

Tadeusz Solecki*

**OCENA ZASOBÓW EKSPLOATACYJNYCH
UJĘCIA WÓD PODZIEMNYCH
CZWARTORZĘDOWEGO POZIOMU WODONOŚNEGO,
WYBRANEJ CZĘŚCI KRAKOWA,
W ASPEKCIE MOŻLIWOŚCI ZAOPATRZENIA W WODĘ
I POZYSKANIA ENERGII CIEPLNEJ****

1. WSTĘP

Problem analizowany w artykule dotyczy rejonu północno-zachodniej części Krakowa, która aktualnie znajduje się poza strefą zasilania w wodę z miejskiej sieci wodociągowej. Zaopatrzenie w wodę odbywa się w tej części Krakowa z indywidualnych ujęć wód podziemnych stanowiących studnie wiercone.

Ujęcia te wykorzystują wody podziemne czwartorzędowego poziomu wodonośnego. Zasoby eksploatacyjne poszczególnych ujęć wód podziemnych, mogą znacznie przekraczać w tym rejonie zapotrzebowanie na wodę do celów pitnych i sanitarnych.

W związku z tym, w artykule podjęto próbę oceny zasobów eksploatacyjnych typowego rzeczywistego ujęcia wód podziemnych, niebędących kopalinami w rozumieniu ustawy prawo geologiczne i górnicze [8]. Ujęcie oznaczone identyfikatorem S-1 zostało zaprojektowane i wykonane zgodnie z normami: PN-G-02318:1994, PN-93/G-02319 i PN-G-02321:1997 [12].

W niniejszym artykule zasoby eksploatacyjne ujęcia S-1 zostały przeanalizowane w aspekcie możliwości zaopatrzenia w wodę do celów pitnych i na potrzeby sanitarne, z równoczesnym pozyskaniem energii cieplnej do celów grzewczych, z wody podziemnej

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Opracowano w ramach badań własnych

pochodzącej z samego tego ujęcia. Woda z tego ujęcia cechuje się stosunkowo niską temperaturą (12 °C), w związku z tym nie daje możliwości bezpośredniego zastosowania w instalacjach grzewczych. W takich przypadkach mają zastosowanie pompy ciepła, które podnoszą energię na wyższy poziom termodynamiczny. Ciepło wody podziemnej stanowi tzw. dolne źródło ciepła, które ze względów ekonomicznych powinno znajdować się blisko pompy ciepła [2].

2. CHARAKTERYSTYKA HYDROGEOLOGICZNA TERENU LOKALIZACJI UJĘCIA S-1

Teren lokalizacji poddanego analizie ujęcia wód podziemnych położony jest w północno-zachodniej części Krakowa, w dzielnicy IV Prądnik Biały, na działce oznaczonej numerem 1443/7, obręb 33 Krowodrza.

Teren wyrównany nasypami, lekko nachylony w kierunku południa, o wysokościach bezwzględnych w granicach 230,9–232,3 m npm. Morfologicznie jest to skraj Wyżyny Krakowskiej – fragment stożka napływowego rzeki Prądnik, który znajduje się na południowym krańcu Monokliny Śląsko-Krakowskiej, na pograniczu z Niecką Miechowską i Zapadliskiem Przedkarpackim.

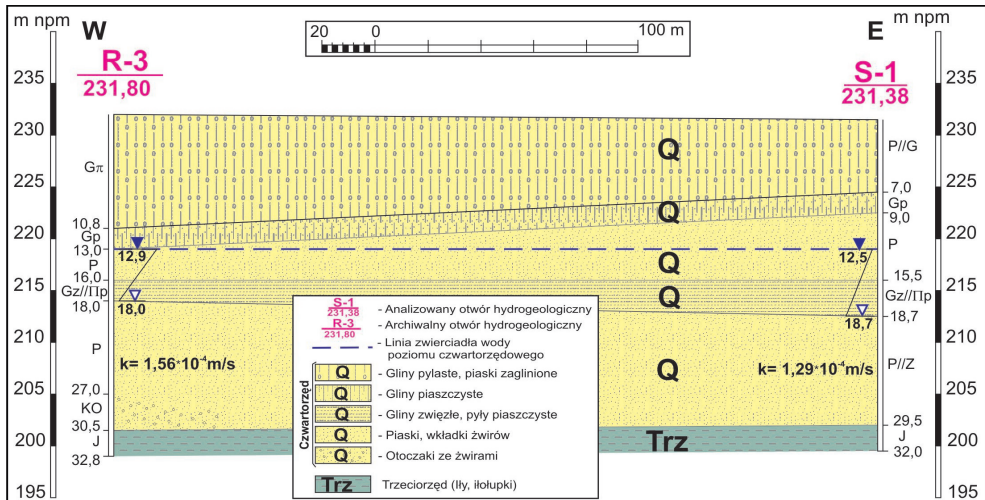
Teren lokalizacji ujęcia znajduje się w obrębie dwóch Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (GZWP). Charakterystyczne parametry tych zbiorników są następujące [3]:

- GZWP 450 – Dolina rz. Wisła (Kraków) – zbiornik w utworach doliny rzeki, szacunkowe zasoby dyspozycyjne 20 tys. m³/dobę, średnia głębokość ujęć 15–30 m,
- GZWP 326 – Zbiornik (J3) Częstochowa (E) – zbiornik w utworach jury górnej, szacunkowe zasoby dyspozycyjne 1020 tys. m³/dobę, średnia głębokość ujęć 160 m.

W tym rejonie ujmowane są wody podziemne występujące w obrębie utworów czwartorzędowych, tj. osadów piaszczysto-żwirowych pochodzenia akumulacyjnego (stożek napływowy Prądnika). Zwierciadło wód tego poziomu charakteryzuje się generalnie stanem swobodnym niekiedy napiętym, jak to ma miejsce w przypadku analizowanego ujęcia.

Zasilanie tego poziomu odbywa się głównie drogą infiltracji opadów atmosferycznych poprzez pokrywę glin i pyłów. Spływ wód podziemnych w utworach czwartorzędowych następuje w kierunku południowym. Dla analizowanego ujęcia czwartorzędowa warstwa wodonośna charakteryzuje się współczynnikiem filtracji $k = 1,29 \cdot 10^{-4}$ m/s i. Dla innych ujęć z tego rejonu $k = (1,48-1,56) \cdot 10^{-4}$ m/s – dane archiwalne.

Przekrój hydrogeologiczny przez analizowane ujęcie oznaczone identyfikatorem S-1 i najbliższe istniejące ujęcie oznaczone identyfikatorem R-3 przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przekrój hydrogeologiczny z uwzględnieniem analizowanego ujęcia S-1

3. CHARAKTERYSTYKA TECHNICZNA I HYDRAULICZNA UJĘCIA S-1

Ujęcie wód podziemnych stanowi otwór wiertniczy, wykonany do głębokości 32 m p.p.t., za pomocą urządzenia wiertniczego typu US-100, przeznaczonego do wierceń mechanicznych – udarowych, bez stosowania płuczki wiertniczej.

Konstrukcja ujęcia składa się z rur wiertniczych stalowych DN 18" (kolumna wstępna do głębokości 8,0 m) i filtra kolumnowego z rur PCV-U o następujących parametrach:

- rura nadfiltrowa PCV-U – średnica DN 200 mm, $L_n = 23,0$ m,
- część czynna (filtr właściwy) PCV-U – średnica DN 200 mm, perforacja szczelinowa pozioma 1 mm – $L_f = 6,0$ m,
- rura podfiltrowa PCV-U – średnica DN 200 mm – $L_p = 3,0$ m,
- rurę podfiltrową zakończyć standardowym dnem z PCV,
- w dolnej, środkowej i górnej części filtra umieszczono prowadniki dla wymuszenia równomiernej przestrzeni pierścieniowej i grubości obsypki żwirowej.

W przestrzeni pomiędzy ścianą otworu a kolumną rur filtrowych PCV-U umieszczono:

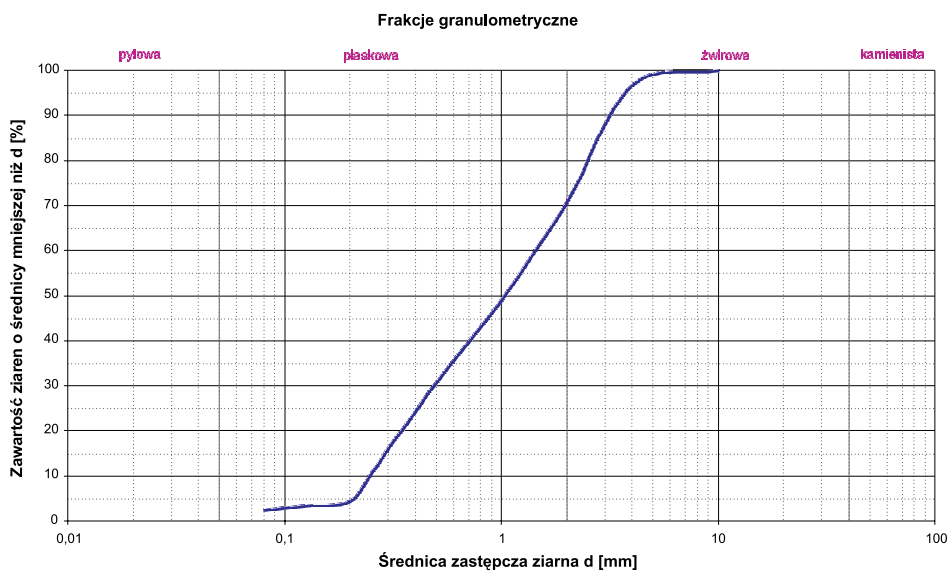
- obsypkę żwirową – w interwale 32,0–20,0 m p.p.t.,
- warstwę piasku gruboziarnistego – w interwale 20,0–19,0 m p.p.t. (o wysokości ok. 1,0 m, w celu stworzenia strefy buforowej od następnej części wypełnienia przestrzeni pierścieniowej otworu co zapobiega wniknięciu ilastego materiału izolacyjnego między ziarna obsypki),
- materiał uszczelniający – w interwale 19,0–7,0m ppt (nieprzepuszczalny dla wody ił bentonitowy),

- wypełnienie urobkiem wiertniczym – w interwale 19,0–7,0m p.p.t. (urobek odpowiadający składem skałom występującym w strefie przyotworowej w tym interwale).

Do budowy zastosowano wysokiej jakości atestowane materiały, stanowiące elementy składowe konstrukcji ujęcia:

- filtr kolumnowy – rury PCV-U [9],
- obsypka filtra – żwir filtracyjny [10],
- materiał uszczelniający z bentonitu [11].

Przepustowość hydrauliczna filtra została określona na podstawie nomogramów producenta i wynosi $5,5 \text{ m}^3/\text{h}$ na 1mb filtra przy napływie wody 10^{-2} m/s [10]. W celu doboru obsypki żwirowej wykonano analizę sitową uśrednionej próbki pobranej z interwału czynnej części filtra. Wyniki analizy sitowej materiału skalnego warstwy wodonośnej przedstawiono na rysunku 2.



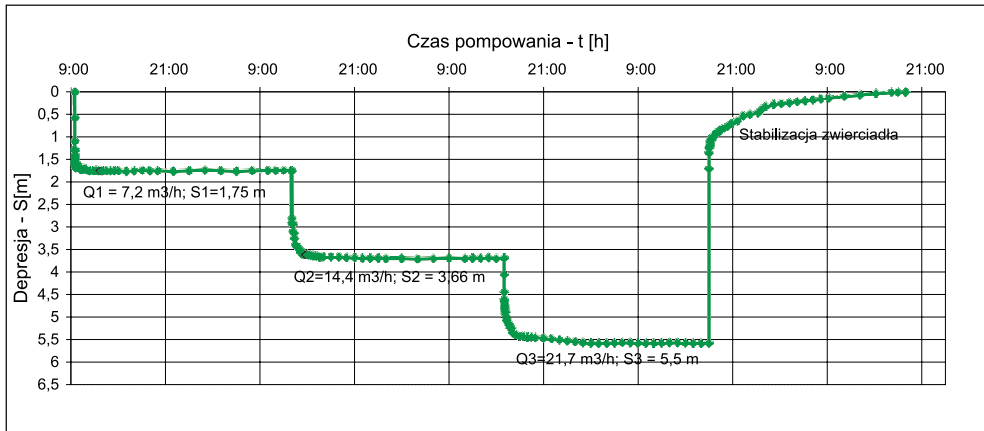
Rys. 2. Krzywa granulometryczna próbki warstwy wodonośnej

W oparciu o krzywą granulometryczną próbki materiału warstwy wodonośnej dobrano obsypkę żwirową zgodnie z normą PN-88/B-06715.

W celu poprawy parametrów hydraulicznych strefy przyfiltrowej przeprowadzono pompowanie oczyszczające strefę przyfiltrową z drobnych cząstek pylistych i piaszczystych. Pompowanie oczyszczające prowadzono przez 24 godziny, zgodnie z założeniami projektowymi [12], stosując zasadę, że wydatek pompowania oczyszczającego Q_{pomax} powinien być o 20% wyższy od wydatku maksymalnego pompowania pomiarowego Q_{ppmax} . W omawianym przypadku $Q_{pomax} = 26,0 \text{ m}^3/\text{h}$.

4. PRÓBNE POMPOWANIE POMIAROWE UJĘCIA S-1 I ANALIZA WYNIKÓW POMPOWANIA

W celu określenia zasobów ujęcia wykonano pompowanie pomiarowe, w warunkach ustalonych przez 24 godz., w odniesieniu do trzech stopni pompowania przy różnych ustalonych wydatkach Q_i oraz różnych ustalonych depresjach S_i , stosując następującą ogólną zasadę przyjętą w praktyce: $Q_1 = 1/3Q_{max}$; $Q_2 = 2/3Q_{max}$; $Q_3 = Q_{max}$. Wykres przebiegu pompowania w czasie rzeczywistym przedstawiono na rysunku 3.



Rys 3. Przebieg pompowania w czasie rzeczywistym

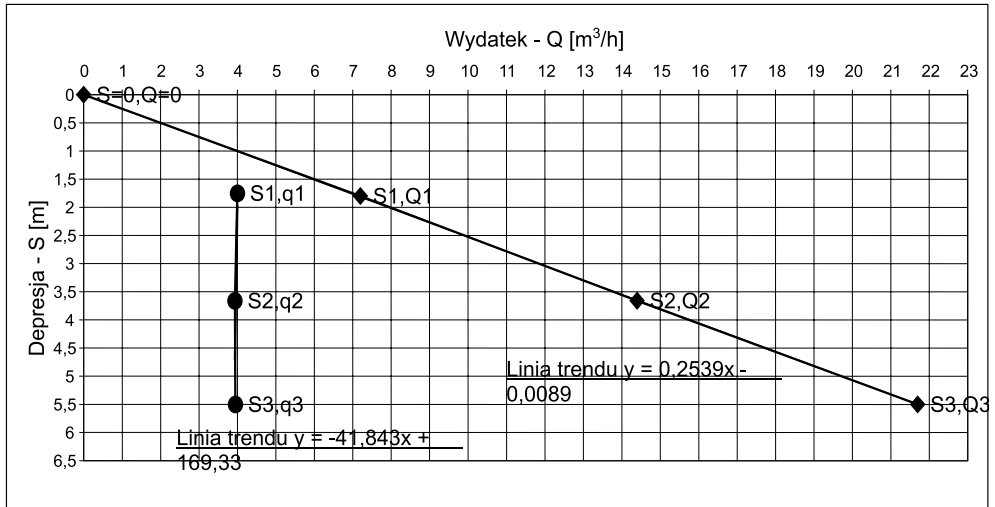
$Q_{max} = 21,0 \text{ m}^3/\text{h}$, wyznaczono w projekcie prac geologicznych [12] na podstawie obliczeń. W rzeczywistości pompowanie prowadzono z niewielką różnicą, osiągając wydatek $Q_{max} = 21,7 \text{ m}^3/\text{h}$, co wynikało z precyzji regulacji natężenia strumienia wypływu wody, podczas prowadzenia pompowania. Zestawienie wyników pomiarów pompowania i obliczeń zawarto w tabeli 1.

Tabela 1

Zestawienie wyników próbnego pompowania

Wydatek Q_i [m^3/h]	Depresja S_i [m]	$q_i = Q_i/S_i$	$q(\text{max})/q(\text{min})$	$q' = Q/s^{0,5}$	$q'(\text{max})/q'(\text{min})$	$q'' = Q/(s^{2/3})$	$q''(\text{max})/q''(\text{min})$
Q1=7,20	S1=1,75	q1=4,11	3,14	5,44	1,70	4,96	1,40
Q2=14,4	S2=3,66	q2=3,93		7,53		6,06	
Q3=21,7	S3=5,5	q3=3,95		9,25		6,96	

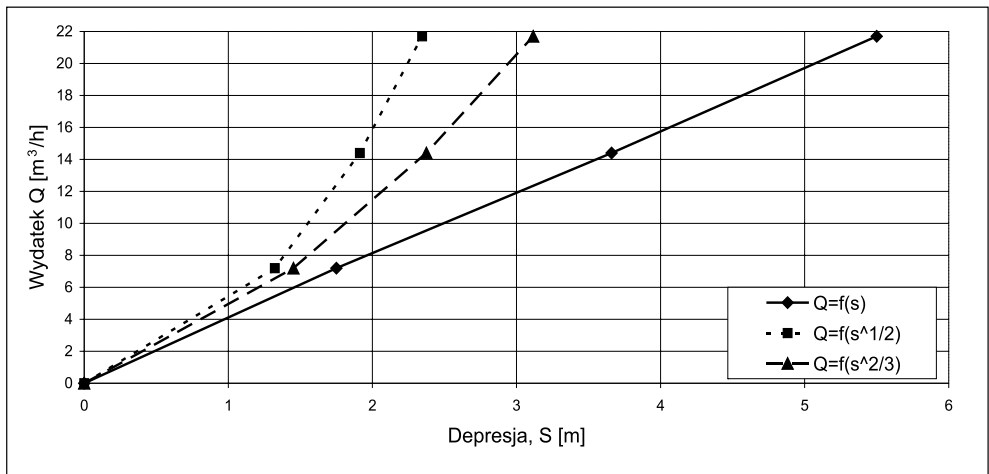
Interpretując wyniki próbnego pompowania sporządzono wykresy diagnostyczne $Q = f(s)$ oraz $q = f(s)$ – rysunek 4.



Rys. 4. Wykresy diagnostyczne $Q = f(s)$, $q = f(s)$

Na podstawie analizy wykresów diagnostycznych $Q = f(s)$ i $q = f(s)$ określono, że odpowiadają one znanym z literatury przebiegom dla studni eksploatowanych w warunkach naporowych [5, 6].

Do określenia rodzaju filtracji w strefie przyfiltrkowej sporządzono wykresy diagnostyczne $Q = f(s)$, $Q = f(s^{1/2})$, $Q = f(s^{2/3})$ – rysunek 5. Z przebiegu wykresów wynika, że linii prostej odpowiada funkcja $Q = f(s)$, co wskazuje na filtrację laminarną w strefie dopływu do ujęcia.



Rys. 5. Wykresy diagnostyczne $Q = f(s)$, $Q = f(s^{1/2})$, $Q = f(s^{2/3})$

Obliczenia parametrów hydrogeologicznych ujmowanego poziomu wodonośnego, zasobów ujęcia, depresji, zasięgu leja depresji, ustalenie granic obszaru zasilania tego ujęcia, obszaru zasobowego, kierunków i prędkości rzeczywistej dopływu wód do ujęcia, przeprowadzono wykorzystując schemat Dupuita dopływu wody do ujęcia, eksploatowanego w warunkach naporowych, studnią niezupełną. Wpływ niezupełności studni na jej wydatek skorygowano poprawką Forchheimera [7].

W formule Dupuita opisującej dopływ wody do ujęcia występują dwie niewiadome (współczynnik filtracji k oraz zasięg leja depresji R), dlatego wstępnie oszacowano współczynnik filtracji k_e , według empirycznej formuły USBC [6]. Następnie, wykorzystując oszacowany współczynnik filtracji, obliczono zasięg leja depresji według formuły Sichardta [7]. Obliczoną wartość zasięgu leja depresyjnego zastosowano w formule Dupuita i metodą kolejnych przybliżeń dokonano wyliczenia współczynnika filtracji k_i oraz zasięgów leja depresji R_i dla każdego stopnia pompowania. Wyniki obliczeń hydrogeologicznych zestawiono w tabeli 2. Formuły obliczeniowe podano w notacji Excel.

Tabela 2
Wyniki obliczeń hydrogeologicznych

1. Współczynnik filtracji z krzywej uziarnienia			
	oznaczenie	wynik obliczeń	jednostka
DANE:	d_{20}	0,33	mm
Formuła USBC: $k=0,036d(20)^{2,3}$			
Wynik obliczeń	k	0,000281115	m/s
2. Zasięg leja depresji (współczynnik filtracji z krzywej uziarnienia)			
DANE:	S_1	1,75	m
	S_2	3,66	m
	S_3	5,5	m
Formuła Sichardta: $R=3000*S*k_e^{0,5}$			
Wyniki obliczeń	R_1	88,02	m
	R_2	184,10	m
	R_3	276,65	m
3. Korekta schematu Dupuita dopływu wody do ujęcia			
DANE:	l	6,0	m
	m	10,8	m
Formuła Forchheimera : $b=(l/m)^{0,5}*((2m-l)/m)^{0,25}$			
Wynik obliczeń	b	0,82	

Tabela 2 cd.

4. Współczynnik filtracji k_{pi} i zasięg leja depresji R_{pi} na podstawie próbnego pompowania			
	oznaczenie	wynik obliczeń	jednostka
DANE:	Q_1	1,75	m
	Q_2	3,66	m
	Q_3	5,5	m
Formuła Dupuita: $k=(0,366*Q(\log(R)-\log(r)))/(m*S*b)$			
Wyniki obliczeń współczynnika filtracji k_{pi}	$kp1$	0,000120	m/s
	$kp2$	0,000129	m/s
	$kp3$	0,000138	m/s
	$kp\bar{s}$	0,000129	m/s
Wyniki obliczeń promienia zasięgu leja depresji R_{pi}	$Rp1$	59,63	m
	$Rp2$	124,72	m
	$Rp3$	187,42	m

5. ZASOBY EKSPLOATACYJNE UJĘCIA I JAKOŚĆ WODY PRZEZNACZONEJ DO EKSPLOATACJI

Zestawienie podstawowych parametrów hydrogeologicznych i eksploatacyjnych analizowanego ujęcia wody podziemnej, ustalone na podstawie próbnego pompowania pomiarowego, z dopływem wody w warunkach ustalonych, zawiera tabela 3.

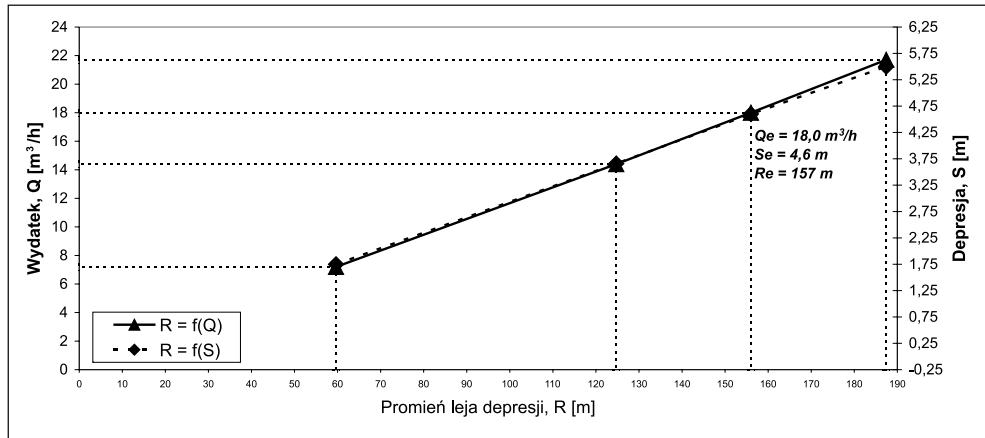
Prędkość rzeczywista dopływu wód do ujęcia wyznaczona z zależności Darcy ($v = k*i$), z uwzględnieniem współczynnika porowatości skał warstwy wodonośnej, wynosi $v_{rz} = (k*i)/n_e$. Kierunki dopływu wód do ujęcia wyznaczane są przez linie prądu, które są w rozpatrywanym przypadku prostopadłe do linii równych ciśnień wyznaczanych przez wywołany eksploatacją lej depresji i bieżą radialnie w warstwie wodonośnej do osi otworu [1].

Na podstawie wyników pompowań i wyników obliczeń zamieszczonych w tabelach 1 i 2 wykreślono zależności $Q = f(R)$ oraz $S = (fR)$ (rys. 6). Z tych wykresów wyznaczono zasięg leja depresyjnego $Re = 157$ m, dla wartości wydatku eksploatacyjnego $Q_e = 18,0$ m³/h, równemu maksymalnemu wydatkowi dopuszczalnemu Q_{dop} , obliczonemu z uwzględnieniem formuły Sichardta, określającej dopuszczalne prędkości wlotowe do filtra [6].

Jako granice obszaru zasilania oraz obszaru zasobowego można przyjąć, na podstawie obliczeń przeprowadzonych dla analizowanego ujęcia, okrąg o promieniu $Re = 157$ m, mając na uwadze, że zgodnie z definicją [4], pod pojęciem obszar zasobowy rozumie się fragment zbiornika wód podziemnych ograniczony zasięgiem spływu wód podziemnych do ujęcia, w obrębie którego formuje się co zasadnicza część zasobów eksploatacyjnych tego ujęcia.

Tabela 3
Zestawienie podstawowych parametrów ujęcia

Oznaczenie	Parametr	Wynik obliczeń
A. Parametry hydrogeologiczne		
m	miąższość warstwy wodonośnej [m]	10,8
n_e	współczynnik porowatości	0,34
U	współczynnik nierównomierności uziarnienia	4,5
k_{śr}	średni współczynnik filtracji warstwy wodonośnej [m/s]	0,000129
T	przewodność hydrauliczna warstwy wodonośnej [m ² /s]	0,001393
B. Parametry eksploatacyjne		
Q_e	wydatek eksploatacyjny [m ³ /h]	18,00
S_e	depresja eksploatacyjna [m]	4,60
q_e	wydatek eksploatacyjny jednostkowy [m ³ /(h*m)]	3,91
R_e	promień zasięgu leja depresyjnego przy Q _e i S _e [m]	157
i	średni spadek hydrauliczny na krzywej depresji [-]	0,029
v	prędkość Darcy [m/s]	0,0000037
v_{rz}	prędkość rzeczywista [m/s]	0,000011



Rys. 6. Zależność zasięgu leja depresji od wydajności Q i depresji S

Ustalone zasoby eksploatacyjne ujęcia, zgodnie z definicją [4], rozumiane jako dopuszczalna ilość wód podziemnych przy określonym sposobie eksploatacji, uwzględniająca

ograniczenia związane z wymaganiami ochrony środowiska i warunkami techniczno-ekonomicznymi poboru wody, wynoszą dla analizowanego ujęcia $Q_e = 18 \text{ m}^3/\text{h}$, przy depresji eksploatacyjnej $Se = 4,60 \text{ m}$.

Przeprowadzony bilans dobowego maksymalnego zapotrzebowania z tego ujęcia na wodę pitną i do celów sanitarnych wynosi wykazuje $Q_{psmax} = 1,5 \text{ m}^3/\text{d}$.

Wobec powyższego dla celów grzewczych pozostaje woda z tego ujęcia do wykorzystania w ilości $Q_g = 430,5 \text{ m}^3/\text{d}$.

6. WNIOSKI

1. W północno-zachodniej części Krakowa występuje czwartorzędowy poziom wodonośny wykorzystywany do celów pitnych i sanitarnych, ze względu na brak możliwości korzystania z miejskiej sieci wodociągowej.
2. Na podstawie testowania istniejącego ujęcia wody podziemnej, przeznaczonego do eksploatacji czwartorzędowego poziomu wodonośnego ustalono, że zasoby eksploatacyjne tego ujęcia znacznie przekraczają zapotrzebowanie na wodę do celów pitnych i sanitarnych.
3. Z bilansu zasobów eksploatacyjnych wynika, że pokrywając zapotrzebowanie na wodę do celów pitnych i sanitarnych w ilości $1,5 \text{ m}^3/\text{dobę}$, pozostaje do innych celów $430,5 \text{ m}^3/\text{dobę}$ wody możliwej do wydobycia z analizowanego ujęcia.
4. Z literatury wynika, że geotermia o niskiej entalpii rozwija się dynamicznie w wielu krajach świata, przyczyniając się do zrównoważonego rozwoju, dlatego, idąc za ich przykładem, należy wykorzystać nadmiar zasobów eksploatacyjnych analizowanego ujęcia do celów grzewczych.

LITERATURA

- [1] Driscoll F.G.: *Groundwater and Wells*. Johson Screens, St. Paul 1995
- [2] Kapuściński J., Rozdoch A.: *Geotermia niskotemperaturowa w Polsce – stan aktualny i perspektywy rozwoju*. MŚ; NFOŚiGW, Warszawa 2006
- [3] Kleczkowski A. (red.): *Mapa obszarów Głównych Zbiorników Wód Podziemnych*. AGH, Kraków 1990
- [4] leczkowski A., Rózkowski A. (red.): *Słownik hydrogeologiczny*. MŚZNiL, Warszawa 1997
- [5] Łaciak S., Solecki T., Świątek R.: *Eksploatacja i obsługa ujęć wód podziemnych*. AGH Skrypty Uczelniane nr 592, Kraków 1977
- [6] Pazdro Z.: *Hydrogeologia ogólna*. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1983
- [7] Szczepański A. (red.): *Metodyka określania zasobów eksploatacyjnych zwykłych wód podziemnych. Poradnik metodyczny*. Borgis, Warszawa 2004

- [8] Ustawa z dnia 4 lutego 1994 r. Prawo geologiczne i górnicze (Dz. U. Nr 27, poz. 96 z póź. zmianami)
- [9] Katalogi producenta filtrów studziennych. Pol-BUD, Łódź 2009
- [10] Karta informacyjna dla łu bentonitowego TBS. Best Drilling Chemicals, Kraków 2005
- [11] Karta atestu kontroli jakości żwiru filtracyjnego nr 11/2005. Spółdzielnia pracy Surowców Mineralnych, Opole 2005
- [12] Materiały źródłowe Wojewódzkiego Archiwum Geologicznego. Kraków 1983–2008