

## Interpretacja wyników pomiarów z poziomu wodonośnego objętego drenażem górniczym na przykładzie analizy obserwacji z sieci monitoringowej KGHM Polska Miedź S.A. wykonanych podczas odwadniania szybu GG-1

Maciej Pikula<sup>1</sup>, Roman Becker<sup>2</sup>

**Interpretation of measurement data from an aquifer affected by mine drainage, based on the example of an analysis of observations from the monitoring network of KGHM Polska Miedź S.A., performed during the dewatering of the GG-1 shaft.** Prz. Geol., 72: 162–173; doi: 10.7306/2024.5

*Abstract.* The article presents an analysis of measurements from the groundwater monitoring network of KGHM Polska Miedź S.A. which were taken during the dewatering of the GG-1 shaft, after water inflow from the Main Dolomite aquifer. Measurements from the dewatered shaft and piezometers were interpreted using methods designed for pumping test in AquiferTest Pro v. 10.0 software. Based on the analysis of measurement data from a longer period of time than the dewatering itself, a systematic decrease in the water table in the observed aquifer was found, which is caused by mining drainage of the resources of the described aquifer. In order to eliminate the influence of mine drainage on the position of water table in the analysed piezometers, trend lines of changes in the position of the water level in the observed aquifer was determined. On this basis, the magnitude of the drawdown measured in the observation boreholes was corrected before calculations were made using selected analytical methods.

**Keywords:** hydrogeology, groundwater monitoring, Fore-Sudetic Monocline, deep boreholes, pumping test, mine shaft dewatering, mine drainage

Podziemna eksploatacja złóż kopalin zazwyczaj wpływa na środowisko wód podziemnych. Wody z poszczególnych poziomów wodonośnych mogą dopływać do wyrobisk górniczych, co powoduje konieczność stosowania odwodnień i oddziałuje na stan ilościowy drenowanych wodonośców. W rejonie złoża kopaliny na etapie poszukiwania i rozpoznawania złoża oraz w czasie jego eksploatacji, a także po jej zakończeniu – na etapie likwidacji zakładu górniczego – wykonuje się badania hydrogeologiczne w otworach wiertniczych oraz obserwacje wód podziemnych w sieci monitoringowej. Wyniki badań i obserwacji umożliwiają właściwe rozpoznanie i następnie zwalczanie zagrożenia wodnego w zakładzie górniczym, a także są wykorzystywane do oceny wpływu działalności górniczej na środowisko wód podziemnych.

Szyb GG-1 jest obiektem kopalni O/ZG Polkowice-Sieroszowice KGHM Polska Miedź S.A. zlokalizowanym na terenie złoża rud miedzi Głogów Głęboki-Przemysłowy (ryc. 1). Budowę szybu rozpoczęto w 2013 r., głębienie zakończono w 2022 r. Docelowa głębokość szybu to 1351 m (<http://pebeka.com.pl>). Przed rozpoczęciem drążenia szybu w jego planowanej lokalizacji wykonano badania geologiczne w otworach „podszybowych” S-439A i S-439B (Gruszecki i in., 2009; Chudy i in., 2017). Podczas głębienia szybu GG-1 na przełomie 2017/2018 r. miał miejsce dopływ wody do szybu z poziomu wodonośnego dolomitu głównego. Woda do szybu dopływała poprzez otwór rozpoznawczy wykonany z poziomu ówczesnego dna szybu (1070 m p.p.t.). Wspomnianym otworem ujęto 17,2 m utworów wodonośnych dolomitu głównego (całkowita miąższość warstwy wodonośnej 20,8 m).

W okresie od 3.12.2017 r. do 5.02.2018 r. szyb GG-1 odwadniano z wydajnością od 0,06 do 108,63 m<sup>3</sup>/h. Wzmoczony dopływ z poziomu Ca2 przypadał na okres od

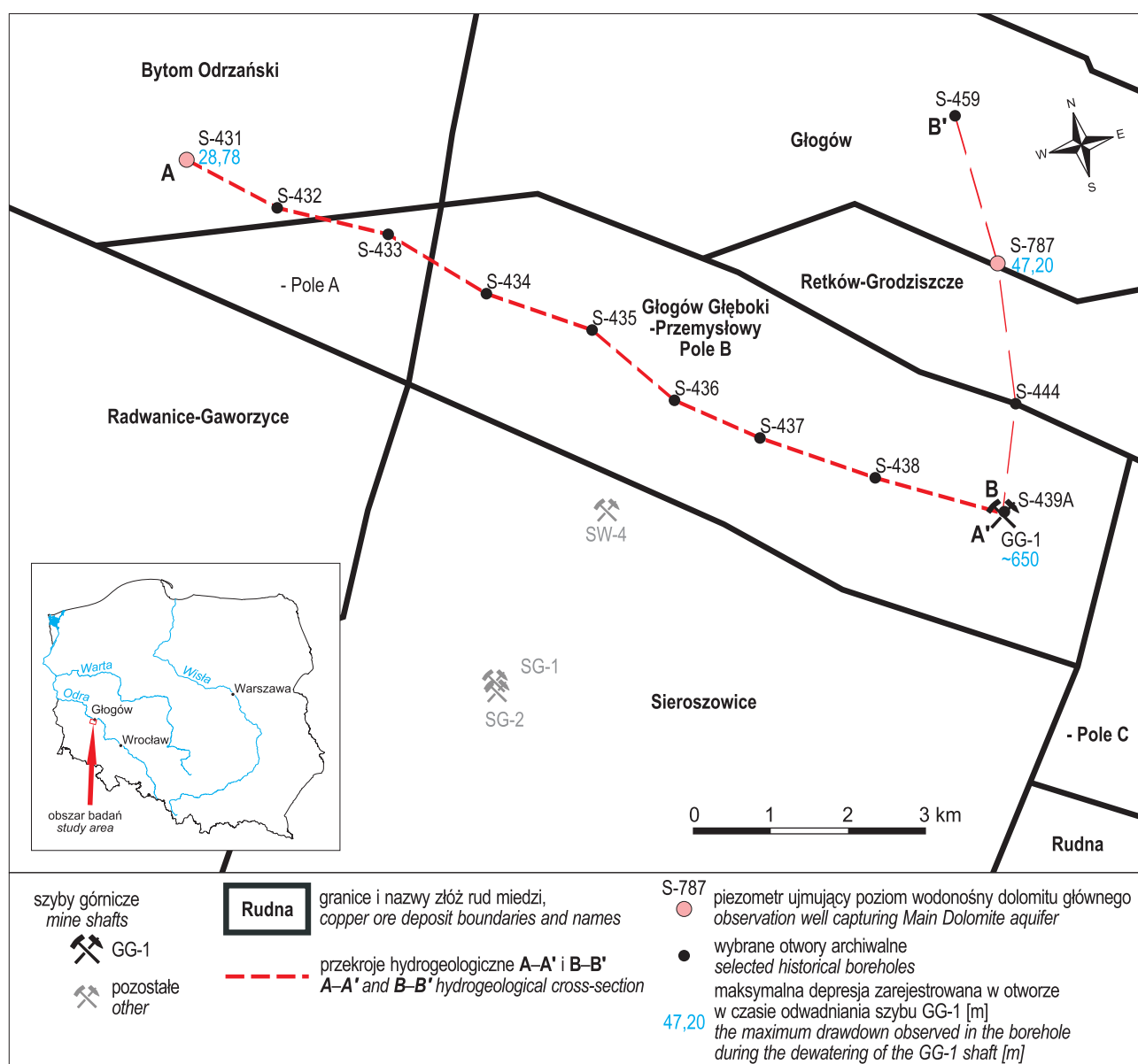
3.12.2017 do 19.01.2018 r. – wydajność systemu odwodnienia w tym przedziale czasowym wahała się od 37,49 do 108,63 m<sup>3</sup>/h, średnio 87,5 m<sup>3</sup>/h. W późniejszym okresie, na skutek zastosowania zabiegu uszczelnienia górotworu, dopływ do szybu uległ wyraźnemu obniżeniu, a wydajność systemu odwadniania wynosiła od 0,06 do 9,60 m<sup>3</sup>/h, średnio 7,76 m<sup>3</sup>/h. W całym podanym okresie z szybu wypomowano ok. 102 tys. m<sup>3</sup> wody. Szacunkową, maksymalną wartość depresji lustra wody odwadnianego poziomu wodonośnego wewnątrz szybu w końcowej fazie odwadniania z maksymalną wydajnością ocenia się na  $s \approx 650$  m.

Podczas odwadniania szybu GG-1 w piezometrach sieci obserwacyjnej KGHM Polska Miedź S.A. wykonywano pomiary położenia zwierciadła wód odwadnianego poziomu wodonośnego. Obserwacje były wykonywane w sposób zautomatyzowany oraz manualny (Szymański i in., 2018; Janicki i in., 2019).

Celem artykułu jest przeanalizowanie przydatności danych pomiarowych z sieci obserwacyjnej zakładu górniczego podczas prowadzenia odwadniania szybu górniczego na potrzeby określania parametrów filtracyjnych obserwowanej warstwy wodonośnej. W pracy zaprezentowano metodę analizy danych dla poziomu wodonośnego, którego stan ilościowy ulega zmianom w czasie, w wyniku długotrwałego drenażu górniczego, niezwiązanego z odwadnianiem szybu. Podczas przygotowania artykułu korzystano z danych pomiarowych z sieci obserwacyjnej wód podziemnych KGHM Polska Miedź S.A., wyników badań wykonanych w ramach poszukiwania i rozpoznawania złóż rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej oraz rezultatów opracowania sfinansowanego ze środków Funduszu Działalności Statutowej KGHM Cuprum Sp. z o.o. – Centrum Badawczo Rozwojowe pt. *Model warunków geologiczno-górniczych w obrębie poziomu dolomitu głównego*

<sup>1</sup> KGHM Cuprum Sp. z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe, ul. Sikorskiego 2-8, 53-659 Wrocław; [maciej.pikula@kghmcuprum.com](mailto:maciej.pikula@kghmcuprum.com); ORCID ID: 0000-0002-0102-8449

<sup>2</sup> KGHM Polska Miedź S.A., ul. M. Skłodowskiej-Curie 48, 59-301 Lubin; [roman.becker@kghm.com](mailto:roman.becker@kghm.com); ORCID ID: 0009-0005-3173-7595



**Ryc. 1.** Lokalizacja szybu GG-1 i analizowanych punktów obserwacyjnych  
**Fig. 1.** Location of the GG-1 shaft and the analysed observation wells

monokliny przedsudeckiej (Preidl i in., 1979; Szymański i in., 2018; Janicki i in., 2019; Pikuła i in., 2019; Ratajczyk i in., 2022). Wyniki badań archiwalnych, zrealizowanych bezpośrednio w otworach, zostały omówione w rozdziale *Metodyka*.

### OBSZAR BADAŃ

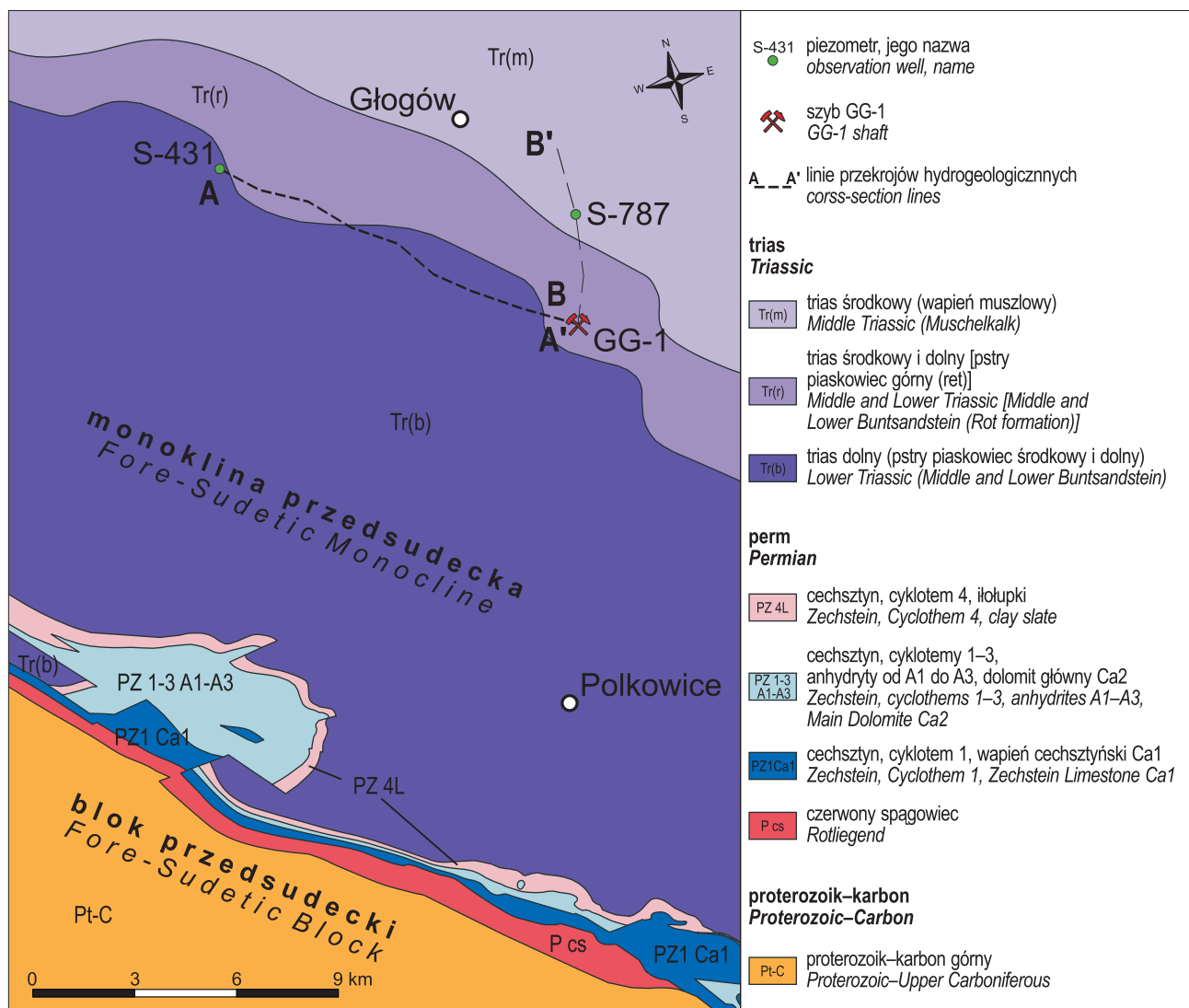
Złóża rud miedzi, które są eksploatowane podziemnie przez KGHM Polska Miedź S.A. na terenie monokliny przedsudeckiej, udokumentowano w osadach wieku permskiego – czerwony spągowiec, cechsztyń (ryc. 2).

Podłoże monokliny przedsudeckiej jest zbudowane ze skał krystalicznych (proterozoik) oraz skał osadowych (karbon, dewon). Skały podłoża są przykryte osadami permu i triasu, nachylonymi monoklinalnie ku północnemu wschodowi, pod niewielkim kątem. Powyżej zalegają niezgodnie utwory kenozoiczne (Walczyk-Augustyniak, 1995, 1997; Markiewicz i in., 2004; Badura, 2006, 2013; Kiersnowski, Petecki, 2017).

Najbardziej zgeneralizowany podział hydrogeologiczny obszaru miedzionośnego wyodrębnia dwa główne kompleksy wodonośne: kenozoiczny (górny) oraz triasowo-permski (dolny). Luźne utwory czwartorzędowe, neogenu i paleogenu składają się na kompleks górny, o porowym charakterze. Kompleks triasowo-permski budują zwięzłe, szczelinowo-porowe, niekiedy kawerniste skały wapienia muszlowego, pstrego piaskowca, cechsztynu i czerwonego spągowca (Becker i in., 2007). W kompleksie tym występują dwa piętra wodonośne: triasu i permu. W piętrze permskim wydzielono cztery poziomy wodonośne:

- poziom dolomitu lubińskiego (Ca3) (dolomity),
- poziom dolomitu głównego (Ca2) (dolomity),
- poziom wapienia cechsztyńskiego (Ca1) (wapienie, dolomity),
- poziom czerwonego spągowca (Pcs3) (piaskowce).

W poziomach wodonośnych: neogenu „międzywęglowego”, paleogenu „podwęglowego”, pstrego piaskowca górnego, dolnego i środkowego, dolomitu głównego, wapienia cechsztyńskiego i czerwonego spągowca, w wyniku powodzonych od kilkudziesięciu lat odwodnień gór-



Ryc. 2. Lokalizacja szybu GG-1 i analizowanych punktów obserwacyjnych na tle mapy geologicznej bez osadów kenozoicznych (Markiewicz i in., 2004, zmodyfikowane)

Fig. 2. Location of the GG-1 shaft and the analysed observation wells on geological map without Cenozoic sediments (Markiewicz et al., 2004, modified)

nicznych, wytworzył się lej depresyjny (Bocheńska, Wilk, 2003; Becker i in., 2007).

Poziom wodonośny dolomitu głównego budują skały węglanowe, niekiedy mocno spękane, porowate i kawerniste. W obszarze prowadzonych badań omawiany poziom ma charakter ciągły (ryc. 1). Miąższość utworów dolomitu głównego monokliny przedsudeckiej w rejonie złóż rud miedzi waha się od 0,5 do 40 m, średnio 13 m (sporadycznie zdarzają się wartości znacznie większe, rzędu 76 m, dotyczą jednak miąższości pozornych). W granicach obszaru badań skały tego wodonośca osiągają miąższość 3,5–38,5 m, średnio 18,6 m (ryc. 1 i 2). Dla analizowanych otworów S-431, S-439A i S-787 są to wartości od 19,8 m do 31 m, średnio 23,78 m. Współczynnik filtracji dolomitu głównego w rejonie monokliny przedsudeckiej w granicach obszaru występowania udokumentowanych złóż rud miedzi waha się od  $10^{-10}$  do  $10^{-4}$  m/s, średnio  $10^{-6}$  m/s, a przewodność hydrauliczna przyjmuje wartości od  $10^{-10}$  do  $10^{-3}$  m/s, średnio  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s (Pikuła i in., 2019). Utwory wodonośne dolomitu głównego charakteryzuje znaczna zmienność parametrów filtracyjnych, strukturalnych i litologicznych zarówno w rozprzestrzenieniu horyzontalnym, jak i wertykalnym. W profilach pojedynczych otworów

stwierdza się niekiedy występowanie stref niespękanych, praktycznie nieprzepuszczalnych, jak i stref silnie spękanych i kawernistych, o podwyższonej przepuszczalności. Podobną zmienność obserwuje się w otworach wiertniczych oddalonych od siebie o kilkadziesiąt, a nawet kilka metrów. Wody analizowanego poziomu na terenie monokliny przedsudeckiej wykazują wzrost mineralizacji wraz z głębokością, dla obszaru badań mineralizacja tych wód wynosi ok. 120–160 g/dm<sup>3</sup> (Kwaśny i in., 2019; Pikuła i in., 2019). Od mineralizacji wody oraz jej temperatury jest uzależniona wartość gęstości oraz lepkości dynamicznej wody, które wpływają na wielkość współczynnika filtracji (Head, Epps, 2011). W obliczeniach wykonanych za pomocą programu analitycznego uwzględniono gęstość wody z poziomu wodonośnego dolomitu głównego (1,09 g/cm<sup>3</sup>). Obliczona wartość współczynnika filtracji dotyczy wody o lepkości dynamicznej wody o temperaturze ok. 45°C.

Ustabilizowane zwierciadło poziomu wodonośnego Ca2 w obszarze miedzionośnym zalega na głębokości 23–553 m p.p.m. (stan na czerwiec 2018 r.). Największa udokumentowana depresja lustra wody jest obserwowana w rejonie złoża Sieroszowice (ponad 600 m). Dominujące kierunki przepływu wód podziemnych to południowy,

południowo-zachodni i południowo-wschodni (Pikuła i in., 2019).

Dla omawianego obszaru w rejonie szybu GG-1 przeanalizowano archiwalne wyniki badań hydrogeologicznych wykonanych w otworach wiertniczych: S-431, S-439A i S-787 (Preidl i in., 1979; Kozula i in., 1988; Gruszecki i in., 2009; Ratajczyk i in., 2022).

## METODYKA

### Pomiary wykonane w sieci obserwacyjnej podczas odwadniania szybu GG-1

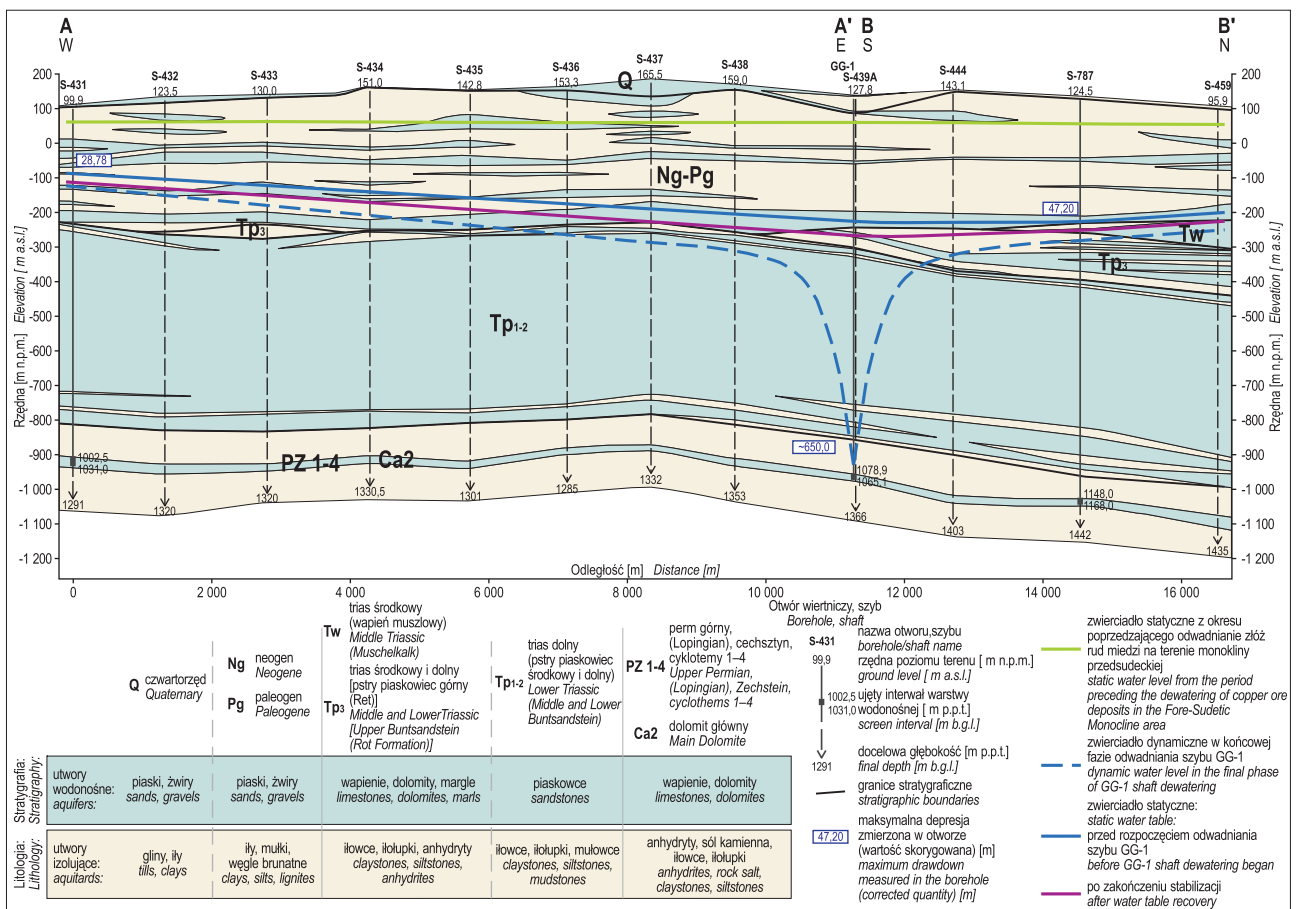
W artykule przeanalizowano pomiary automatyczne i manualne wykonywane w dwóch piezometrach sieci obserwacyjnej KGHM Polska Miedź S.A., ujmujących wody drenowanego poziomu wodonośnego, w których stwierdzono jednoznacznie reakcję na odwadnianie szybu S-431 i S-787 (ryc. 1–4, tab. 1).

W piezometrach S-431 i S-787 wykonywano pomiary cyfrowe, za pomocą automatycznych rejestratorów *Solinst Levelogger*, oraz pomiary manualne, z wykorzystaniem świstawki elektronicznej. Pomiary w otworach sieci obserwacyjnej KGHM Polska Miedź S.A. są standardowo przeprowadzane cztery razy w roku, dodatkowo pomiary zautomatyzowane realizowano z częstotliwością co 15 minut.

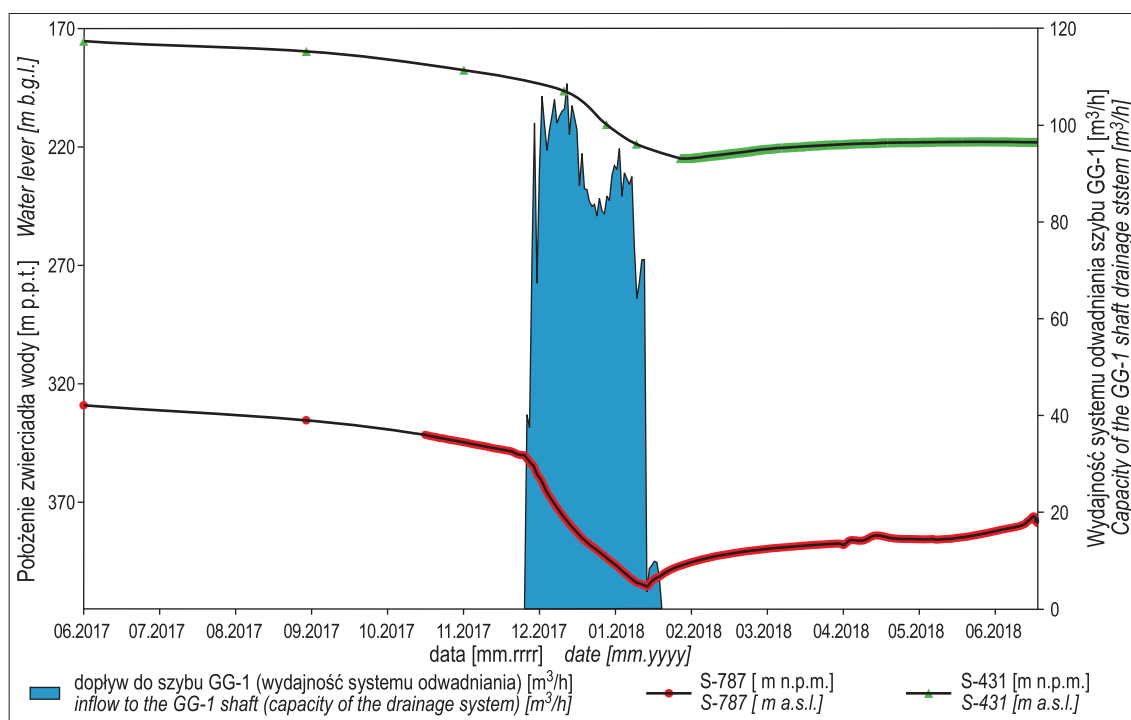
Analiza położenia zwierciadła wody w piezometrach S-787 i S-431 przed rozpoczęciem odwadniania szybu (listopad–grudzień 2017 r.) oraz po zakończeniu stabilizacji (czerwiec 2018 r.) wskazuje na znaczne różnice głębokości zalegania lustra wody. W otworze S-431 zwierciadło

po zakończeniu stabilizacji znajdowało się o 30,55 m głębiej niż przed rozpoczęciem odwadniania szybu, a w S-787 było głębiej o 27,5 m (ryc. 4, tab. 1). Przedstawione różnice są wynikiem odwodnień górniczych omawianego poziomu wodonośnego, co ma miejsce na analizowanym terenie od lat 80. XX w. Obserwowanym skutkiem drenażu górniczego jest postępujące obniżanie się położenia lustra wody w poziomie wodonośnym dolomitu głównego. Zasoby wód podziemnych tego poziomu wodonośnego były początkowo drenowane w rejonach jego podkenozoicznych wychodni, od 2002 r. obserwuje się również dopływy wód z tego poziomu do wyrobisk górniczych zlokalizowanych w północnych obszarach zagłębia miedziowego. Ocenia się, że na przestrzeni lat 2002–2019 ilość wód dopływających z poziomu Ca2 wzrastała, a strefa przesączania wód podziemnych do wyrobisk górniczych powiększała swój zasięg.

Ze względu na złożony charakter ukazanego procesu nie jest możliwe uwzględnienie wprost wielkości dopływu do wyrobisk górniczych w obliczeniach przeprowadzonych za pomocą przyjętych metod analitycznych. Opisane zmiany położenia zwierciadła w badanym poziomie wodonośnym są wynikiem wpływu czynników zewnętrznych, niezwiązanych z pompowaniem (odwadnianiem szybu), dlatego przed przystąpieniem do interpretacji wyników pompowania należy je wyeliminować (Stallman, 1971; Kruseman, de Ridder, 1990). Drenowanie zasobów poziomu wodonośnego dolomitu głównego w skutek odwadniania kopalń dotyczy znacznie dłuższego przedziału czasowego i ma znacząco większy obszar oddziaływania niż odwadnianie szybu GG-1 – promień leja depresji wywo-



Ryc. 3. Przekroje hydrogeologiczne A–A' i B–B'  
Fig. 3. A–A' and B–B' hydrogeological cross-sections



**Ryc. 4.** Położenie zwierciadła wody w piezometrach poziomu wodonośnego dolomitu głównego w czasie odwadniania szybu GG-1

**Fig. 4.** Water table position in the observation wells of the Main Dolomite aquifer during the dewatering of the GG-1 shaft

**Tab. 1.** Położenie zwierciadła wody w piezometrach S-431 i S-787 w okresie odwadniania szybu GG-1

**Table 1.** Location of the water table in piezometers S-431 and S-787 during the GG-1 shaft dewatering period

Nr otworu Borehole number	Położenie zwierciadła przed rozpoczęciem odwadniania szybu GG-1 <i>Position of the water table before the start of GG-1 shaft dewatering</i>	Położenie zwierciadła w końcowej fazie odwadniania szybu GG-1 <i>Position of the water table in the final phase of GG-1 shaft dewatering</i>	Położenie pozornie ustabilizowanego zwierciadła po zakończeniu odwadniania szybu GG-1 i odbudowie zwierciadła <i>Position of the apparently stabilized water table after the GG-1 shaft dewatering and water-table recovery</i>
	m p.p.t./m n.p.m. (data pomiaru, measurement date)		
S-787	350,50/–226,00 (2.12.2017)	405,55/–281,06 (20.01.2018)	378,00/–253,50 (25.06.2018)
S-431	187,52/–87,80 (8.11.2017)	224,84/–125,13 (2.02.2018)	218,07/–118,35 (25.06.2018)

lanego odwanianiem kopalń ocenia się na kilkadziesiąt kilometrów, promień lejki depresji wywołanego odwadnianiem szybu jest wielkości od kilkunastu do 20 km (Pikuła i in., 2019). Można stwierdzić, że wpływ odwadniania szybu ma zasięg lokalny w stosunku do wieloletniego drenażu przez wyrobiska poziome, który wytworzył regionalny lej depresji (Bocheńska i in., 2002; Bocheńska, Wilk, 2003; Pikuła i in., 2019).

Podczas próbnego pompowania depresję w otworze należy traktować jako różnicę pomiędzy położeniem zwierciadła w dowolnym momencie prowadzonego badania hydrogeologicznego, a położeniem zwierciadła, które byłoby obserwowane w otworze, gdyby próbne pompowanie nie miało miejsca. Jeżeli jest to konieczne, w celu uwzględnienia zmian regionalnych położenia zwierciadła wody podczas próbnego pompowania wyznacza się regionalną linię trendu zmian położenia zwierciadła (Walton, 1962; Heath, 1987). Najlepszym źródłem danych, na podstawie których można by było wyznaczyć długotrwały, regionalny trend zmian położenia zwierciadła wód podziemnych byłby piezometr rejestrujący regionalne zmiany położenia zwierciad-

ła wody w obserwowanym poziomie, będący jednocześnie poza wpływem prowadzonego próbnego pompowania. W przypadku braku takiego punktu obserwacyjnego użyteczne mogą być pomiary wykonywane w otworach będących w granicach lejki depresji wywołanego pompowaniem – w okresie poprzedzającym badanie oraz po zakończeniu stabilizacji zwierciadła wody (Krusseman, de Rider, 1990). Ponieważ w analizowanym przypadku nie dysponowano pomiarami z piezometru w analizowanym poziomie wodonośnym, który dokumentuje długotrwałe opadanie zwierciadła o podobnej dynamice co piezometry S-431 i S-787 i jednocześnie znajduje się poza zasięgiem odwadniania szybu GG-1, wykorzystano dane pomiarowe z dwóch wymienionych punktów obserwacyjnych.

W przypadku otworu S-787 dysponowano pomiarami:

- regularnymi, cokwartalnymi pomiarami manualnymi z okresu marzec 2017–czerwiec 2019 r.,
- pomiarami zautomatyzowanymi (co 15 minut) z okresu październik 2017–czerwiec 2018 r. (później nastąpiło uszkodzenie rejestratora).

Dla piezometru S-431 analizowano dane:

- cokwartalne pomiary manualne z okresu od marca 2017 do czerwca 2019 r.,
- pomiary zautomatyzowane (co 15 minut) z czasu luty 2018–czerwiec 2019 r.

Na podstawie uzyskanych pomiarów z okresu poprzedzającego odwadnianie (marzec 2017–grudzień 2017 r.) i po zakończeniu stabilizacji zwierciadła wody w otworze (październik 2018–czerwiec 2019 r.) wyznaczono linie trendów dla omawianych punktów obserwacyjnych. Linie te w sposób uproszczony odzwierciedlają regionalny charakter zmian położenia zwierciadła w piezometrach S-787 i S-431. W czasie prowadzenia ww. obserwacji nie odnotowano znaczących zmian natężenia dopływu wód z poziomu wodonośnego dolomitu głównego do wyrobisk górniczych, co w przypadku zaistnienia skutkowało by dynamicznymi zamianami przebiegu linii regionalnego trendu położenia zwierciadła wód w stosunkowo krótkim czasie. Zwierciadło wody w rozpatrywanym przedziale czasowym opada, a zmiany położenia zwierciadła w czasie w analizowanych otworach obserwacyjnych mają charakter krzywo liniowy.

Linie trendów regionalnych położenia zwierciadła w S-787 i S-431 wyznaczono za pomocą narzędzia „linia trendu” w oprogramowaniu Microsoft Excel jako krzywe: – dla S-787

$$H = 2,79 \cdot 10^{-10} t^4 - 7,12 \cdot 10^{-7} t^3 + 4,74 \cdot 10^{-4} t^2 + 1,98 \cdot 10^{-2} t + 323$$

– dla S-431

$$H = 3,12 \cdot 10^{-10} t^4 - 6,75 \cdot 10^{-7} t^3 + 3,89 \cdot 10^{-4} t^2 + 2,65 \cdot 10^{-2} t + 168$$

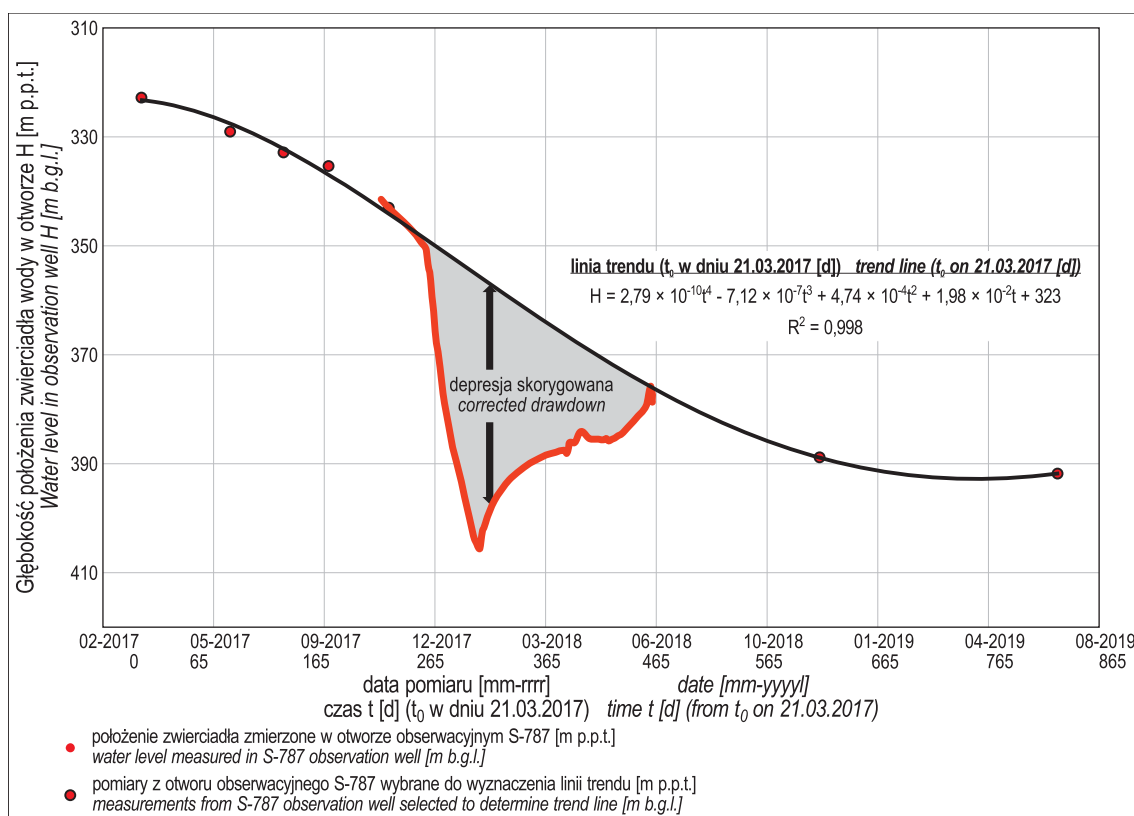
gdzie:

$H$  – głębokość położenia zwierciadła wody, m p.p.t.,  
 $t$  – czas mierzony od 21.03.2017 r., d (ryc. 5 i 6).

Dla poszczególnych krzywych współczynnik dopasowania  $R^2$  do wybranych pomiarów jest równy 0,996 (S-431) i 0,998 (S-787). Na podstawie wyznaczonych linii trendu dokonano korekty danych pomiarowych (ryc. 5 i 6).

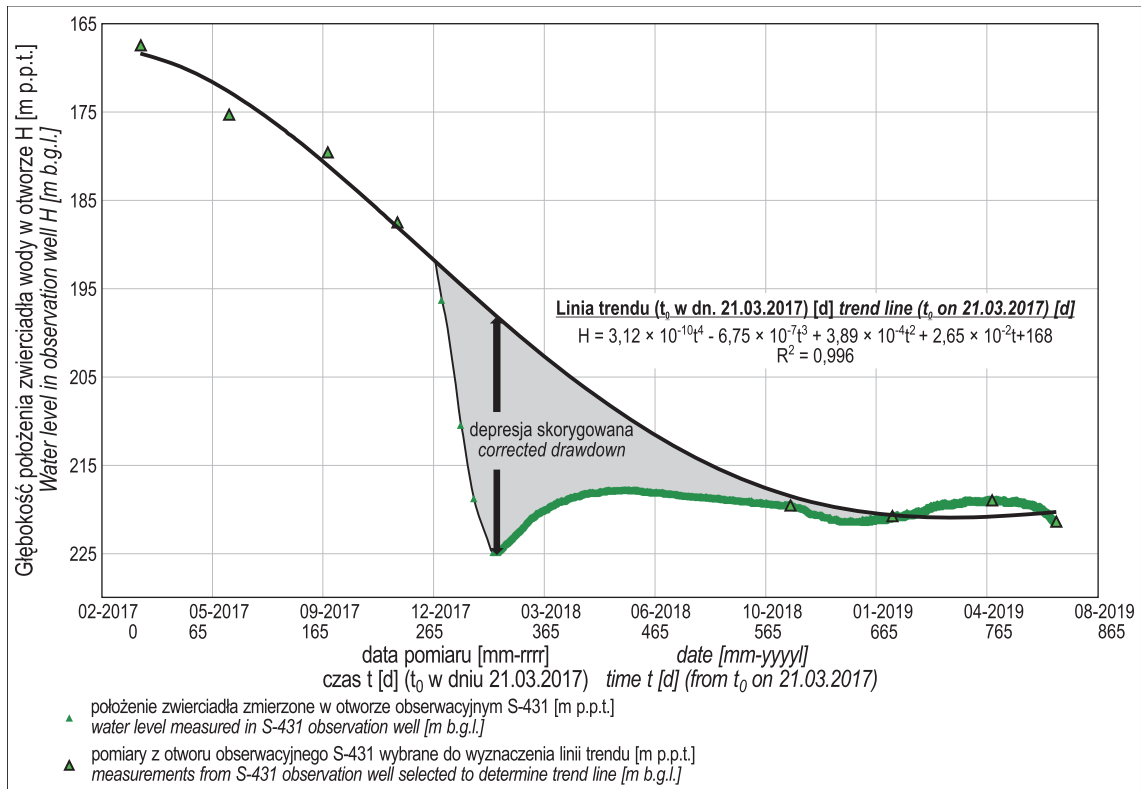
Ze względu na ograniczoną liczbę pomiarów z punktów S-431 i S-787 zakres analizowanych danych zawężono do równych przedziałów czasowych, w których dysponowano danymi pomiarowymi zarówno w pierwszym, jak i drugim piezometrze. Do interpretacji parametrów filtracyjnych wybrano pomiary z okresu odwadniania od 18.12.2017 r. do 16.01.2018 r. oraz z okresu stabilizacji od 2.02.2018 r. do 7.04.2018 r. Dane pomiarowe „surowe” przed reinterpretacją oraz dane skorygowane na podstawie wyznaczonych linii trendów regionalnych przedstawiono na rycinie 7 i w tabeli 2.

Obliczenia współczynnika filtracji wykonano za pomocą metody Theisa – okres odwadniania, metody Theisa – rozwiązanie Agarwala – dla okresu stabilizacji, ryc. 8 i 9 (Theis, 1935; Agarwal, 1980; Röhrich, 2008). Metodę podwójnie logarymiczną Theisa stosuje się do interpretacji próbnych pompowań naporowych warstw wodonośnych, zakładając szczelność stropu, spągu i przy nieustalonym stanie strumienia. Metodą Agarwala analizuje się dane z okresu odbudowy zwierciadła po próbnym pompowaniu. Rozwiązanie wykorzystuje zmierzoną wielkość wzniosu, która jest analizowana na wykresie w czasie zrównoważonym (odwrócona oś czasu). Metoda polega na dopasowaniu danych pomiarowych do krzywych wzorcowych opracowanych dla analizy próbnych pompowań. Do obliczeń wykonanych w artykule przyjęto uśrednioną wartość miąższości z analizowanych piezometrów oraz otworu S-439A (23,78 m).

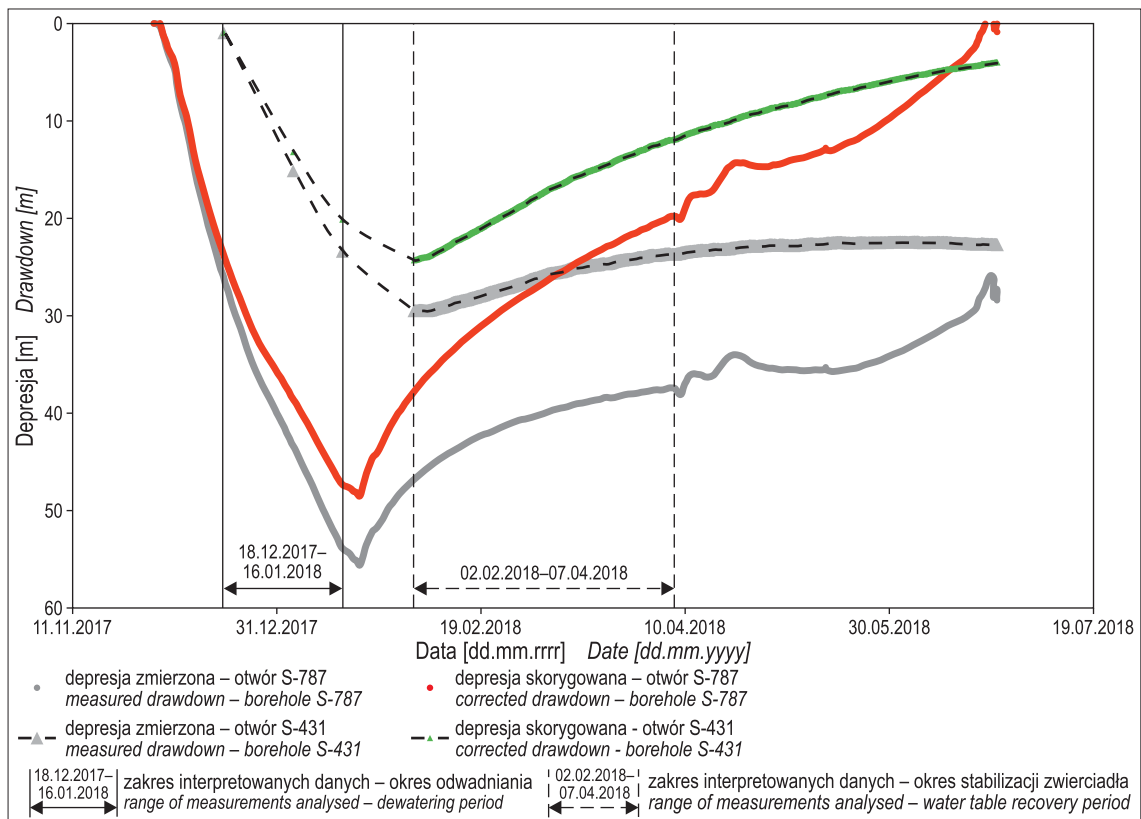


Ryc. 5. Korekta danych pomiarowych w otworze S-787 na podstawie wyznaczonej linii trendu

Fig. 5. Correction of measured data in borehole S-787 based on the determined trend line



Ryc. 6. Korekta danych pomiarowych w otworze S-431 na podstawie wyznaczonej linii trendu  
 Fig. 6. Correction of measured data in borehole S-431 based on the determined trend line



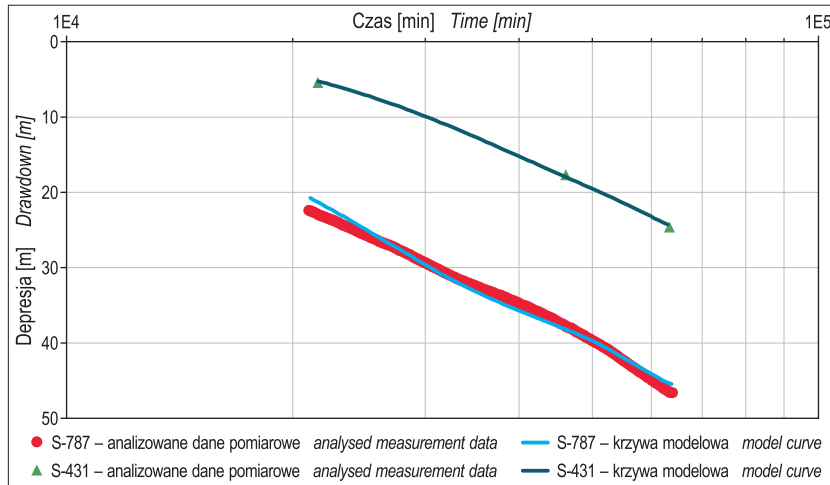
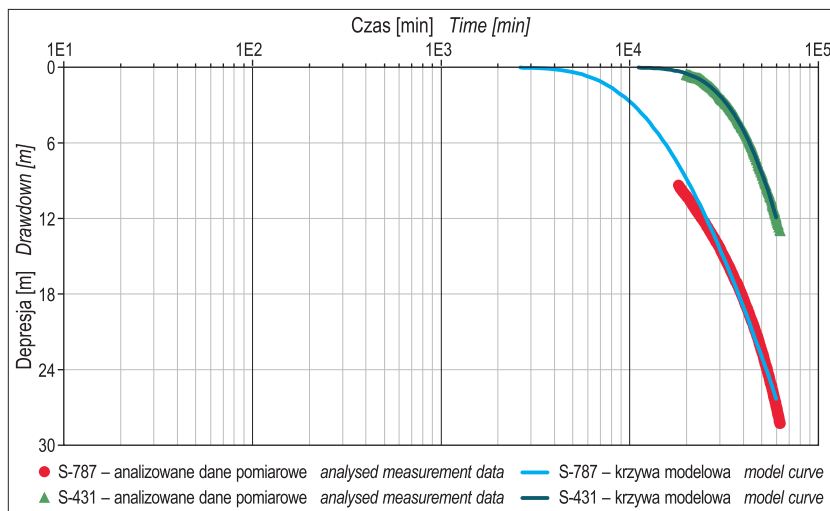
Ryc. 7. Wielkość depresji w otworach obserwacyjnych S-787 i S-431 przed i po dokonaniu korekty  
 Fig. 7. Magnitude of depression in observation wells S-787 and S-431 before and after correction

Badany poziom wodonośny jest ośrodkiem typu szczylinowo-krasowego, gdzie w pobliżu otworu pompowego mamy do czynienia z turbulentnym przepływem wód

podziemnych. W opracowaniu archiwalnym wartość współczynnika filtracji dla otworu S-431 określono na podstawie wzoru Krasnopskiego, który jest stosowany przy do-

**Tab. 2.** Zestawienie analizowanych piezometrów sieci monitoringowej KGHM Polska Miedź S.A. ujmujących poziom wodonośny dolomitu głównego**Table 2.** Overview of analysed piezometers of the monitoring network of KGHM Polska Miedź S.A., capturing the Main Dolomite aquifer

Nazwa punktu obserwacyjnego <i>Name of the observation point</i>	Odległość od szybu GG-1 <i>Distance from the GG-1 shaft</i> [m]	Maksymalna depresja w czasie odwadniania szybu GG-1 (wartość skorygowana) <i>Maximum drawdown observed in borehole during GG-1 shaft dewatering (corrected amount)</i> [m]
S-787	3 235	47,20
S-431	11 507	28,78

**Ryc. 8.** Wykres analityczny z obliczeń współczynnika filtracji na podstawie danych pomiarowych z piezometrów S-787 i S-431 z okresu odwadniania szybu GG-1 – metoda Theisa z uwzględnieniem zmiennej wydajności (AquiferTest Pro v 10.0)**Fig. 8.** Analytical graph from the calculation of the hydraulic conductivity based on measured data from piezometers S-787 and S-431 from the GG-1 shaft dewatering period – Theis method with variable capacity (AquiferTest Pro v 10.0)**Ryc. 9.** Wykres analityczny z obliczeń współczynnika filtracji na podstawie danych pomiarowych z piezometrów S-787 i S-431 z okresu stabilizacji zwierciadła po odwadnianiu szybu GG-1 – metoda Theisa – rozwiązanie Agarwala (AquiferTest Pro v 10.0)**Fig. 9.** Analytical graph from the calculation of the hydraulic conductivity based on data measured from piezometers S-787 and S-431 from period of the water-table stabilization after GG-1 shaft dewatering – Theis method, Agarwal solution (AquiferTest Pro v 10.0)**Tab. 3.** Statystyki dopasowania analizowanych pomiarów wykonanych w otworach podczas odwadniania szybu GG-1 i wartości modelowych, skalkulowanych przez program analityczny**Table 3.** Statistics of the fit – measurements taken during the GG-1 shaft dewatering and model values calculated by the analytical program

Etap obserwacji <i>Observation phase</i>	Nr punktu pomiarowego <i>Observation well No.</i>	Błąd średni <i>Mean error</i> $\Delta s$ [m]	Suma kwadratów błędów <i>Sum of squared errors</i> [m <sup>2</sup> ]	Wariancja <i>Variance</i> [m <sup>2</sup> ]	Odchylenie standardowe <i>Standard deviation</i> [m]
Owadnianie szybu GG-1 <i>GG-1 shaft dewatering</i>	S-431	0,022	0,131	0,044	0,209
	S-787	0,006	370,164	0,516	0,719
Odbudowa położenia zwierciadła wody po zakończeniu odwadniania <i>Recovery of the water table after the GG-1 shaft dewatering</i>	S-431	0,004	1,884	0,003	0,054
	S-787	0,019	584,164	0,374	0,612



pływie ustalonym w warstwie naporowej, dla przepływu turbulentnego (Turek, 1971). Dla analizowanych obserwacji z otworów S-431 i S-787 podczas odwadniania szybu GG-1 odległość piezometrów od szybu jest znacznie większa niż szacunkowa wartość strefy nieliniowej filtracji wokół szybu, którą, zgodnie z metodyką opisaną przez Motykę i Wilka (1984), autorzy artykułu ocenili na niecałe 100 m. W rozpatrywanym przypadku w pełni zasadne jest zastosowanie dla analizowanych pomiarów w piezometrach metod analitycznych przeznaczonych dla filtracji liniowej.

#### Archiwalne badania hydrogeologiczne wykonane w analizowanym obszarze

W otworze S-431 badania hydrogeologiczne wykonano metodą szczypania wody za pomocą łyżki wiertniczej, a ich wyniki były interpretowane za pomocą wzoru Krasnopolskiego (Turek i in., 1971; Preidl i in., 1979; Kozula i in., 1988). W wyniku przytoczonych obliczeń uzyskano wartość współczynnika filtracji  $k = 8,83 \cdot 10^{-8}$  m/s (Kozula i in., 1988). Podany wzór ma zastosowanie dla: dopływu ustalonego, filtracji turbulentnej, warstwy o naporowym

zwierciadle wód (Pazdro, 1983). Jest to wartość znacznie niższa niż uzyskana w wyniku obliczeń opartych na pomiarach z tego punktu, które zrealizowano w ramach niniejszego artykułu. Po podstawieniu pomiarów do przytoczonego wzoru potwierdzono poprawność archiwalnych obliczeń.

Podczas badań w otworze podszybowym S-439A w poziomie dolomitu głównego wykonano test za pomocą rurowego próbnika złoża. Wyniki opróbowania wykonanego dla potrzeb dokumentacji „podszybowej” zostały zinterpretowane za pomocą dwóch sposobów – metodą Hornera oraz analityczno-graficzną „metodą operatorową” (Horner, 1951; Buzinow, Umrihin, 1984; Gruszecki i in., 2009). Uzyskane wartości przepuszczalności  $k_p$  zostały przeliczone na wartość współczynnika filtracji  $k$ , wg formuły podanej przez Pazdro (1983). W wyniku analizy opróbowania rurowym próbnikiem złoża w otworze S-439A autorzy cytowanej dokumentacji uzyskali niejednoznaczne, znacząco różniące się od siebie wartości współczynnika filtracji:  $1,43 \cdot 10^{-6}$  m/s (metoda Hornera) i  $8,1 \cdot 10^{-8}$  m/s („metoda operatorowa”) (Gruszecki i in., 2009). W ramach niniejszego opracowania ponownie przeanalizowano wyniki omawianego testu. Obliczenia współczynnika filtracji

**Tab. 4.** Zestawienie wartości współczynnika filtracji poziomu wodonośnego dolomitu głównego Ca2 obliczonych na podstawie badań hydrogeologicznych przeprowadzonych w bezpośrednio w otworach S-787 i S-431 oraz na podstawie obserwacji wykonywanych w tych otworach podczas odwadniania szybu GG-1 (Kozula i in., 1988; Gruszecki i in., 2009)

**Table 4.** Summary of hydraulic conductivity values [m/s]: archival – calculated on the basis of tests performed in boreholes S-787 and S-431 and calculated on the basis of the observations in these boreholes during the dewatering of the GG-1 shaft (Kozula i in., 1988; Gruszecki i in., 2009)

Nr otworu Borehole No.	Badania wykonane bezpośrednio w otworach Tests performed directly in the boreholes				Obserwacje wykonane w czasie odwadniania szybu GG-1 i odbudowy zwierciadła po zakończeniu odwadniania Observations taken during the GG-1 shaft dewatering and recovery period after dewatering			
	Rodzaj badań* Type of hydrogeological test*	Metoda interpretacji** Interpretation method**	Wartość współczynnika filtracji k Hydraulic conductivity [m/s]		Rodzaj badań Type of hydrogeological test*	Metoda interpretacji** Interpretation method**	Wartość współczynnika filtracji k Hydraulic conductivity [m/s]	
			Dla określonego rodzaju badania, metody analitycznej For a specific type of test, analytical method***	Średnia arytmetyczna dla otworu Arithmetic average for the borehole			Dla określonego etapu obserwacji For a specific phase of observation	Średnia arytmetyczna dla otworu Arithmetic average for the borehole
S-439A /GG-1	RPZ	H	$1,43 \cdot 10^{-6}$	$1,92 \cdot 10^{-6}$	–	–	–	–
	RPZ	Op	$8,1 \cdot 10^{-8}$					
	RPZ	C-B-P	$1,92 \cdot 10^{-6}$					
S-431	Ł	K	$8,83 \cdot 10^{-8}$	–	O	T	$2,38 \cdot 10^{-6}$	$1,66 \cdot 10^{-6}$
					S	T-A	$9,34 \cdot 10^{-7}$	
S-787	RPZ	C-B-P	$2,87 \cdot 10^{-6}$	$1,61 \cdot 10^{-6}$	O	T	$2,90 \cdot 10^{-6}$	$2,83 \cdot 10^{-6}$
	PP	T	$3,49 \cdot 10^{-7}$					
	PP-st	T-A	$5,97 \cdot 10^{-8}$					

\* – rodzaj badań: RPZ – rurowy próbnik złoża, Ł – szczypanie wody z otworu za pomocą łyżki wiertniczej, PP – próbnik pompowanie, PP-st – próbnik pompowanie – stabilizacja zwierciadła, O – odwadnianie szybu GG-1, S – odbudowa zwierciadła po zakończeniu odwadniania szybu GG-1.

\*\* – type of test: RPZ – drill stem test, Ł – draining of water from the borehole with a drilling bailer, PP – pumping test, PP-st – pumping test – recovery period, O – dewatering of the GG-1 shaft, S – water table recovery after dewatering of the GG-1 shaft.

\*\*\* – skrócone oznaczenia poszczególnych metod: H – metoda Hornera, Op – metoda „operatorowa”, C-B-P – metoda Coopera-Brededorfta-Papadopulos, K – wzór Krasnopolskiego, T – metoda Theisa, T-A – metoda Theisa – rozwiązanie Agarwala.

\*\*\* – abbreviated designations of individual methods: H – Horner’s method, Op – “operator” method, C-B-P – Cooper-Brededorft-Papadopulos method, K – Krasnopolsky formula, T – Theis method, T-A – Theis method – Agarwal solution.

\*\*\* – wyniki wątpliwe, pominięte przy obliczaniu wartości średnich oznaczono kursywą.

\*\*\* – questionable results, omitted from the calculation of average values are marked in italics.

przeprowadzono z zastosowaniem metody Coopera-Bre-dehoefta-Papadopolosa, w oprogramowaniu AquiferTest Pro v. 10.0 (Cooper i in., 1967; Röhrich, 2008). W wyniku wykonanych na nowo obliczeń uzyskano wartość współczynnika filtracji, który wyniósł  $1,92 \cdot 10^{-6}$  m/s, co pozwala przyjąć wyższą wartość tego parametru obliczonego w dokumentacji „podszybowej” jako bardziej wiarygodną (wartość skrajnie niską pominięto w obliczeniach wartości średniej dla otworu i dalszych analizach w niniejszym opracowaniu – tab. 4). Metody analityczne, na podstawie których określono współczynnik filtracji w przytoczonej dokumentacji „podszybowej”, należą do grupy „metod prostoliniowych”, ocenianych jako pozwalające na „słabą” identyfikację parametrów filtracyjnych z brakiem możliwości weryfikacji uzyskanego wyniku. Sposób obliczeń, który zastosowano w celu weryfikacji niezgodnych danych archiwalnych, należy do grupy metod „dopasowania krzywej”. Jest on oceniany jako dający „zadowalającą” identyfikację parametrów filtracyjnych oraz od „zadowalającej” do „dobrej” weryfikację wyniku (Gringarten, 2008). Wiarygodność danych uzyskanych podczas powtórzonych analiz zwiększa również fakt wykonania obliczeń w oprogramowaniu analitycznym, przez co zostały wyeliminowane błędy mogące wyniknąć z niewłaściwego, subiektywnego dopasowania wykresu danych pomiarowych do jednej z krzywych wzorcowych (Röhrich, 2008).

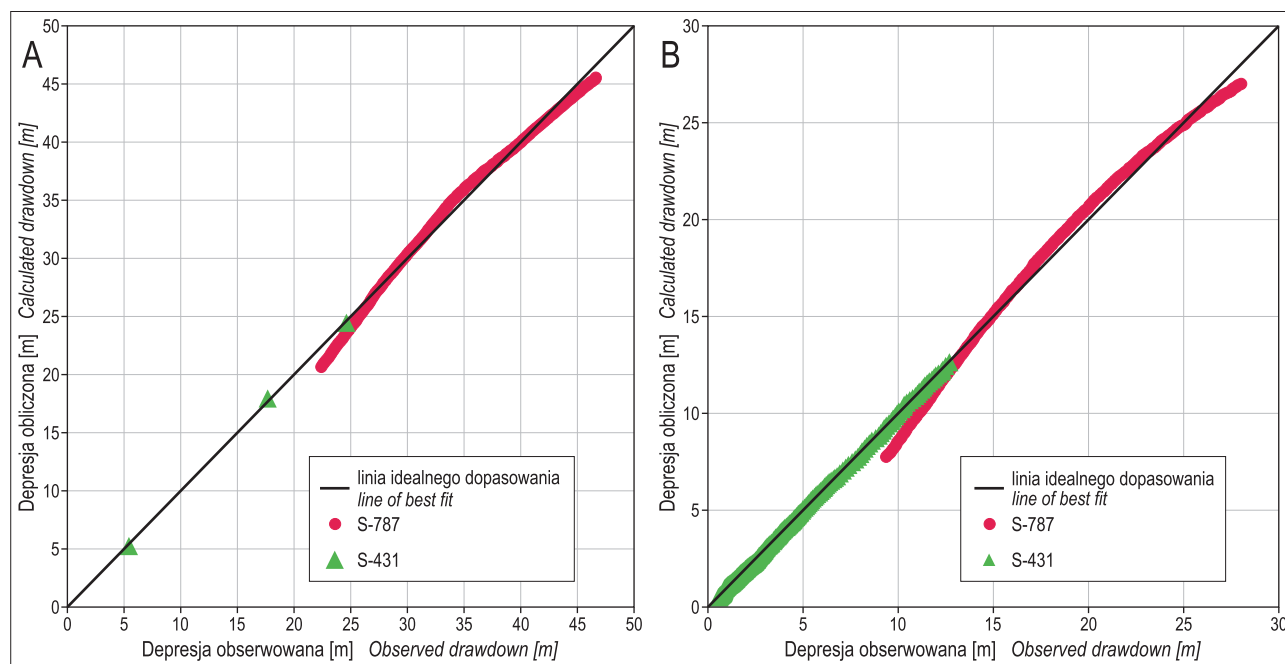
Wyniki badania rurowym próbnikiem złoża w otworze S-787 przeanalizowano za pomocą metody Coopera-Bre-dehoefta-Papadopolosa przeznaczonej do interpretacji badań hydrogeologicznych metodą slug-test (Cooper i in., 1967; Röhrich, 2008). Wyniki próbnego pompowania oraz obserwacje prowadzone podczas stabilizacji zwierciadła po jego zakończeniu przeprowadzono odpowiednio metodą Theisa oraz metodą Theisa – rozwiązanie Agarwala. Obliczenia dla otworu S-787 wykonano w oprogramowaniu AquiferTest Pro v. 10.0.

Interpretacja danych pomiarowych uzyskanych podczas badań hydrogeologicznych w otworze S-787 w opisywanym poziomie wodonośnym pozwoliła na określenie wartości współczynnika filtracji, które wynoszą od  $5,97 \cdot 10^{-8}$  do  $2,87 \cdot 10^{-6}$  m/s (tab. 4) (Ratajczyk i in., 2022). Spośród trzech wartości uzyskanych podczas poszczególnych rodzajów badań w otworze S-787 w dalszych analizach pominięto wyraźnie niższy wynik określony na podstawie obserwacji wykonanych podczas stabilizacji zwierciadła po pompowaniu, który oceniono jako wątpliwy (prawdopodobny wpływ drenażu górniczego na tempo stabilizacji lustra wody w otworze).

## WYNIKI I DYSKUSJA BADAŃ

Skorygowane dane pomiarowe zostały przeanalizowane metodą Theisa (odwadnianie) oraz metodą Theisa – rozwiązanie Agarwala (stabilizacja) w oprogramowaniu AquiferTest Pro 10.0 – ryc. 8 i 9. Na rycinie 10A, B oraz w tabeli 3 przedstawiono statystyki dopasowania pomiarów w formie graficznej oraz liczbowej. W tabeli 4 zestawiono archiwalne wyniki interpretacji badań hydrogeologicznych przeprowadzonych w otworach oraz wyniki analiz wykonanych na potrzeby niniejszego artykułu.

Obliczona wartość współczynnika filtracji dla okresu odwadniania waha się od  $2,38 \cdot 10^{-6}$  do  $2,90 \cdot 10^{-6}$  m/s, średnio  $2,64 \cdot 10^{-6}$  m/s, a dla okresu stabilizacji zwierciadła od  $9,34 \cdot 10^{-7}$  do  $2,76 \cdot 10^{-6}$  m/s, średnio  $1,85 \cdot 10^{-6}$  m/s (tab. 4). Zgodnie ze stosowanymi klasyfikacjami są to utwory o niskiej przepuszczalności (Head, Epps, 2011). Wartość przewodności hydraulicznej waha się od  $5,66 \cdot 10^{-5}$  do  $6,90 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s, średnio  $6,28 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s dla danych z okresu odwadniania oraz od  $2,22 \cdot 10^{-5}$  do  $6,56 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s, średnio  $4,39 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s dla okresu stabilizacji. Zgodnie z klasyfikacją Krasnego są to skały o niskiej przewodności (Krasny, 1993).



**Ryc. 10.** Wykresy punktowe dopasowania wartości depresji obliczonych przez program oraz depresji zmierzonych w otworach S-787 i S-431: **A** – dla pomiarów z okresu odwadniania szybu GG-1, **B** – dla pomiarów z okresu stabilizacji zwierciadła po zakończeniu odwadniania szybu GG-1

**Fig. 10.** Scatter plots of the matching of depression values calculated by the program and depressions measured in boreholes S-787 and S-431: **A** – for measurements from the period of GG-1 shaft dewatering, **B** – for measurements from the period of stabilization of the water table after dewatering of the GG-1 shaft

Współczynniki filtracji obliczone dla obydwu piezometrów na podstawie pomiarów z okresu odwadniania wykazują mniejsze zróżnicowanie niż wartości obliczone na podstawie analizy danych z okresu stabilizacji zwierciadła. W pierwszym przypadku rozstęp wynosi  $5,20 \cdot 10^{-7}$  m/s, a w drugim  $1,83 \cdot 10^{-6}$  m/s. Wartość różnicy procentowej dla współczynnika  $k$  z odwadniania to 20%, a dla stabilizacji – 99%. Analiza diagramów dopasowania wartości depresji zmierzonych (oś X) i wartości modelowych (oś Y) rozpatrywanych pomiarów uwidacznia położenie poszczególnych punktów blisko linii idealnego dopasowania. Jest to potwierdzenie, że wartości modelowe nie zostały przeszacowane lub niedoszacowane w stosunku do wartości zmierzonych (ryc. 10A, B). Dla okresu odwadniania pomiary z obu piezometrów oraz wartości modelowe cechują współczynniki determinacji  $R^2$  od 0,988 do 0,999, a dla okresu stabilizacji od 0,986 do 0,999.

Wartość współczynnika filtracji uzyskana na podstawie interpretacji badań archiwalnych wykonanych bezpośrednio w otworze S-787 jest równa dla: danych z próbnego pompowania  $3,49 \cdot 10^{-7}$  m/s, stabilizacji  $5,97 \cdot 10^{-8}$  m/s i  $2,87 \cdot 10^{-6}$  m/s dla danych z badania rurowym próbnikiem złoża. Wyniki obliczeń oparte na pomiarach z próbnego pompowania i stabilizacji uznano za mniej wiarygodne niż rezultat analizy badania rurowym próbnikiem złoża. Archiwalne badania wykonane w otworze S-431 pozwoliły na określenie wartości współczynnika filtracji równej  $8,8 \cdot 10^{-8}$  m/s.

W wyniku interpretacji danych pomiarowych z otworów S-787 i S-431 z okresu odwadniania szybu i odbudowy zwierciadła uzyskano wartości współczynnika filtracji poziomu dolomitu głównego odpowiednio  $2,38 \cdot 10^{-6}$  i  $9,34 \cdot 10^{-7}$  m/s, średnio  $1,66 \cdot 10^{-6}$  m/s w otworze S-431 oraz  $2,90 \cdot 10^{-6}$  i  $2,76 \cdot 10^{-6}$  m/s średnio  $2,83 \cdot 10^{-6}$  m/s w otworze S-787. Są to wartości od 1,15- do 30-krotnie wyższe oraz znacznie mniej zróżnicowane niż wyniki uzyskiwane na podstawie badań wykonywanych bezpośrednio w analizowanych otworach.

Na wyniki uzyskiwane dla badań wykonywanych w otworach oraz na podstawie obserwacji w piezometrach może mieć wpływ skala wykonywanych badań hydrogeologicznych. Na taką możliwą zależność uzyskiwanych wyników dla analizowanego poziomu wodonośnego wskazuje charakter porowatości tego wodonośca i związana z tym znaczna zmienność przestrzenna parametrów filtracyjnych. Występowanie efektu skali w poziomie wodonośnym dolomitu głównego potwierdza porównanie wyników interpretacji badań wykonanych w odwiertach z wynikami badań parametrów filtracyjnych przeprowadzanych dla próbek skalnych w rejonie monokliny przedsudeckiej. Wyniki badań hydrogeologicznych zrealizowane w otworach wiertniczych *in situ* w porównaniu do badań wykonanych na poszczególnych próbkach rdzenia wiertniczego z tych otworów, są od 4- do nawet  $10^6$ -krotnie wyższe (Pikuła i in., 2019).

Uzyskane w rezultacie analiz wartości współczynnika filtracji obliczonego na podstawie danych pomiarowych z analizowanych okresów odwadniania i stabilizacji są w pewnym stopniu zależne od sposobu przeprowadzonej reinterpretacji danych pomiarowych, którą oparto o wyznaczoną w sposób uproszczony linię trendu. Nie da się wykluczyć, że np. wartości depresji skorygowanej w okresie odbudowy zwierciadła mogą być w pewnym stopniu przeszacowane, tym samym wartości obliczonych współczynników filtracji dla tego okresu mogą być zaniżone.

Przytoczone wyniki badań archiwalnych mogą wykazywać wpływ niedoskonałości samego badania i nieadekwatność zastosowanych metod analitycznych.

## PODSUMOWANIE

Interpretacja pomiarów wykonanych w sieci piezometrów i w samym szybie górniczym podczas jego odwadniania umożliwia weryfikację wyników badań hydrogeologicznych wykonywanych bezpośrednio w otworach badawczych (piezometrach) na etapie ich wiercenia.

Wartość współczynnika filtracji dla poziomu wodonośnego dolomitu głównego określona na podstawie przeprowadzonych analiz waha się od  $9,34 \cdot 10^{-7}$  do  $2,90 \cdot 10^{-6}$  m/s, średnio  $2,24 \cdot 10^{-6}$  m/s. Obliczone wartości współczynnika filtracji utworów wodonośnych dolomitu głównego są zbliżone do wartości średnich, określonych na podstawie badań hydrogeologicznych w otworach wiertniczych w rejonie występowania złóż rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej (Pikuła i in., 2019).

Ponieważ w analizowanym przypadku pomiary były wykonywane w poziomie wodonośnym odwadnianym dodatkowo przez wyrobiska górnicze, przed przystąpieniem do interpretacji pomiarów była konieczna reinterpretacja wykonanych pomiarów. Biorąc pod uwagę znacznie większy zakres przestrzenno-czasowy odwodnień w stosunku do zasięgu odwadniania szybu, korektę przeprowadzono na podstawie linii trendu regionalnego położenia zwierciadła wód badanego poziomu wodonośnego. Dokładność i wiarygodność obliczonych parametrów przedstawionym sposobem może obniżyć trudny do dokładnego i jednoznacznego określenia wpływ odwodnień górniczych na zmierzone wartości depresji w otworach.

Skalkulowane wartości analizowanego parametru, pomimo że mają przybliżony charakter, pozwalają wyeliminować spośród parametrów pochodzących z archiwalnych badań wykonanych w otworach wiertniczych wartości silnie zaniżone w stosunku do pozostałych wyników. Wspomniane, wyraźnie niższe rezultaty można interpretować jako błędne, w znacznym stopniu obciążone wpływem niedoskonałości samego badania hydrogeologicznego na obliczony wynik.

Uzyskane w wyniku analiz wartości współczynnika filtracji dotyczą badanego poziomu wodonośnego w promieniu rzędu kilku–kilkunastu kilometrów wokół szybu. Z punktu widzenia głębienia szybu, w którym już zaistniał dopływ, są to dane o ograniczonej przydatności. Otrzymałe wyniki są bardziej użyteczne dla obszarów położonych w dalszej odległości – w rejonach perspektywicznych dla eksploatacji górniczej i możliwego umiejscowienia kolejnych szybów górniczych. Poprzez weryfikację archiwalnych rezultatów badań i wyeliminowanie anomalnie niskich wartości współczynnika filtracji można uniknąć niepewnych lub mocno zaniżonych, przez co zbyt „optymistycznych” wielkości potencjalnego, prognozowanego dopływu wód z omawianego poziomu wodonośnego do szybów i górniczych wyrobisk poziomych.

System odwadniania zakładu górniczego, który jest dostosowany do dobrze rozpoznanych warunków hydrogeologicznych, umożliwia skuteczne zwalczanie zagrożenia wodnego. Podczas projektowania takiego systemu zaleca się szczególną ostrożność, w przypadku gdy mamy do czynienia prognozami dopływu, wykonanymi na podstawie parametrów filtracyjnych, które lokalnie są niższe niż parametry o charakterze regionalnym.

Autorzy dziękują recenzentkom: dr Lidii Razowskiej-Jaworek oraz dr hab. Marzenie Szostakiewicz-Hołowni, za rzetelną, konstruktywną ocenę artykułu.

## LITERATURA

- AGARWAL R.G. 1980 – A new method to account for producing time effects when drawdown type curves are used to analyze pressure buildup and other test data. SPE 9289.
- BADURA J. 2006 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. 651 Głogów. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- BADURA J. 2013 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. 651 Głogów. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- BECKER R., FISZER J., KALISZ M. 2007 – Hydrogeologia. [W:] Piestrzyński A. i in. (red.), Monografia KGHM Polska Miedź S.A.: 16–23. KGHM Cuprum Sp. z o.o., Lubin.
- BOCHEŃSKA T., DOWGIAŁŁO J., KLECZKOWSKI A.S., KRAJEWSKI S., ROGOŹ M., RÓŻKOWSKI A., SADURSKI A. 2002 – Słownik hydrogeologiczny. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- BOCHEŃSKA T., WILK Z. (red.) 2003 – Hydrogeologia polskich złóż kopalin i problemy wodne górnictwa, tom 2. Uczelniane Wydaw. Nauk.-Dydakt., Kraków.
- BUZINOW S.N., UMRIHIN I.D. 1984 – Issledowanije neftianych i gazowych skważyn i pławstow. Wydaw. Niedra, Moskwa.
- CHUDY K., PIKUŁA M., WORSZA-KOZAK M. 2017 – Rozwój metod rozpoznania warunków hydrogeologicznych na potrzeby wykonywania pionowych wyrobisk udostępniających złoża: przykład LGOM. Prz. Geol., 65 (11/1): 1035–1043.
- COOPER H.H., BREDEHOEFT J.D., PAPADOPULOS I.S. 1967 – Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. Water Resour. Res., 3: 263–269.
- GRINGARTEN A. 2008 – From Straight Lines to Deconvolution: The Evolution of the State of the Art in Well Test Analysis. SPE Reserv. Evaluat. Eng., 11 (1): 41–62.
- GRUSZECKI J., GOLCZAK I., PIKUŁA M., BIELAWSKI A., DZIEDZIAK J., WOŹNIAK M., SUPEL J., SUPEL M., PATEREK M., GROCH G., PLUTA P. 2009 – Kompleksowa dokumentacja geologiczna rejonu projektowanego szybu GG-1. Przedsiębiorstwo Geologiczne we Wrocławiu PROXIMA S.A. (niepublikowana). <http://pebeka.com.pl>
- HEAD K., EPPS R. 2011 – Manual of Soil Laboratory Testing – Volume 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests. Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.
- HEATH R.C. 1987 – Basic Ground-Water Hydrology. U.S. Geological Survey Water-Supply paper 2220.
- HORNER D.R. 1951 – Pressure Build-up in wells. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> World Petroleum Congress, 25–43.
- JANICKI D., CHUDY K., KACZOREK K., KISIELEWICZ Z., KONSENCJUSZ D., NIEDBAŁ M., PATEREK M., PIKUŁA M., PYRA J., SZYMAŃSKI A. 2019 – Monitoring wód podziemnych i powierzchniowych w rejonie oddziaływania kopalń KGHM Polska Miedź S.A. – pomiary i raport roczny w latach 2016–2018 – raport za rok 2018. KGHM CUPRUM Sp. z o.o. – CBR (niepublikowana).
- KIERSNOWSKI H., PETECKI Z. 2017 – Budowa geologiczna podczechsżyńskiego podłoża Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM) i jego otoczenia: spojrzenie krytyczne. Biul. Państw. Inst. Geol., 468 (468): 175–198.
- KOZULA R., GOLCZAK I., DZIEDZIAK J. 1988 – Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi „Bytom Odrzański” w kat. C1 i C2. Przedsiębiorstwo geologiczne we Wrocławiu PROXIMA S.A. (niepublikowane).
- KRASNY J. 1993 – Classification of Transmissivity Magnitude and Variation. Ground Water, 31: 230–236.
- KRUSEMAN G.P., DE RIDDER N.A. 1990 – Analysis and evaluation of pumping test data, 2nd Ed., International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, Netherlands.
- KWAŚNY L., SELEROWICZ T., PIKUŁA M., DURKOWSKI K., CHUDY K., NOWYSZ M., PATEREK M. 2019 – Ekspertyza (analiza) dotycząca możliwości wznowienia gębnienia szybu GG-1 po wykonanych z poziomu 1067,36m zabiegach iniekcyjnych z uwzględnieniem ich rezultatów w warstwie dolomitu głównego Ca2 w aspekcie zagrożenia wodnego i wyrzutami gazów i skał. KGHM Cuprum (niepublikowana).
- MARKIEWICZ A., FISZER J., KALISZ M., CZMIEL J., NIEDBAŁ M., MICHALAK J. 2004 – Badania modelowe zmian hydrodynamicznych w podwęgłowym poziomie wodonośnym, powstałych w wyniku uszczelniania poziomu wodonośnego dolomitów złożowych w rejonie Polkowice Zachodnie, w celu określenia ich wpływu na wzrost zagrożeń wodnych w pozostałych rejonach O/ZG Polkowice-Sierszowice i O/ZG Lubin. CBPM „Cuprum” sp. z o.o. (OBR), Wrocław (niepublikowana).
- MOTYKA J., WILK Z. 1984 – Zastępczy promień nieliniowej filtracji wokół studni zgleźbionej w skałach szczelinowo-krasowych. Prz. Geol., 32 (2): 90–94.
- PAZDRO Z. 1983 – Hydrogeologia ogólna. Wydaw. Geol. Warszawa.
- PIKUŁA M., BUCZYŃSKI S., CHUDY K., CYGAN S., CZMIEL J., GURWIN J. P. KACZOREK K., KONSENCJUSZ D., MERTA A., OLIChWER T., SELEROWICZ T., STAŚKO S., SZYMAŃSKI A., TARKA R., WCISŁO M., WORSZA-KOZAK M. 2016 – Dokumentacja hydrogeologiczna określająca warunki hydrogeologiczne w związku z zamierzonym wykonywaniem odwodnień w celu wydobywania kopaliny ze złoża rud miedzi „Radwanice-Gaworzyce” KGHM Cuprum Sp. z o.o. – CBR (niepublikowana).
- PIKUŁA M., PATEREK M., CHUDY K., DURKOWSKI K., SELEROWICZ T., KACZOREK K. 2019 – Model warunków geologiczno-górnictwowych w obrębie poziomu dolomitu głównego monokliny przedsudeckiej. KGHM CUPRUM Sp. z o.o. – CBR (niepublikowana).
- PREIDL M., KISIELEWSKI B., KASIAK Z., BAKOWSKA J., ORŁOWSKI J. 1979 – Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi Żukowice-Jaczków w kategorii C-1. Przedsiębiorstwo Geologiczne Kraków (niepublikowane).
- RATAJCZYK M., KWAŚNY L., DURKOWSKI K., PIKUŁA M., SELEROWICZ T., SZCZEPANIK M., PYRA J., SOKALSKA A., NOWAK I., SIREGA K., SZYMAŃSKI A., DURKOWSKA A., OSTRWOSKA E., WOJTAŁA T., PASTERNAK G., LESZCZYŃSKI R., TYLKA M., SOKALSKI D. 2022 – Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi „Retków-Grodziszczce” KGHM CUPRUM Sp. z o.o. – CBR (niepublikowana).
- RÖHRICH T. 2008 – AquiferTest v.4.2 User’s Manual. Schlumberger Water Services 2008.
- STALLMAN R.W. 1971 – Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Chapter B1 Aquifer-test Design, Observation and Data Analysis, Book 3 Applications of hydraulics.
- SZYMAŃSKI A., CHUDY K., JANICKI D., KACZOREK K., KISIELEWICZ Z., PATEREK M., PIKUŁA M., PYRA J., SOKALSKA A. 2018 – Monitoring wód podziemnych i powierzchniowych w rejonie oddziaływania kopalń KGHM Polska Miedź S.A. – pomiary i raport roczny w latach 2016–2018 – raport za rok 2017. KGHM CUPRUM Sp. z o.o. – CBR (niepublikowana).
- THEIS C.V. 1935 – The relation between the lowering of the Piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. Trans Am Geophys Union, 16: 519. <https://doi.org/10.1029/TR016i002p00519>
- TUREK S. (red.) 1971 – Poradnik hydrogeologa. Wydaw. Geol., Warszawa.
- WALCZYK-AUGUSTYNIAK M. 1995 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. 650 Przemków. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- WALCZYK-AUGUSTYNIAK M. 1997 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. 650 Przemków. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- WALTON W.C. 1962 – Selected Analytical Methods for Well and Aquifer Evaluation. Illinois State Water Survey Bulletin 49, Urbana, Illinois, 81 p.

Praca wpłynęła do redakcji 21.08.2023 r.

Akceptowano do druku 21.02.2024 r.