

# Interpretacja pomiarów wykonywanych w piezometrach sieci monitoringowej zakładu górniczego w celu określania parametrów filtracyjnych poziomu wodonośnego na podstawie danych z okresu odwadniania szybu R-XI KGHM Polska Miedź S.A.

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

**Interpretation of measurements taken in piezometers of a mine monitoring network to determine the filtration parameters of an aquifer, using the example of an analysis for data from the period of drainage of the R-XI shaft of KGHM Polska Miedź S.A.** Pr. Geol., 71: 503–512; doi: 10.7306/2023.38

*Abstract.* The article describes an attempt to analyse measurement data from a groundwater observation network of KGHM Polska Miedź S.A., from the period of dewatering of the R-XI shaft. The shaft was dewatered as a result of inflow of waters from the middle and lower Buntsandstein aquifer. A scheme was adopted in which the dewatered shaft is a pumping well and piezometers of the monitoring network are observation wells. The described data were interpreted using calculation methods provided for pumping test and tests based on rapid changes of borehole pressure, in the AquiferTest Pro v10.1 software. The dewatering of the R-XI shaft in this case was carried out over a period of more than 16 months, with an average flow rate of 115.6 m<sup>3</sup>/h; the water table recovery after the dewatering took more than 43 months. The observation wells from which the measurement data were interpreted are 0.1, 1.8 and 3.4 km away from the R-XI shaft.

**Keywords:** hydrogeology, groundwater monitoring, deep boreholes, pumping well with observation wells, mining drainage, mine shaft dewatering

Udostępnianie i podziemna eksploatacja złóż kopalni stałych, w tym złóż rud miedzi, na monoklinie przedsudeckiej wymaga głębień pionowych wyrobisk górniczych z powierzchni – szybów, które spełniają funkcje m.in. transportowe, wentylacyjne (Kostrz, 2014). W planowanej lokalizacji szybu rozpoznaje się warunki geologiczne (głównie warunki hydrogeologiczne, gazowe i geologiczno-inżynierskie), które są identyfikowane na podstawie wyników wiercenia otworu lub otworów badawczych tzw. „podszybowych” oraz innych badań, np. powierzchniowych badań geofizycznych (PN-G-05016:1997).

Eksploatacja permskich złóż rud miedzi na terenie monokliny przedsudeckiej jest prowadzona począwszy od lat 60. XX w., wraz udostępnianiem nowych partii złóż budowane są kolejne szyby górnicze. Na omawianym obszarze, głównie w początkowym okresie budowy kopalni, wielokrotnie występowały zagrożenia i awarie wodne, które skutkowały koniecznością odwadniania szybów (Bocheńska, Wilk, 2003; Downorowicz, 2007).

Szyb R-XI znajduje się na terenie kopalni O/ZG Rudna KGHM Polska Miedź S.A., w granicach złoża rud miedzi Rudna (ryc. 1). Przystąpienie do budowy szybu poprzedziły badania geologiczne wykonane w otworach „podszybowych” S-372A i S-372B (Kozula i in., 1991). Głębienie szybu rozpoczęto w 2000 r., został on oddany do użytku w 2005 r. Jego całkowita głębokość wynosi 1250 m (Kosmowski i in., 2005). Dopływ wód z poziomu wodonośnego pstrego piaskowca środkowego i dolnego do szybu R-XI nastąpił w wyłomie szybu na głębokości 635 m. Był on odwadniany w okresie od 22.03.2002 r. do 6.08.2003 r., ze średnią wydajnością 115,6 m<sup>3</sup>/h (łącznie wypompowano ok. 1395 tys. m<sup>3</sup> wody). Podczas odwadniania prowadzono obserwacje położenia zwierciadła wody w piezometrach

sieci monitoringowej wód podziemnych O/ZG Rudna, które wykonywano 4-krotnie w ciągu roku (Kalisz, Niedbał, 2004).

Podczas odwadniania szybu R-XI zaobserwowano reakcję położenia zwierciadła wody poziomów wodonośnych: pstrego piaskowca środkowego i dolnego oraz w mniejszym zakresie poziomu wodonośnego oligocenu (poziom „podwęglowy” – O1, Tr<sub>1</sub>; Staśko i in., 2012).

Celem artykułu jest przeanalizowanie cyklicznych pomiarów wykonywanych w piezometrach sieci obserwacyjnej zakładu górniczego w czasie odwadniania szybu górniczego, pod kątem określania parametrów filtracyjnych odwadnianej warstwy wodonośnej.

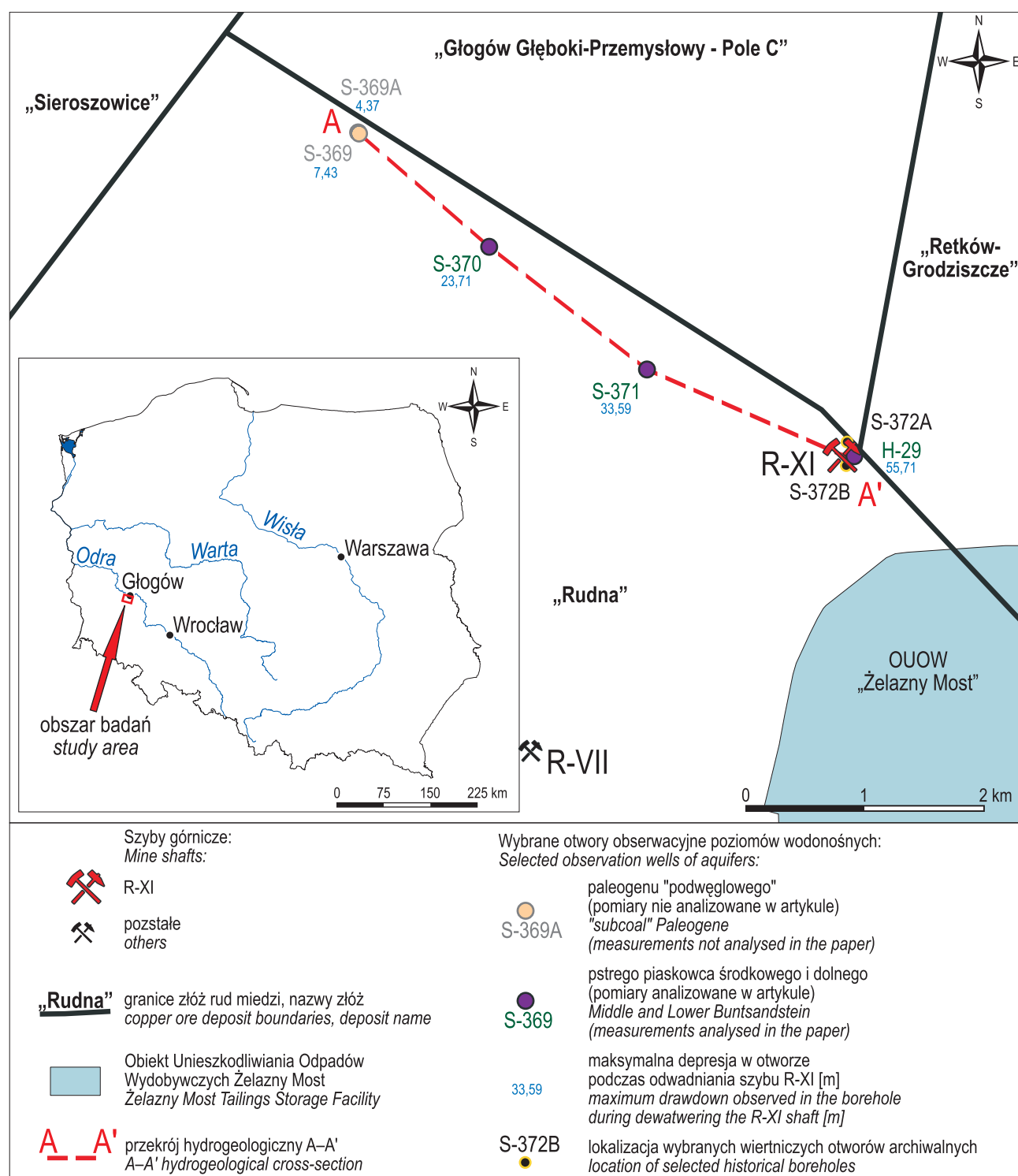
W artykule wykorzystano dane publikowane, dane pomiarowe z sieci obserwacyjnej wód podziemnych KGHM Polska Miedź S.A oraz pomiarowy wykonawczy przeprowadzony w piezometrze H-29, zanim został włączony do sieci obserwacyjnej. Otwór H-29 został odwiercony w celu prowadzenia obserwacji wpływu drenażu ujmowanego poziomu przez szyb R-XI, następnie prowadzono w nim cykliczne pomiary w ramach sieci obserwacyjnej KGHM Polska Miedź S.A. (Kapuściarek, 2002).

## OBSZAR BADAŃ

Złoże rud miedzi, które jest przedmiotem eksploatacji podziemnej prowadzonej przez KGHM Polska Miedź S.A., na terenie monokliny przedsudeckiej zostało udokumentowane w skałach osadowych permu (czerwony spągowiec, cechsztyn). Podłoże monokliny przedsudeckiej tworzą skały krystaliczne proterozoiku oraz osadowe dewonu i karbonu, na których spoczywają monoklinalnie utwory permu i triasu, zapadające pod niewielkim kątem ku północnemu wscho-

<sup>1</sup> KGHM Cuprum Sp. z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe, ul. Sikorskiego 2-8, 53-659 Wrocław; [maciej.pikula@kghmcurp.com](mailto:maciej.pikula@kghmcurp.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 R-XI i analizowanych punktów obserwacyjnych  
**Fig. 1.** Location of the R-XI shaft and the observation wells analysed

dowi, które z kolei są przykryte niezgodnie utworami kenozoicznymi (Badura, 2006, 2013; Kiersnowski, Petecki 2017).

W zgeneralizowanym obrazie profilu hydrogeologicznego omawianego obszaru można wyróżnić dwa zasadnicze kompleksy wodonośne: górny – kenozoiczny, oraz dolny – triasowo-permski. Kompleks kenozoiczny ma charakter porowy i obejmuje luźne utwory czwartorzędu i neogenu-paleogenu. Kompleks triasowo-permski występuje w zwięzłych, porowatych i szczelinowatych, a także kamernistych skałach węglanowych i klastycznych: wapienia

muszlowego, pstrego piaskowca, cechsztynu i czerwonego spągowca (Becker i in., 2007).

W kompleksie triasowo-permskim wyróżnia się dwa piętra wodonośne: triasu (T) i permu (P). W piętrze triasowym wyodrębnia się poziomy wodonośne:

- wapienia muszlowego (Tw) (utwory węglanowe),
- pstrego piaskowca górnego „retu” (Tp<sub>3</sub>) (utwory węglanowe),
- pstrego piaskowca środkowego (Tp<sub>2</sub>) (piaskowce),
- pstrego piaskowca dolnego (Tp<sub>1</sub>) (piaskowce).

Pstry piaskowiec jest jednostką litostratygraficzną, która pod względem chronostratygraficznym należy głównie do triasu dolnego, dolna jego część do permu górnego, natomiast część górna do triasu środkowego. Podział na utwory pstrego piaskowca środkowego i dolnego w opisach profili poszczególnych otworów wiertniczych na omawianym obszarze ma zazwyczaj charakter umowny, a pod względem hydraulicznym wspomniane utwory wodonośne można, w pewnym uproszczeniu, potraktować jako jeden poziom wodonośny. W niniejszym artykule zastosowano nazewnictwo „poziom wodonośny pstrego piaskowca środkowego i dolnego”. Wody tego poziomu wodonośnego występują w piaskowcach cechujących się różnym uziarnieniem (od drobno- do gruboziarnistego) przewarstwianych wkładkami łupków ilastych oraz gipsu. Utwory tego wodonośca wykazują ciągłość na całym analizowanym obszarze (ryc. 1 i 2). Podkenozoiczne wychodnie utworów wodonośnych pstrego piaskowca środkowego i dolnego zalegają w rozległym pasie o kilkunastokilometrowej szerokości, położonym na północny wschód od wychodni utworów cechsztynu (Kłapciński i in., 1984). Na znacznej części obszaru badań utwory omawianego poziomu wodonośnego są przykryte przepuszczalnymi osadami paleogenu (ok. 40% powierzchni analizowanego terenu). Na północ i północny zachód od rejonu występowania wspomnianych podkenozoicznych wychodni, w stropie utworów wodonośnych pstrego piaskowca zalegają łożyska i anhydryty, które oddzielają wyżejległe węglanowe osady wodonośne pstrego piaskowca górnego (ret) i wapienia muszlowego. W obszarze miedzionośnym utwory pstrego piaskowca środkowego i dolnego zanikają na południowym zachodzie, a w północnych rejonach udokumentowanych złóż rud miedzi osiągają miąższość do ok. 600 m. Współczynnik filtracji tych osadów na wspomnianym obszarze przyjmuje wartość od  $10^{-9}$  do  $10^{-6}$  m/s, średnio  $10^{-7}$  m/s, a wodoprzewodność  $T$  waha się od  $10^{-7}$  do  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s, średnio  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s (Becker i in., 2007). W profilu pionowym omawianych osadów na opisywanym obszarze wartość współczynnika filtracji generalnie obniża się wraz z głębokością, co jest wynikiem m.in. wzrostu zawartości minerałów ilastych.

W analizowanych otworach S-370, S-371 oraz w otworach „podszybowych” S-372A i S-372B na etapie ich wiercenia wykonywano badania hydrogeologiczne w poziomie wodonośnym, który jest przedmiotem niniejszej pracy (Kasiarz i in., 1983; Kozula i in., 1991). Metodykę wykonanych badań archiwalnych oraz ich wyniki opisano w dalszych częściach artykułu.

Poziom wodonośny pstrego piaskowca środkowego i dolnego, podobnie jak poziomy wodonośny neogenu „międzywęglowego”, paleogenu „podwęglowego”, pstrego piaskowca górnego, dolomitu głównego, wapienia cechsztyńskiego i czerwonego spągowca, jest objęty drenażem górniczym. Prowadzone od kilkadziesiąt lat odwodnienia górnicze spowodowały rozwój lejów depresyjnych w wymienionych wodonoścach (Bocheńska i in., 1995; Becker i in., 2007). W okresie poprzedzającym rozpoczęcie odwadniania kopalń rud miedzi, w granicach obszaru badań zwierciadło poziomu wodonośnego pstrego piaskowca środkowego i dolnego stabilizowało się na rzędnej ok. 80 m n.p.m., w okresie prowadzonych obserwacji ustabilizowane zwierciadło zalegało na rzędnych od -41,55 do -45,50 m n.p.m. – ryc. 2 (Bocheńska, 1984; Kasiarz

i in., 1983). Ze względu na małą liczbę punktów obserwacyjnych opisywanego poziomu, które istniały w okresie, kiedy odwadniano szyb R-XI, nie jest możliwe precyzyjne wyznaczenie kierunków przepływu wód analizowanego poziomu wodonośnego. Dla obszaru eksploatacji złóż rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej, dla omawianego poziomu, przyjmuje się południowy kierunek przepływu wód podziemnych, jest to uogólniony kierunek przepływu wód w większości z odwadnianych poziomów wodonośnych na tym terenie (Becker i in., 2006).

## METODYKA

### Pomiary wykonane w sieci obserwacyjnej KGHM Polska Miedź S.A. podczas odwadniania szybu R-XI

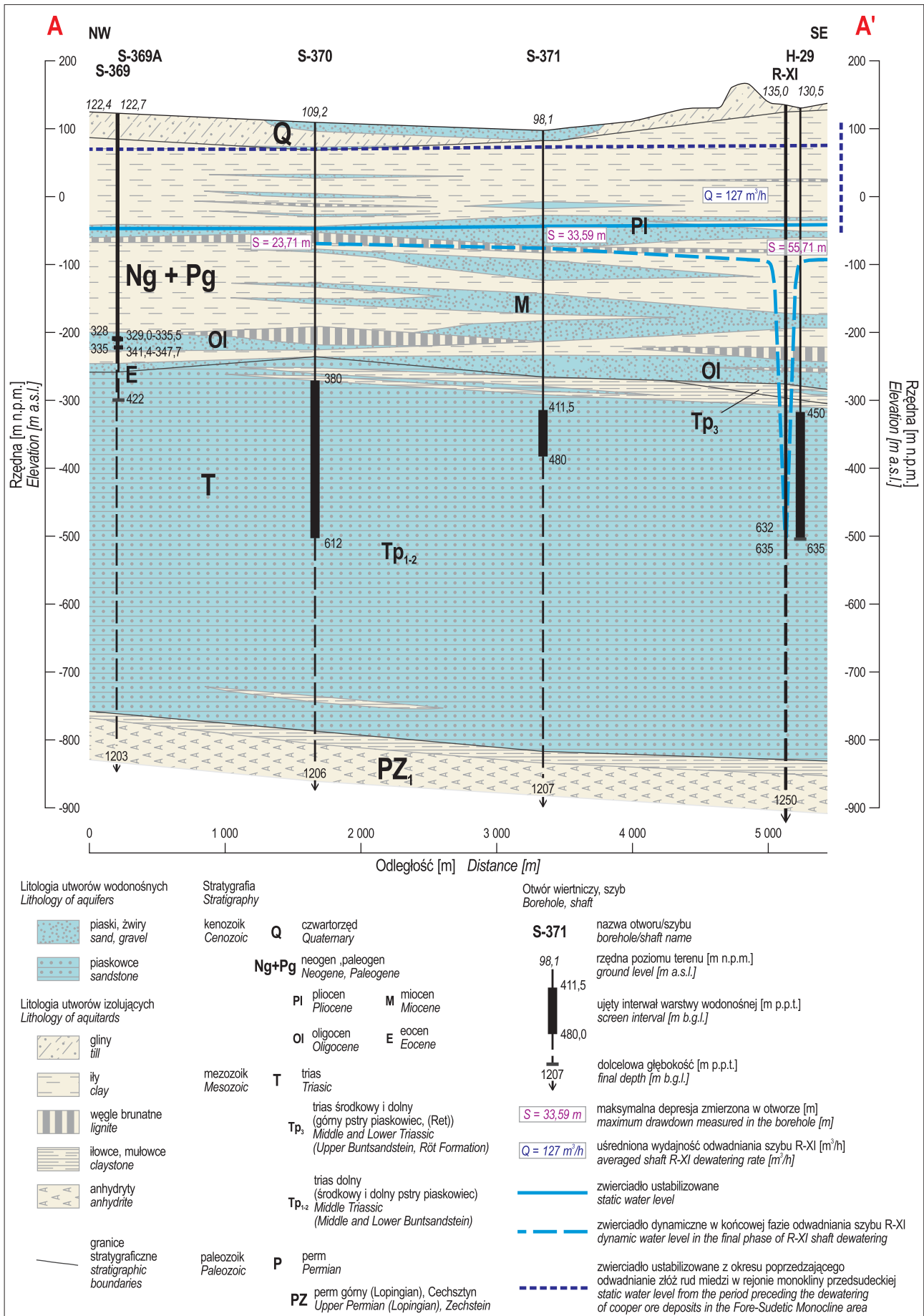
Jednoznaczną reakcją położenia zwierciadła wody podczas odwadniania poziomu pstrego piaskowca środkowego i dolnego w szybie R-XI zaobserwowano w otworach ujmujących odwadniany poziom: H-29, S-370 i S-371. Piezometry te znajdują się w odległości 0,1–3,4 km od szybu R-XI (ryc. 1, tab. 1). Są one rozmieszczone w szeregu ułożonym prostopadle do zgeneralizowanego kierunku wód podziemnych, tworząc tym samym hydrowęzeł w jego najbardziej podstawowej postaci (Pazdro, 1983; Dąbrowski, Przybyłek, 2005). Pomiary w otworach obserwacyjnych wykonywano manualnie, za pomocą akustycznej świstawki hydrogeologicznej zainstalowanej na taśmie mierniczej lub świstawki elektrycznej na kablu z oznaczoną skalą metryczną.

W niniejszym artykule przeanalizowano dane pomiarowe z ww. otworów, które uzyskano w okresie odwadniania szybu R-XI oraz po jego zakończeniu. Szyb był odwadniany od 22.03.2002 r. do 6.08.2003 r., znaczący dopływ wody do szybu miał miejsce w czasie 22.03.2000–19.04.2003 r. W fazie wzmożonego dopływu szyb odwadniano ze średnią wydajnością 131 m<sup>3</sup>/h. W późniejszym czasie (do 6.08.2003 r.), wskutek zabiegów uszczelniających, dopływ został zredukowany do bardzo niewielkiej ilości – 1,5–3,6 m<sup>3</sup>/h, następnie dopływ ustał zupełnie. Dla odwadniania szybu analizowano dane pomiarowe z okresu, w którym wodę wypompowywano ze zbliżoną wydajnością, pomiary wybrane do obliczeń pochodzą z przedziału czasowego od 29.04.2002 r. do 16.01.2003 r.

Dla czasu stabilizacji do obliczeń wykorzystano dane z czasu od 14.05.2003 r. do 26.03.2007 r. Pierwsza seria pomiarowa, analizowana jako dane z okresu stabilizacji, pochodzi z etapu, kiedy woda dopływała do szybu R-XI w szczątkowej ilości, przed całkowitym ustaniem dopływu (ryc. 3). Wspomniany dopływ ze względu na znikomą wielkość nie miał wpływu na dynamikę odbudowy zwierciadła w punktach obserwacyjnych.

Z okresu pompowania do obliczeń wykorzystano od 3 do 5 pomiarów z każdego analizowanego punktu, do analiz danych z okresu stabilizacji posłużono się 15 pomiarami z każdego piezometru, czyli wielokrotnie mniej niż wynika z zalecanej częstotliwości prowadzenia pomiarów w czasie próbnych pompowań (Dąbrowski, Przybyłek, 2005; Gonet i in., 2011).

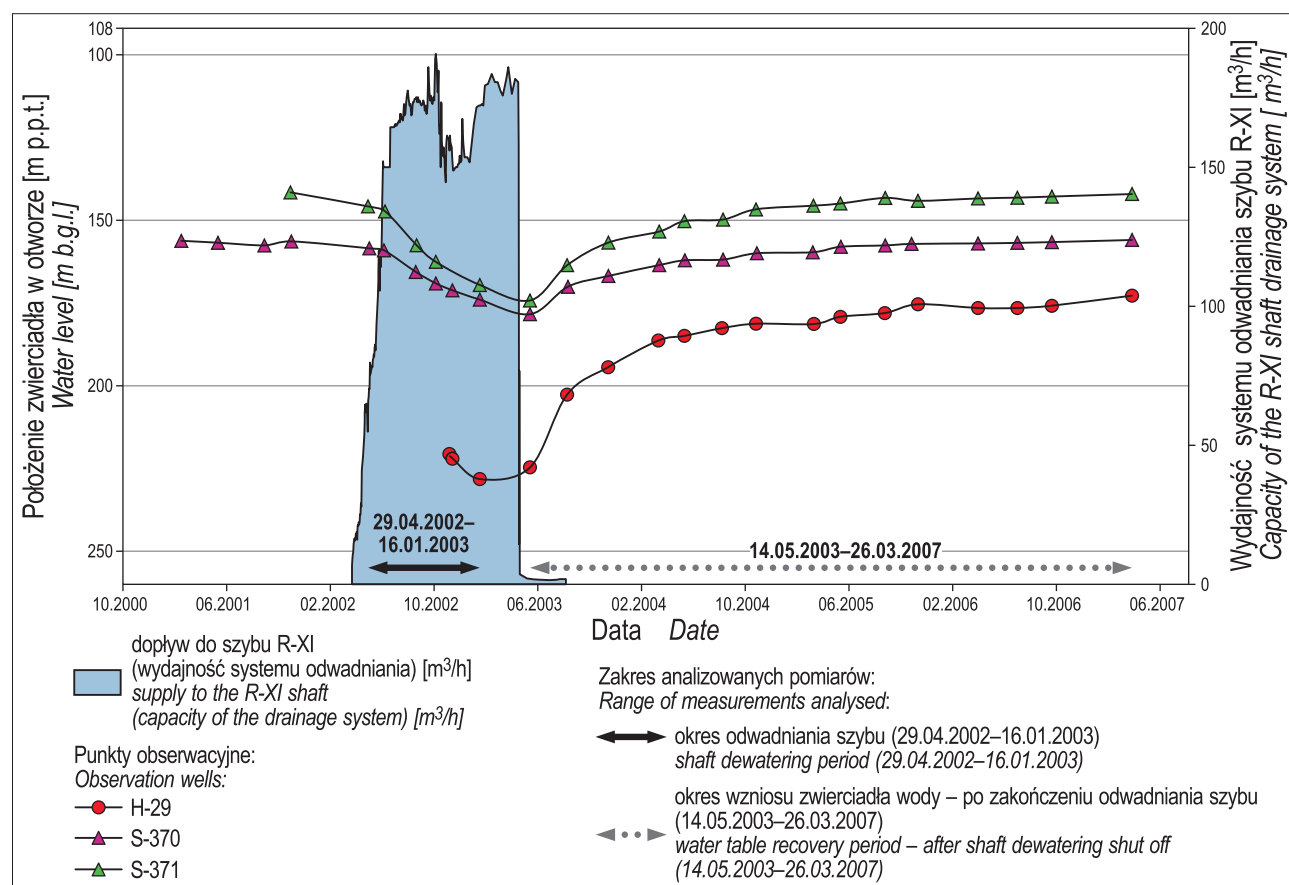
Obliczenia współczynnika filtracji wykonano metodami: Theisa dla okresu odwadniania i Theisa z rozwiązaniem Agarwala dla okresu stabilizacji – ryc. 4 i 5 (Theis, 1935; Agarwal, 1980; Röhrich, 2008). Rozwiązanie podwójnie



Ryc. 2. Przekrój hydrogeologiczny A–A'  
Fig. 2. A–A' hydrogeological cross section

**Tab. 1.** Podstawowe dane z piezometrów H-29, S-370, S-371 w okresie odwadniania szybu R-XI  
**Table 1.** Essential data from piezometers H-29, S-370, S-371 during the R-XI shaft dewatering period

Nazwa punktu obserwacyjnego Name of the observation point	Odległość od szybu R-XI Distance from the R-XI shaft	Położenie ustabilizowanego zwierciadła poziomu wodonośnego pstręgo piaskowca środkowego i dolnego – wartość przyjęta dla analizowanego okresu Position of the stabilized water table of the middle and lower Buntsandstein aquifer – value assumed for the analysed period	Maksymalna depresja zaobserwowana w otworze podczas odwadniania szybu R-XI Maximum drawdown observed in borehole during R-XI shaft dewatering
	[m]	[głębokość m p.p.t. / (rzędna m n.p.m.)] [depth m b.g.l./ (elevation [m a.s.l.])]	[m]
H-29	107,71	172,50 / (-41,55)	55,71
S-371	1785,69	140,65 / (-42,55)	33,59
S-370	3440,23	154,70 / (-45,50)	23,71



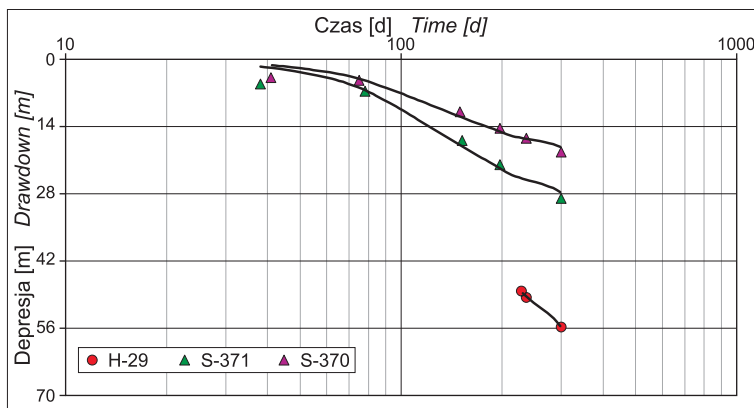
**Ryc. 3.** Położenie zwierciadła wody w otworach obserwacyjnych poziomu wodonośnego pstręgo piaskowca środkowego i dolnego w czasie odwadniania szybu R-XI

**Fig. 3.** Water table position in the observation wells of the middle and lower Buntsandstein aquifer during the R-XI shaft dewatering

logarytmiczne Theisa jest przeznaczony do interpretacji próbnych pompowań w naporowych warstwach wodonośnych o szczelnym stropie i spągu, dla niustalonego stanu strumienia. Sposób Agarwala służy do analizy danych z odbudowy zwierciadła po zakończeniu pompowania. Metoda bazuje na wielkości wzniosu oraz czasie zrównoważonym (odwrócona oś czasu). Procedura obliczeniowa opiera się na dopasowaniu danych pomiarowych do krzywych wzorcowych opracowanych dla analizy próbnych pompowań. Dla otworów z przekroju A–A' miąższość omawianego poziomu wodonośnego waha się od 505 do 546 m, średnio 527 m (ryc. 2), i tę uśrednioną wartość przyjęto do obliczeń wykonanych w artykule.

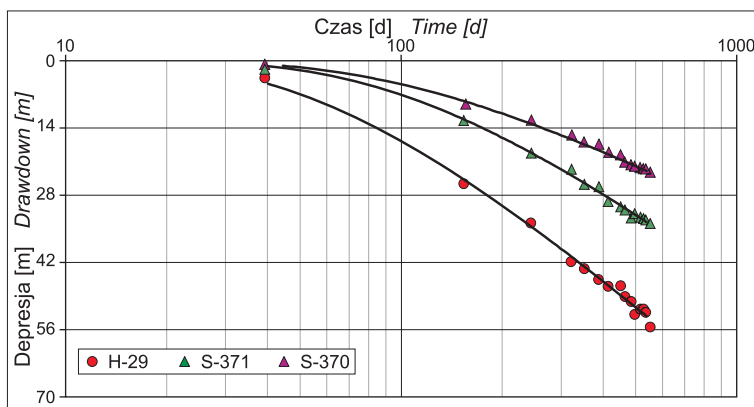
#### Archiwalne badania hydrogeologiczne wykonane na analizowanym obszarze w poziomie wodonośnym pstręgo piaskowca środkowego i dolnego

Piezometry S-370 i S-371 zabudowano w otworach rozpoznawczych odwierconych na terenie złoża rud miedzi Rudna. W odwiertach tych w celu określenia współczynnika filtracji ujętego poziomu wodonośnego wykonano badania hydrogeologiczne metodą szczypania wody z otworu przy pomocy łyżki wiertniczej. Podczas badań położenie zwierciadła wody mierzono manualnie, metodami analogicznymi jak dla pomiarów w sieci obserwacyjnej. Interpretacja wyników badań była wykonywana za pomocą



**Ryc. 4.** Wykres analityczny z obliczeń współczynnika filtracji na podstawie danych pomiarowych z piezometrów H-29, S-370 i S-371 z okresu odwadniania szybu R-XI – metoda Theisa z uwzględnieniem zmiennej wydajności (AquiferTest Pro v 10.0)

**Fig. 4.** Analytical graph from the calculation of the hydraulic conductivity based on measurement data the from piezometers H-29, S-370 and S-371 from the R-XI shaft dewatering period – Theis method with variable capacity (AquiferTest Pro v 10.0)



**Ryc. 5.** Wykres analityczny z obliczeń współczynnika filtracji na podstawie danych pomiarowych z piezometrów H-29, S-370 i S-371 z okresu stabilizacji zwierciadła po odwadnianiu szybu R-XI – metoda Theisa – rozwiązanie Agarwala (AquiferTest Pro v 10.0)

**Fig. 5.** Analytical graph from the calculation of the hydraulic conductivity based on measurement data the from piezometers H-29, S-370 and S-371 from period of water-table stabilization after R-XI shaft dewatering – Theis method, Agarwal solution (AquiferTest Pro v 10.0)

wzorów: Dupuita, Giryńskiego i Muskata (Muskat, 1937; Turek, 1971; Kasiarz i in., 1983).

W otworze S-370 badania archiwalne wykonano w interwale 380,0–617,5 m p.p.t., przy zasięgu głębokościowym występowania poziomu wodonośnego 345,0–896,4 m p.p.t. Dla otworu S-371 badania przeprowadzono dla dwóch interwałów: 411,5–482,0 oraz 411,5–776,0 m p.p.t., zasięg występowania poziomu wodonośnego wynosił 375,5–914,5 m p.p.t. (Kasiarz i in., 1983). Wartość współczynnika filtracji w S-370 obliczono wzorem Muskata ( $k = 1,17 \cdot 10^{-7}$  m/s), dla badań w S-371 wykonanych w pierwszym interwale wykorzystano wzór Giryńskiego ( $k = 1,57 \cdot 10^{-7}$  m/s), a dla drugiego – znacznie dłuższego odsłoniętego odcinka – wzór Dupuita ( $k = 4,67 \cdot 10^{-8}$  m/s). W niniejszym artykule jako bardziej reprezentatywną dla całego poziomu wodonośnego przyjęto wartość uzyskaną w badaniu na dłuższym ujętym interwale w otworze S-371.

Na potrzeby budowy szybu R-XI, w jego planowanej lokalizacji, parametry omawianego poziomu wodonośnego zostały określone na podstawie wyników badań

hydrogeologicznych w otworach „podszybowych” S-372A i S-372B (Kozula i in., 1991). W tych otworach w celu analizy poziomu wodonośnego wykonano badania hydrogeologiczne rurowym próbnikiem złoża oraz metodą szczywania wody z otworu. Pomiar ciśnienia w poziomie wodonośnym podczas badań próbnikiem rurowym złoża przeprowadzono za pomocą automatycznych rejestratorów ciśnienia, a pomiary położenia lustra wody podczas szczywania – manualnie, analogicznie jak w ww. otworach. Badania te wykonano dla 17 różnych interwałów. Na podstawie badań „próbnikowych” określono wartość przepuszczalności  $k_p$ , za pomocą:

- graficzno-analitycznej „metody całkowej”,
- „metody RAM” w oprogramowaniu Próbnik v. 4.1 stosowanym przez Przedsiębiorstwo Poszukiwań Nafty i Gazu w Zielonej Górze – Baza Opróbowań Próbnikami Złoża (Ramey i in., 1975; Buzinow, Umrihin, 1984; Kozula i in., 1991).

Wyniki badań metodą szczywania w otworach wiertniczych S-372A i S-372B zostały zinterpretowane za pomocą:

- wzoru Wierygina,
- metody krzywej wzniosu zwierciadła wody,
- graficzno-analitycznej „metody całkowej” (Buzinow, Umrihin, 1984; Wieczysty, 1982).

Obliczone z wykorzystaniem „metody RAM” wartości przepuszczalności  $k_p$ , mDcy zostały następnie przeliczone na wartości współczynników filtracji  $k$ , m/s, wg formuły podanej przez Pazdro (Kozula i in., 1991; Pazdro, 1983).

Przytoczone z dokumentacji „podszybowej” wartości współczynników filtracji obliczone dla otworu S-372A dla poszczególnych stref badawczych zawierają się w przedziale od  $1,98 \cdot 10^{-8}$  do  $5,69 \cdot 10^{-6}$  m/s, średnia arytmetyczna  $6,90 \cdot 10^{-7}$  m/s, średnia geometryczna  $2,83 \cdot 10^{-7}$  m/s, a dla otworu S-372B jest to zakres od  $1,81 \cdot 10^{-8}$  do  $3,60 \cdot 10^{-6}$  m/s, średnia arytmetyczna  $6,90 \cdot 10^{-7}$  m/s, średnia geometryczna  $3,11 \cdot 10^{-7}$  m/s – tab. 2 (Kozula i in., 1991). Jedyne badanie w głębszej strefie, tj. 953–958 m p.p.t. w otworze S-372A, wskazuje na utwory o bardzo niskiej przepuszczalności, ponieważ dało wynik negatywny – brak przyływu (Kozula i in., 1991).

Metody zastosowane podczas interpretacji badań poszczególnych odsłoniętych interwałów w otworach S-372A i S-372B nie uwzględniają całkowitej miąższości badanego poziomu wodonośnego, tylko miąższość strefy udostępnionej w otworze, określaną niekiedy w literaturze jako „miąższość efektywna”. Podejście, które zakłada adekwatność uzyskiwanych wyników jedynie dla udostępnionych stref badawczych, jest zasadne w przypadku niejednorodności pionowej badanego poziomu wodonośnego, która jest efektem występowania stref o bardzo obniżonej przepuszczalności o rozprzestrzenieniu horyzontalnym, co generalnie obniża przepuszczalność pionową (Gancarz, 1980). Badany wodonosiec wykazuje opisane cechy filtracyjne tylko w części opróbowanego interwału. Uśredniona war-

**Tab. 2.** Zestawienie wartości współczynnika filtracji [m/s]: archiwalne – obliczone na podstawie badań wykonanych w otworach H-29, S-370 i S-371 oraz obliczone w oparciu o obserwacje w tych otworach podczas odwadniania szybu R-XI**Table 2.** Summary of hydraulic conductivity values [m/s]: archival – calculated on the basis of tests performed in boreholes H-29, S-370 i S-371 and calculated on the basis of the observations in these boreholes during the dewatering of the R-XI shaft

Nr otworu <i>Borehole No.</i>	Parametr określony na podstawie badań wykonanych w otworach (badany interwał m p.p.t.) <i>Parameter determined on the basis of tests performed in the borehole (screen interval m b.g.l.)</i>	Obserwacje wykonane w okresie odwadniania szybu R-XI <i>Observations made during the period of R-XI shaft dewatering</i>	
		Interpretacja pomiarów wykonanych – okres odwadniania szybu <i>Interpretation of measurements – shaft drainage period</i>	Interpretacja pomiarów – stabilizacja zwierciadła po odwadnianiu <i>Interpretation of measurements – stabilization of the water table after drainage</i>
H-29	–	$2,23 \cdot 10^{-7}$	$2,47 \cdot 10^{-7}$
S-370	$1,17 \cdot 10^{-7}$ (380,0–617,5)	$8,51 \cdot 10^{-7}$	$4,28 \cdot 10^{-7}$
S-371	$4,67 \cdot 10^{-8}$ (411,5–776,0)	$5,43 \cdot 10^{-7}$	$2,90 \cdot 10^{-7}$
Średnia arytmetyczna <i>Arithmetic mean</i>		$5,39 \cdot 10^{-7}$	$3,22 \cdot 10^{-7}$

tość dla zbadanego przedziału głębokościowego (431,0–628,0 m p.p.t.) –  $k = 6,9 \cdot 10^{-7}$  m/s, charakteryzuje strefę o podwyższonej przepuszczalności analizowanego poziomu wodonośnego w stosunku do pozostałej części jego profilu. Przy uwzględnieniu pełnej miąższości utworów wodonośnych omawianego poziomu wodonośnego, wartości te były by w oczywisty sposób niższe.

Część metod obliczeniowych zastosowanych w opracowaniach archiwalnych dla analizowanych otworów opiera się na wzorach dla filtracji ustalonej w warstwie naporowej – metoda Dupuita, Giryńskiego, Muskata i Wierygina (Muskat, 1937; Turek, 1971). Wzór Dupuita jest przeznaczony dla przypadku studni doskonałej, zastosowanie pozostałych trzech wzorów przewidziano dla studni niedoskonałych (niezupełnych) o różnym typie geometrii. Metoda krzywej wzniosu, która posłużyła do interpretacji badań metodą szcerpywania w otworach S-372A i S-372B, jest jednym ze sposobów interpretacji odbudowy zwierciadła wody w otworze po krótkotrwałym szcerpaniu z niego wody, dla przypadku warstwy o nieograniczonej miąższości (Wieczysty, 1982). Graficzno-analityczna „metoda całkowa” zastosowana dla archiwalnych analiz badań w analizowanych otworach „podszybowych” jest przeznaczona do testów odbudowy ciśnienia dennego w otworach naftowych, należy do grupy tzw. „metod prostoliniowych”. Analityczno-graficzna metoda Ramey’a, Agarwala i Martina („metoda RAM”), która posłużyła do interpretacji badań rurowym próbnikiem złoża, jest klasyfikowana jako jedna z metod prowadzących się do dopasowania wykresu analizowanych danych do wybranej krzywej spośród rodziny krzywych wzorcowych (Buzinow, Umrihin, 1984; Ramey i in., 1975; Gringarten, 2008).

Badania hydrogeologiczne omawianego poziomu wodonośnego w otworach S-372A i S-372B wykonano łącznie w kilkunastu interwałach (po kilka metrów długości każdy), z których zdecydowaną większość zrealizowano na głębokości od 431 do 628 m p.p.t., przy całkowitym zasięgu utworów wodonośnych tego poziomu od 415,5 do 965,5 m p.p.t.

W artykule odniesiono się również do wyników długotrwałego, dwustopniowego próbnego pompowania, które wykonano w poziomie wodonośnym dolnego i środkowego pstręgo piaskowca na obszarze oddalonym o 7,8 km na SE od szybu R-XI (Pikuła i in., 2023). Podczas przytoczonych badań pomiaru wykonywano w hydrowężle skła-

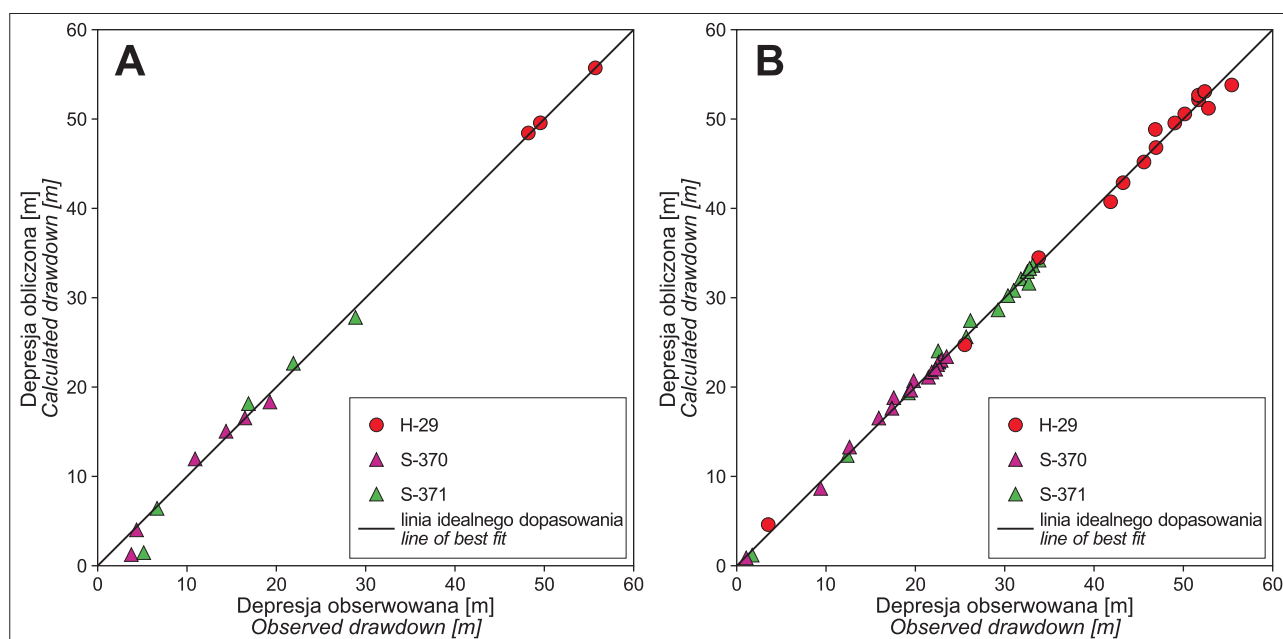
dającym się ze studni i dwóch otworów obserwacyjnych. Próbnę pompowanie prowadzono jako dwustopniowe z wydajnością 60 i 80 m<sup>3</sup>/h, trwało ono 124 dni (50 dni – pompowanie, 74 dni – stabilizacja zwierciadła wody). Obserwacje były robione w sposób automatyczny za pomocą rejestratorów ciśnienia, wyniki zinterpretowano w środowisku oprogramowania AqiferTest przy pomocy metod:

- dla pompowania Theisa, Agarwala,
- dla stabilizacji Theisa-Rozwiązanie Agarwala, Agarwala – rozwiązanie Agarwala (Theis, 1935; Agarwal i in., 1970; Agarwal, 1980; Röhrich, 2008). Metody Agarwala oraz Agarwala – rozwiązanie Agarwala służą do analizy danych z próbnego pompowania w warstwie naporowej dla przepływu nieustalonego oraz danych z okresu stabilizacji po próbnym pompowaniu. Są to metody uwzględniające tzw. „efekty studni” – efekt przyścienny, efekt pojemnościowy.

## WYNIKI I DYSKUSJA BADAŃ

Wyraźną reakcję na odwadnianie szybu R-XI zaobserwowano również w otworach ujmujących poziom Tr<sub>1</sub>: S-369A, S-369 oddalonych o 4,8 km na NW od szybu R-XI (ryc. 1) oraz H-22 i H-25 (poza analizowanym obszarem, oddalone odpowiednio o 5,3 km i 7,9 km na SW od szybu R-XI). W piezometrach poziomu Tr<sub>1</sub> zwierciadło uległo maksymalnemu obniżeniu od 4,34 m do 7,63 m.

W rejonie eksploatacji złóż rud miedzi poziomy wodonośny paleogenu oraz pstręgo środkowego i dolnego piaskowca są w znacznej mierze hydraulicznie połączone. Analiza profili otworów wymienionych w niniejszej pracy wskazuje, że „podwęglowy” poziom wodonośny charakteryzuje dwudzielność (ryc. 2). W bezpośrednim kontakcie hydraulicznym z wodonośnymi utworami odwadnianego wodonośca jest piaszczysta warstwa wodonośna, której wiek określa się jako eocen (Badura, 2013). Powyżej w profilu udokumentowano kolejną, piaszczysto-żwirową warstwę wodonośną, wieku oligoceńskiego. Piezometry S-369 i S-369A ujmują wodonośne utwory oligoceńskie, które od niżej leżących warstw eocenu w znacznym stopniu izoluje 10–20 m warstwa mułków. Rekcja zwierciadła wody w ww. otworach podczas odwadniania szybu jest dość wyraźna, jednak na podstawie analizowanych profili i przekrojów można zakładać, że relacja hydrauliczna



**Ryc. 6.** Wykresy wartości depresji zmierzonych w otworach H-29, S-370 i S-371 oraz obliczonych przez program: **A** – odwadnianie szybu R-XI, **B** – stabilizacja zwierciadła po odwadnianiu szybu R-XI

**Fig. 6.** Plot of drawdown values measured boreholes H-29, S-370 and S-371 vs. those calculated by the software: **A** – drainage of the R-XI shaft, **B** – stabilization of the water table after the R-XI shaft dewatering

**Tab. 3.** Statystyki dopasowania analizowanych pomiarów wykonanych w otworach podczas odwadniania szybu R-XI i wartości modelowych skalkulowanych przez program analityczny

**Table 3.** Statistics of the fit – measurements taken during the R-XI shaft dewatering and model values calculated by the analytical program

Etap obserwacji <i>Observation phase</i>	Nr otworu obserwacyjnego <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 R-XI <i>R-XI shaft dewatering</i>	H-29	0,001	0,092	0,031	0,176
	S-370	0,368	8,417	1,403	1,184
	S-371	0,637	15,126	3,025	1,739
Stabilizacja zwierciadła wody po odwadnianiu szybu R-XI <i>Recovery of the water table after the R-XI shaft dewatering</i>	H-29	-0,037	14,876	0,992	0,996
	S-370	0,027	3,774	0,252	0,502
	S-371	0,039	6,214	0,414	0,644

między wodonościami ma złożony charakter. Zdaniem autorów ilość danych pomiarowych jest niedostateczna na potrzeby ich analizy z uwzględnieniem skomplikowanej relacji hydraulicznej utworów wodonośnych oligocenu z poziomem odwadnianym (metody analityczne dla próbnego pompowania w wodonośnym systemie wielowarstwowym). Dlatego, pomimo stwierdzonej reakcji w poziomie Tr<sub>1</sub>, przytoczonych danych z piezometrów S-369 i S-369A oraz H-22 i H-25 nie interpretowano. W opisanych warunkach hydrogeologicznych zastosowane metody analityczne interpretacji próbnego pompowania nie uwzględniają zasilania z poziomu wodonośnego oligocenu i umożliwiają uzyskanie orientacyjnej wartości parametrów filtracyjnych ujmowanego poziomu, tj. odwadnianego w szybie R-XI (Dąbrowski, Przybyłek, 2005).

Pod koniec odwadniania szybu R-XI, w samym szybie zwierciadło zostało obniżone do 635 m p.p.t., czyli położenia dna szybu w czasie odwadniania (ok. 225 m poniżej stropu poziomu wodonośnego pstrego piaskowca środko-

wego i dolnego). Zmierzona wielkość depresji w szybie ma jednak wątpliwą miarodajność w stosunku do rzeczywistej depresji w odwadnianej warstwie wodonośnej. W szybie „ujęto” jedynie niewielki fragment warstwy wodonośnej, tj. 3 m z 527 m miąższości, co musiało skutkować wytworzeniem znacznego zeskoku hydraulicznego na granicy wylomu szybu i utworów wodonośnych. W związku z powyższymi wątpliwościami pomiary położenia zwierciadła wody w odwadnianym szybie nie były przedmiotem interpretacji.

Jak wspomniano wcześniej, analizowany poziom wodonośny jest objęty wpływem drenażu górniczego, czego wynikiem jest obserwowane w wieloletniu obniżenie położenia zwierciadła wód oraz powstanie leja depresyjnego w rejonie prowadzonej działalności górniczej. W obszarze badań tuż przed rozpoczęciem odwadniania szybu R-XI, w porównaniu do stanu sprzed rozpoczęcia wydobywania rud miedzi, zwierciadło uległo obniżeniu o 114–120 m (ryc. 1 i 2). Analiza danych pomiarowych w otworach



S-370 i S-371 wskazuje na zbliżone wartości głębokości zalegania lustra wody w tych punktach obserwacyjnych w okresie bezpośrednio poprzedzającym odwadnianie szybu oraz po zakończeniu stabilizacji zwierciadła (S-370 obniżenie o 0,52 m, S-371 wznios o 0,24 m). Powyższa obserwacja wskazuje na ustabilizowanie się warunków przepływu wód w obszarze badań i brak zauważalnego, długotrwałego trendu obniżania zwierciadła w rozpatrywanym okresie czasu dla badanych piezometrów. Ponieważ położenie lustra wody w analizowanych otworach nie ulegało dodatkowemu obniżaniu podczas odwadniania szybu R-XI, nie zachodzi potrzeba uwzględniania wpływu czynników zewnętrznych w postaci odwodnień górniczych na wyniki wykonanych obserwacji.

W trakcie odwadniania szybu R-XI w poszczególnych piezometrach zarejestrowano maksymalne wartości depresji (tab. 1): 55,71 m (H-29), 33,59 m (S-371) i 23,71 m (S-371). Na rycinach 4 i 5 przedstawiono wykresy analityczne z obliczeń parametrów filtracyjnych dla piezometrów: H-29, S-370 i S-371, na rycinie 6A i B oraz w tabeli 3 zaprezentowano w formie graficznej i liczbowej statystyki dopasowania danych pomiarowych oraz wartości wyliczonych przez program analityczny dla wymienionych punktów obserwacyjnych. Obliczona wartość współczynnika filtracji dla okresu odwadniania waha się od  $2,23 \cdot 10^{-7}$  do  $8,51 \cdot 10^{-7}$  m/s, średnio  $5,39 \cdot 10^{-7}$  m/s, dla okresu stabilizacji zwierciadła od  $2,47 \cdot 10^{-7}$  do  $4,28 \cdot 10^{-7}$  m/s, średnio  $3,22 \cdot 10^{-7}$  m/s. Są wartości, które klasyfikują analizowane osady jako utwory o niskiej przepuszczalności (Head i in., 2011). Wartość przewodności hydraulicznej waha się od  $1,18 \cdot 10^{-4}$  do  $4,48 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s, średnio  $2,84 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s dla danych z okresu odwadniania oraz dla czasu stabilizacji od  $1,30 \cdot 10^{-4}$  do  $2,26 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s, średnio  $1,70 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s – tab. 2. Zgodnie z klasyfikacją Krasnego są to skały o przewodności średniej (Krasny, 1993).

Wyniki uzyskane na podstawie pomiarów z okresu odwadniania wykazują znacznie większe zróżnicowanie niż parametry obliczone na podstawie analizy danych z okresu stabilizacji zwierciadła, w pierwszym przypadku rozstęp jest równy  $6,28 \cdot 10^{-7}$  m/s, a w drugim  $1,81 \cdot 10^{-7}$  m/s. Na diagramach dopasowania wartości depresji zmierzonych (oś X) i wartości modelowych (oś Y) dla obu populacji pomiarów poszczególne punkty znajdują się blisko linii idealnego dopasowania. Powyższa prawidłowość potwierdza, że wartości modelowe nie są przeszacowane lub niedoszacowane w stosunku do wartości zmierzonych (ryc. 6A, B). Dla danych pomiarowych i wartości wyliczonych, okres odwadniania dla poszczególnych piezometrów charakteryzują współczynniki determinacji  $R^2$  od 0,97 do 0,99, a dla okresu stabilizacji są dla każdego piezometru równe 0,99, co potwierdza bardzo dobre dopasowanie wartości zmierzonych i modelowych.

Wyniki uzyskane dla otworów S-370 i S-371 w czasie odwadniania szybu R-XI są od 7,3- do 11,5-krotnie wyższe od archiwalnych wartości współczynników filtracji określone na podstawie badań wykonanych bezpośrednio w tych otworach, parametry obliczone na podstawie obserwacji prowadzonych czasie stabilizacji zwierciadła po zakończeniu odwadniania są od 3,7 do 6,2 krotnie wyższe od wartości archiwalnych. Wyższe uzyskane wartości analizowanego współczynnika w stosunku do rezultatów archiwalnych mogą wynikać z niedokładności pomiarów wykonanych podczas badań hydrogeologicznych w otworach, niepeł-

nego oczyszczenia przestrzeni przyotworowej oraz z efektu skali.

Wyniki badań w otworach S-372A i S-372B oraz analizy obserwacji w piezometrze H-29, pomimo dość niewielkiej odległości, jaka dzieli te punkty – odpowiednio 134 m i 104 m od H-29 – są nieporównywalne. Wiąże się to z różnym zakresem zrealizowanych badań oraz odmienną schematyzacją warunków hydrogeologicznych, co w przypadku wymienionych otworów „podszybowych” wynikało z celu badań – rozpoznania strefowej zmienności parametrów filtracyjnych badanego poziomu dla potrzeb wyboru optymalnej technologii głębinienia i zaprojektowania odpowiedniej obudowy szybu.

Uśrednione wartości współczynników filtracji, obliczone na podstawie analizowanych danych pomiarowych z okresu odwadniania i stabilizacji, wahają się od  $3,22 \cdot 10^{-7}$  do  $5,39 \cdot 10^{-7}$  m/s. Porównywalne wartości średnie tego parametru, tj. od  $4,06 \cdot 10^{-7}$  do  $4,45 \cdot 10^{-7}$  m/s, uzyskano na podstawie analizy danych z długotrwałego próbnego pompowania hydrowęzłowego, przeprowadzonego w opisywanym poziomie wodonośnym w lokalizacji oddalonej 8 km na zachód od obszaru badań (Pikuła i in., 2023). Wartości współczynnika filtracji uzyskane w niniejszej pracy są zbliżone do wyników badań modelowania hydrogeologicznego przeprowadzonego w pobliżu obszaru badań, na podstawie którego uzyskano wartości współczynnika filtracji od  $4,18 \cdot 10^{-7}$  do  $5,0 \cdot 10^{-7}$  m/s (Dziedziak, Bielawski, 2005; Gruszecki i in., 2009). Porównywalne wyniki badań parametrów filtracyjnych analizowanego poziomu wodonośnego, które uzyskano dla poszczególnych piezometrów, do badań hydrogeologicznych prowadzonych przy podobnej wydajności próbnego pompowania oraz wyniki kalibracji numerycznych modeli filtracji w analizowanym poziomie wodonośnym, potwierdzają prawidłowość obliczeń wykonanych w niniejszym artykule.

## PODSUMOWANIE

Długotrwałe odwadnianie szybu górniczego, w wyniku wystąpienia wzmożonego dopływu z warstwy wodonośnej jest niepowtarzalną okazją do prowadzenia obserwacji hydrogeologicznych, które można interpretować za pomocą metod przeznaczonych dla próbnego pompowania hydrowęzłowych. Wyrażna reakcja poziomu wodonośnego obserwowana w długim okresie odwadniania szybu R-XI byłaby trudna do uzyskania podczas typowych badań hydrogeologicznych w głębokich otworach wiertniczych, co wynika z ograniczeń: technicznych, czasowych i finansowych.

Podczas odwodnienia obserwacje prowadzono na obszarze położonym w odległości do kilku kilometrów wokół szybu R-XI, a wpływ samego badania wykroczył poza odwadniany poziom wodonośny, skutkując reakcją młodszych, połączonych z nim struktur wodonośnych. Ze względu na ograniczoną ilość danych geologicznych i hydrogeologicznych zrezygnowano jednak z przeprowadzenia wiernej schematyzacji warunków hydrogeologicznych i zastosowano uproszczony schemat obliczeniowy, ograniczony do odwadnianego poziomu wodonośnego. Przyjęty schemat jest zalecany dla określenia szacunkowej wartości współczynnika filtracji ujętej warstwy.

W analizowanym przypadku dysponowano znacząco mniejszą liczbą danych pomiarowych w stosunku do takiej, która wynika z zalecanych częstotliwości wykony-

wania pomiarów w czasie próbnych pompowań. Jest to czynnik ograniczający wiarygodność uzyskanych rezultatów dla analizowanego przykładu. W związku z powyższym uzyskane wartości współczynnika filtracji należy traktować jako dane o wartości poglądowej, które nie definiują precyzyjnie parametrów badanego poziomu wodonośnego. Dla analizowanych danych uzyskano wysokie parametry dopasowania uzyskanych pomiarów do krzywych modelowych, a obliczone współczynniki filtracji reprezentują zbliżone wielkości. Powyższe przemawia za tym, że zastosowana metoda, przy analizie liczniejszej populacji pomiarów, zgodnej z ogólnie przyjętymi metodami wykonywania próbnych pompowań, może stanowić w pełni wartościowe narzędzie obliczania współczynnika filtracji. W celu uzyskania pełnowartościowych danych pomiarowych, w przypadku pojawiających się sytuacji awarii wodnych w szybach lub innych wyrobiskach górniczych, należy zwiększać częstotliwość pomiarów wykonywanych w hydrogeologicznej sieci obserwacyjnej zakładu górniczego.

Autorzy dziękują prof. dr. hab. Janowi Przybyłkowi oraz anonimowemu Recenzentowi za rzeczową i wnikliwą weryfikację pracy oraz liczne uwagi, które miały istotny wpływ na finalną formę artykułu.

## LITERATURA

- AGARWAL R.G., AL-HUSSAINY R., RAMEY H.J. JR. 1970 – An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow: I. Analytical treatment. *Soc. Petrol. Eng. J.*, 10 (3): 279–290.
- 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 Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro*.
- 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., MARKIEWICZ A., KALISZ M., KRZYWAŃSKI Z., SZUMILAS S., WŁOCH A. 2006 – Charakter kontaktów między poziomami wodonośnymi w obszarze miedzionośnym południowej części monokliny przedsudeckiej w aspekcie oceny zagrożeń wodnych kopalń KGHM Polska Miedź S.A. *Mat. Symp. Warsztaty z cyklu: Zagrożenia naturalne w górnictwie*.
- BECKER R., FISZER J., KALISZ M. 2007 — *Hydrogeologia*. [W:] Pietrzyński A. i in. (red.), *Monografia KGHM Polska Miedź S.A.*: 16–23. KGHM Cuprum Sp. z o.o., Lubin.
- BOCHEŃSKA T. 1984 – Zmiany warunków hydrodynamicznych w kompleksie utworów podzwartorzędowych lubińsko-głogowskiego obszaru miedzionośnego. *Prz. Geol.*, 32 (1): 26–30.
- BOCHEŃSKA T., FISZER J., KALISZ M. 1995 – Weryfikacja prognoz dopływów do kopalń w Legnicko-Głogowskim Obszarze Miedzionośnym na podstawie badań modelowych. *Współczesne Probl. Hydrogeol.*, 7: 39–46.
- BOCHEŃSKA T., WILK Z. (red.) 2003 – *Hydrogeologia polskich złóż kopalni i problemy wodne górnictwa*, tom 2. Uczelniane Wydaw. Naukowo-Dydaktyczne, Kraków.
- BUZINOW S.N., UMRIHIN I.D. 1984 – *Issledowanije nieftianych i gazowych skważyn i płastów*. Wydaw. Niedra, Moskwa.
- DĄBROWSKI S., PRZYBYŁEK J. 2005 – *Metodyka próbnych pompowań w dokumentowaniu zasobów wód podziemnych: poradnik metodyczny*. Wydaw. Nauk. Bogucki.
- DOWNOROWICZ S. 2007 – Udobętnienie złoża rud miedzi Lubin-Sieroszowice w trudnych warunkach hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 423: 11–22.
- DZIEDZIAK J., BIELAWSKI A. 2005 – Dokumentacja warunków hydrogeologicznych w rejonie projektowanego Szybu SW-4 Kopalni Polkowice-Sieroszowice. *Przedsiębiorstwo Geologiczne PROXIMA S.A.*, Wrocław (niepublikowana).
- GANCARZ R. 1980 – Interpretacja wyników opróbowania poziomów roponośnych i gazonośnych. Wydaw. AGH, Kraków
- GONET A., MACUDA J., ZAWISZA L., DUDA R., PORWISZ J. 2011 – *Instrukcja obsługi wierceń hydrogeologicznych*. Wydaw. AGH, Kraków.
- GRINGARTEN A. 2008 – From straight lines to deconvolution: the evolution of the state of the art in well test analysis. *SPE Reserv. Evaluat. Engineer.*, 11 (1): 41–62.
- GRUSZECKI J., GOLCZAK I., PIKUŁA M. 2009 – Kompleksowa dokumentacja geologiczna rejonu projektowanego szybu GG-1. *Przedsiębiorstwo Geologiczne PROXIMA S.A.*, Wrocław (niepublikowana)
- HEAD K., EPPS R. 2014 – *Manual of Soil Laboratory Testing – Volume 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests*. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, 47: 191–191.
- KALISZ M., NIEDBAŁ M. 2004 – Wpływ odwadniania utworów triasowych w trakcie głębieńszybu R-XI na warunki hydrodynamiczne i powierzchniowe w północnej części OG „Rudna”. *Materiały Sympozjum Naukowo-Technicznego „Problemy Hydrogeologiczne Górnictwa Rud Miedzi”*, Lubin KGHM Polska Miedź S.A., TKP: 148–160.
- KAPUŚCIAREK S. 2002 – Dokumentacja geologiczna dla otworu obserwacyjnego H-29 w poziomie wodonośnym pstrego piaskowca triasowego piętra wodonośnego w sąsiedztwie szybu R-XI kopalni „Rudna”. *Przedsiębiorstwo Robót Wiertniczych POLWIERT* (niepublikowana).
- KASIAK Z., KUŚ G., CENCKIEWICZ R. 1983 – Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi kopalni Rudna kategoria A+B+C<sub>1</sub> część B – hydrogeologiczna. *Przedsiębiorstwo Geologiczne w Krakowie* (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: 175–198.
- KŁAPCIŃSKI J., KONSTANTYNOWICZ E., SALSKI W., KIENIG E., PREIDL M., DUBIŃSKI K., DROZDOWSKI S. 1984 – *Atlas obszaru miedzionośnego (monoklina przedsudecka)*. Wydaw. „Śląsk”, Katowice.
- KOSMAŁSKI M., KULICKI J., STRUŻYŃSKI M. 2005 – Likwidacja wzmożonego dopływu wody do szybu R-XI w Zakładach Górniczych Rudna. *Geoinżynieria i Tunelowanie*, 1 (4): 46–54.
- KOSTRZ J. 2014 – *Głębienie szybów*, wyd. 2. Szkoła Eksploatacji Podziemnej, Kraków.
- KOZUŁA R., BIELAWSKI A., SUPEL J., GOLCZAK I. 1991 – Dokumentacja geologiczna rejonu projektowanego szybu R-XI kopalni Rudna. *Przedsiębiorstwo Geologiczne we Wrocławiu PROXIMA S.A.* (niepublikowana).
- KRASNY J. 1993 – Classification of Transmissivity Magnitude and Variation. *Ground Water*, 31: 230–236.
- MUSKAT M. 1937 – *The flow of homogeneous fluids through porous media*. McGraw-Hill Book Company, Inc.
- PAZDRO Z. 1983 – *Hydrogeologia ogólna*. Wydaw. Geologiczne, Warszawa.
- PN-G-05016:1997 *Szyby górnicze – Obudowa – Obciążenia*.
- PIKUŁA M., CHUDY K., WORSZA-KOZAK M., CZOP M. 2023 – Scale effect on hydraulic properties of pore-fissure deep rock formations and its importance for the mining shaft-sinking process. *Energies*, 16 (5): 2263.
- RAMEY H., AGARWAL R., MARTIN J. 1975 – Analysis of “slug test” or DST flow period data. *J. Canad. Petrol. Technol.*, July–September: 37–47.
- RÖHRICH T. 2008 – *AquiferTest v.4.2 User’s Manual*. Schlumberger Water Services.
- STAŚKO S., GURWIN J., WCISŁO M., MODELSKA M., KRYZA H., KRYZA J., OLIHWER T., BUCZYŃSKI S., TARKA R., WAŚIK M., BECKER R. 2012 – Model koncepcyjny systemu hydrogeologicznego obszaru oddziaływania lubińsko-głogowskiego obszaru miedzionośnego (LGOM). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 451: 203–210.
- 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. *EOS, Trans American Geophysical Union*, 16 (2): 519–524.
- TUREK S. (red.) 1971 – *Poradnik hydrogeologa*. Wydaw. Geol., Warszawa.
- WIECZYSTY A. 1970 – *Hydrogeologia inżynierska*. PWN, Warszawa.

Praca wpłynęła do redakcji 20.03.2023 r.  
Akceptowano do druku 14.11.2023 r.