębiona, stały wydatek, analiza wzniosu	4,86·10 ⁻⁴	8,33·10 ⁻⁵	9,65·10 ⁻⁵
Eden i Hazel, 1973 (pompowanie wielostopniowe)	jednorodna i nieograniczona warstwa wodonośna, studnia dogłębiona, warunki naporowe, pompowanie z wydatkiem wzrastającym stopniowo	1,74·10 ⁻³	7,85·10 ⁻⁵	1,46·10 ⁻⁴

i była o około 5 razy mniejsza od pozostałych. Mimo największej różnicy w oszacowaniu przewodności przy wykorzystaniu analizy wzniosu w porównaniu z innymi zastosowanymi metodami, wydaje się, że jest jednak bardziej wiarygodna. Za takim stwierdzeniem przemawiają następujące fakty. Pomiarzy zarówno depresji, jak i wydatku wykonywane były ręcznie, zatem mogą być mniej dokładne (zwłaszcza w odniesieniu do wydatku). Wielkość wydatku przyjęta do obliczeń była wartością średnią z pomiarów na danym stopniu pompowania (w przypadku analizy wzniosu Q jest stałe i wynosi zero). Zmiana depresji na poszczególnych stopniach była stosunkowo niewielka (ok. 0,5 m), co przy pomiarze wykonywanym ręcznie mogło istotnie zwiększyć błąd. W związku z niewielką zmianą depresji, być może lepszym rozwiązaniem byłoby w tym przypadku zaprojektowanie testu jednostopniowego, powtarzalnego (fig. 1C) z maksymalnym wydatkiem.

Kolejny otwór, oznaczony symbolem B, ujmuje naporowy poziom wodonośny we fliszowych utworach paleogenu. Pompowanie pomiarowe przeprowadzono w tym otworze na czterech stopniach dynamicznych, przy czym czas pompowania na pierwszych trzech stopniach wynosił po 23 godziny, zaś na czwartym stopniu był krótszy – 16 godzin. Wielkość depresji rejestrowała automatycznie aparatura pomiarowa. W tym przypadku stały wydatek pompy utrzymywany był przy pomocy falownika. Zmiany depresji pod koniec każdego stopnia pompowania są wyraźnie widoczne (fig. 2). Świadczy to o właściwym doborze czasu pompowania, ponieważ depresja nie wykazuje jeszcze oznak stabilizacji. Podczas interpretacji testu wielostopniowego metodą Edena i Hazela, a także w trakcie analizy wyników z pierwszej depresji za pomocą metody Theisa, otrzymano porównywalne wartości przewodności hydraulicznej wynoszące odpowied-

nie: 7,85·10⁻⁵ i 7,83·10⁻⁵ m²/s. Również zbliżona, choć nieco wyższa, była wartość przewodności określona na podstawie analizy wzniosu – 8,33·10⁻⁵ m²/s. Natomiast zdecydowanie wyższa od pozostałych jest przewodność hydrauliczna obliczona metodą Hantusha (1,07·10⁻⁴ m²/s). Może to być spowodowane tym, że warunki jej stosowania nie w pełni odpowiadają warunkom hydrogeologicznym, w jakich otwór B jest usytuowany.

Otworem C ujęto wodę termalną z utworów triasu. Warstwa wodonośna o charakterze naporowym i warunkach artezyjskich została udostępniona w całości. Pompowanie przeprowadzono na pięciu stopniach dynamicznych w czasie odpowiednio (w godzinach): 14, 8, 8, 9^{1/2} i 1. Badania wykonane zostały w warunkach samowypływu (w trakcie badań rejestrowano automatycznie ciśnienie na głowicy). Zaobserwowano bardzo szybką stabilizację warunków ciśnienia na każdym stopniu pompowania. Właściwie zauważalny jest nawet niewielki wzrost ciśnienia w czasie, zwłaszcza w początkowych stopniach testu (fig. 2). W celu wprowadzenia danych do obliczeń za pomocą programu Aquifer^{Win32}, ciśnienie na głowicy otworu przeliczone zostało na odpowiadające mu położenie zwierciadła wody. Uzyskane wyniki z otworu C charakteryzują się największym rozrzutem spośród wszystkich trzech otworów. Najmniejszą wartość przewodności, wynoszącą 9,65·10⁻⁵ m²/s uzyskano, analizując wznios zwierciadła (a właściwie odbudowę ciśnienia) po zakończeniu pompowania. Interpretacja testu wielostopniowego (Edena i Hazela) pozwoliła na uzyskanie przewodności hydraulicznej równej 1,46·10⁻⁴ m²/s. Przy zastosowaniu klasycznej metody Theisa obliczona wartość przewodności była wyższa od poprzednich i wynosiła 3,89·10⁻⁴ m²/s. Największą wartość przewodności hydraulicznej, równą 4,05·10⁻⁴ m²/s, uzyskano stosując metodę Moench dla warstwy wodonośnej

o charakterze szczelinowym. Tak duży rozrzut uzyskanych wyników należy upatrywać z jednej strony w tym, że test przeprowadzony był w warunkach samowypływu, gdzie trudno utrzymać stały wydatek, z drugiej zaś w niewłaściwym doborze schematu przeprowadzonego pompowania. Wydaje się, że bardziej odpowiedni byłby w tym przypadku test jednostopniowy ze stałym (fig. 1C), maksymalnym lub ewentualnie wzrastającym (fig. 1D) wydatkiem (do regulacji wydatku należałoby zastosować odpowiednie zwężki). Duże

znaczenie ma również sposób pomiaru ciśnienia. W przypadku otworów termalnych zalecany jest pomiar ciśnienia dennego, nie głowicowego (Kapuściński i in., 1997). Pozwala to na uniknięcie efektu podnoszenia się zwierciadła wody termalnej (lub wzrostu ciśnienia głowicowego) na skutek zmiany jej gęstości wraz ze wzrostem temperatury w trakcie trwania testu.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza wskazuje, że bardzo ważną kwestią przy określaniu parametrów filtracyjnych w procesie dokumentowania zasobów wód podziemnych (zwykłych, solanek, termalnych) za pomocą pompowań testowych jest nie tylko właściwy dobór metody interpretacji, ale również odpowiednie zaprojektowanie (schemat i czas) oraz późniejsze przeprowadzenie samego testu (zastosowanie odpowiednich urządzeń i aparatury pomiarowej). Jest to kluczowy problem, ponieważ tylko dzięki rzetelnym danym pomiarowym można uzyskać wiarygodne parametry filtracyjne, na podstawie których szacowana jest wielkość zasobów ujęcia. Przy wyborze metody interpretacji należy uwzględnić stwierdzone warunki hydrogeologiczne. Każda metoda ma swój

określony zakres stosowania. Niejednokrotnie zbyt daleko idące uproszczenie w tym względzie może prowadzić do zasadniczych błędów interpretacyjnych. Pompowania testowe mogą być z powodzeniem stosowane przy dokumentowaniu zasobów ujęć każdego typu wód podziemnych pod warunkiem prawidłowego ich przeprowadzenia i właściwej interpretacji wyników. Należy mieć nadzieję, że dalsze upowszechnienie i rozwój aplikacji komputerowych wspomagających interpretację wyników pompowań testowych, zdecydowanie bardziej pracochłonna niż w przypadku warunków ustalonych, przyczyni się do szerszego stosowania testów hydrodynamicznych w codziennej praktyce dokumentacyjnej.

LITERATURA

- COOPER H.H., JACOB C.E., 1946 — A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Am. Geophys. Union Trans.*, **27**: 526–534.
- DĄBROWSKI S., PRZYBYŁEK J., 2005 — Metodyka próbnych pompowań w dokumentowaniu zasobów wód podziemnych. Bogucki Wyd. Nauk., Poznań.
- EDEN R.N., HAZEL C.P., 1973 — Computer and graphical analysis of variable discharge pumping tests of wells. *Civil Engineering. Trans. Inst. Eng. Austr.*, 5–10.
- ENVIRONMENTAL SIMULATIONS INC., 2003 — Aquifer^{Win32} (WinFlow) WinTran, vers. 3. Guide to using.
- HANTUSH M.S., 1961 — Drawdown around a partially penetrating well. *J. Hydraul. Div.*, **87** (HY4): 83–98.
- KAPUŚCIŃSKI J., NAGY S., DŁUGOSZ P., 1997 — Zasady i metodyka dokumentowania zasobów wód termalnych i energii geotermalnej oraz sposoby odprowadzania wód zużytych. Poradnik metodyczny. Min. Ochr. Środ., Zas. Nat. i Leśn., Warszawa.
- KRUSEMAN G.P., DE RIDDER N.A., 1990 — Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. 2nd edition. *ILRI publication*, **47**.
- MOENCH A.F., 1984 — Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. *Water Resour. Res.*, **20**, 7: 831–846.
- THEIS C.V., 1935 — The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Am. Geophys. Un. Trans.*, **16**: 519–524.

SUMMARY

Pumping tests are a basic research method, based on which exploitation resources of groundwater intakes and filtration parameters of the aquifer are determined. Such pumping can be performed in the steady, quasi-steady or unsteady flow. The study present the results of pumping tests performed in three wells marked as A, B and C. The wells were

chosen in such a way as to represent different geological and hydrodynamic conditions. Pumping in all the wells was carried out in an unsteady flow regime as a multi-step pumping test. Hydraulic parameters were determined using the Aquifer^{Win32} Modeling Version 3.0 (Environmental Simulations, Inc.). To interpret the results of the multi-step pumping,

a method described by Eden and Hazel (Eden, Hazel, 1973) was used. The results of pumping on the first depression (drawdown) in each of the wells were used as a single-step test. For this purpose, the methods by Theis (Theis, 1935), Cooper and Jacob (Cooper, Jacob, 1946), Hantush (Hantush, 1961) and Moench (Moench, 1984) were applied (depending on the hydrogeological conditions for selected well). For all of the wells, analysis of the uplift was also performed, which is a recovery of water level following the pumping. In this case, interpretation was based on the Theis solution. The results are summarized in Table 1. After analysing the research

results some conclusions may be raised. Correct interpretation of pumping tests depends largely on the proper design of the test method (pumping scheme). Very important is also the selection of an appropriate measuring apparatus and appropriate devices for securing the assumed pumping regime. These factors ensure the reliability of the results (measured depression at the constant discharge). Only reliable measurement data, in conjunction with a properly matched method of interpretation of the hydrogeological conditions will allow for reliable calculation of the filter parameters of the aquifer.

