



Ocena przepuszczalności skał na podstawie badań sondą aerometryczną

Assessment of rock permeability based on an aerometric probe

Dr inż. Adam Frolik^{*)}

Treść: Skały karbońskie złożone z piaskowców, mułowców, ilowców i węgla tworzą ośrodek typu warstwowo-szczelinowego i o ich zdolności do migracji w nim cieczy lub gazów, czyli przepuszczalności lub współczynnika filtracji decyduje obecność w nich szczelin, a nie porowatość ośrodka. Ocena rzeczywistych własności zbiornika warstwowo-szczelinowego może być zatem dokonana dopiero w badaniach *in situ*. Jako metodę oznaczenia przepuszczalności oraz współczynnika filtracji skał wykorzystano badania sondą aerometryczną.

Abstract: Carboniferous rocks composed of sandstone, silt, claystone and coals form a stratified-fracture type medium. So their ability to migrate liquids or gases, such as permeability or filtration coefficient, is determined by the presence of fractures in them, not the porosity of the medium. Therefore, the assessment of the actual properties of the stratified-fractured reservoir can only be made by *in situ* tests. As a method of determining permeability and rock filtration coefficient, an aerometric probe test was used

Słowa kluczowe:

skały, przepuszczalność, badanie, urządzenie

Keywords:

rock, permeability, testing, device

1. Wprowadzenie

W hydrogeologii dla oceny przepuszczalności górotworu najczęściej wykorzystany jest współczynnik filtracji – współczynnik wodoprzewodności, który wyraża przepuszczalność ośrodka izotropowego dla płynu jednorodnego (gęstość $\rho = \text{const}$, prędkość $v = \text{const}$), za jaki przyjmowana jest woda podziemna. Badania nad istotą współczynnika filtracji wykazały, że zależy on od filtracyjnych własności ośrodka skalnego oraz od fizycznych własności filtrującej cieczy (jej ciężaru właściwego, temperatury i lepkości). Ponieważ w porach i szczelinach skalnych mogą poruszać się ciecze o różnych właściwościach, jak wody słodkie, solanki, wody zgazowane, ale również ropa naftowa i gaz, nasuwa się problem określania zdolności filtrujących ośrodka skalnego niezależnie od własności przepływającego medium. Dla oceny tych własności wprowadzono współczynnik przepuszczalności (χ), który wyraża przepuszczalność ośrodka niezależnie od właściwości płynu. Zależność współczynnika filtracji od współczynnika przepuszczalności wyraża się następującą zależnością:

$$\frac{k}{\gamma} = \frac{\chi}{\eta} \quad (1)$$

gdzie:

- γ – ciężar właściwy cieczy [N/m^3],
- η – lepkość [$\text{Pa} \cdot \text{s}$],
- k – współczynnik filtracji [m/s],

Wzór na współczynnik przepuszczalności ma postać:

$$\chi = \frac{Q \cdot \eta \cdot l}{F \cdot \Delta p} \quad (2)$$

Wyrażając:

- Q – przepływ [m^3/s],
- l – długość drogi filtracji [m],
- F – pole przekroju poprzecznego [m^2],
- Δp – różnica ciśnień [Pa].

otrzymuje się wymiar przepuszczalności w m^2 . W praktyce m^2 dla określenia przepuszczalności skał okazał się zbyt duży i dlatego używa się jednostki mniejszej (1 darcy), którą otrzymuje się przez wyrażenie lepkości w centypauzach (1 cP = 0,01 P) i różnicy ciśnień w atmosferach technicznych (1 at = 98067 Pa). 1 darcy (D) to taka przepuszczalność ośrodka, kiedy 1 cm^2 przekroju przepuści w ciągu 1 s 1 cm^3 cieczy o lepkości 1 centypuaza przy różnicy ciśnień 1 at na długości 1 cm.

Skały karbońskie złożone z piaskowców, mułowców, ilowców i węgla tworzą ośrodek typu warstwowo-szczelinowego. Dużą porowatością otwartą wśród skał karbońskich charakteryzują się zwłaszcza piaskowce (do 20 %), jednak decyduje ona tylko o ich dobrych właściwościach kolektorskich. Natomiast o przepuszczalności skał karbońskich jako masywu decyduje głównie obecność w nich szczelin, choć ich szczelinowość nie przekracza 1 %.

W tej sytuacji metody laboratoryjne badania własności filtracyjnych skał karbońskich opierające się na badaniach próbek nienaruszonych pozwalają na ocenę parametrów związanych co najwyżej z porowatością, nie odzwierciedlają natomiast parametrów zbiornika związanych ze zdolnością

^{*)} Główny Instytut Górnictwa, Katowice

migracji w nim cieczy lub gazów, czyli przepuszczalności lub współczynnika filtracji. Ocena rzeczywistych własności zbiornika warstwowo-szczelinowego może być zatem dokonana dopiero w badaniach *in situ*.

Jako metodę oceny przepuszczalności oraz współczynnika filtracji skał karbońskich wykorzystano badania sondą aerometryczną, wykonywane w kopalniach do innych celów, między innymi do określenia stateczności stropu i ociosów wyrobiska korytarzowego, wyznaczania maksymalnego zasięgu rozwarstwienia dla metod projektowania systemów obudowy, badania szczelinowatości górotworu wokół tam wentylacyjnych i wodnych, kontroli poziomu szczelinowatości w sąsiedztwie skrzyżowań wyrobisk (Nierobisz 2014).

W artykule wykorzystano badania aerometryczne wykonywane dla różnych rodzajów skał karbońskich w kopalni Sosnowiec i kopalni Porąbka – Klimontów starszą wersją sondy aerometrycznej ze zbiornikiem $V = 20 \text{ dm}^3$ (Kidybiński 1982, Kidybiński i in. 1995), jak również sondą aerometryczną nowego typu ze zbiornikiem $V = 40 \text{ dm}^3$ (Nierobisz 2003, 2014), w tym badania węgla w kopalni Silesia (Kidybiński, Siemek 2006), jak również piaskowców z kopalni Sobieski (Rogoż i in. 2011).

2. Metody badania przepuszczalności masywu skalnego

Hydrogeologiczne badania w trakcie rozpoznawania złóż prowadzone w otworach wiertniczych odnoszą się co najwyżej do oceny własności filtracyjnych skał piaskowcowych, pozostałe skały karbońskie: iłowce, mułowce uważane są za skały nieprzepuszczalne i dla tych skał badań hydrogeologicznych się nie wykonuje. Dotyczy to także węgla, dla których znane są tylko nieliczne badania dotyczące wykorzystania przed-

stawionej poniżej metody geofizycznej (Bromek 1993), czy wynikające z analizy filarów granicznych (Frolik 1998, 2003, Frolik, Gzyl 2005) lub ogniowych (Staroń 1979).

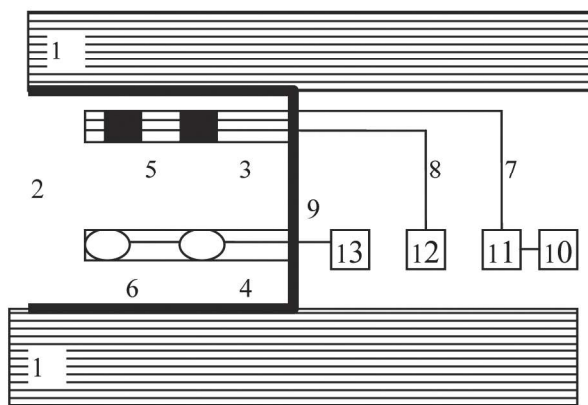
W GIG do oznaczenia przepuszczalności i współczynnika filtracji węgla *in situ* stosuje się metodę, w której do obserwacji migracji solanki w górotworze wykorzystuje się sondy opornościowe (Bromek 1993). Schemat stanowiska do pomiaru przepuszczalności węgla w wyrobisku górniczym przedstawiono na rys. 1.

Badanie przeprowadza się w wyrobisku górniczym, w ociosie lub przodku wykonuje się otwór iniekcyjny i dwa otwory obserwacyjne. Do otworu iniekcyjnego odciętego pakierem wtlacza się solankę pod stałym ciśnieniem i jednocześnie w otworach obserwacyjnych mierzy się oporność węgla za pomocą sond opornościowych. Zakłada się, że solanka rozchodzi się w górotworze promieniście od czynnego odcinka otworu iniekcyjnego. Rejestruje się czasy od rozpoczęcia wtlaczania solanki do momentu stwierdzenia spadku oporności węgla w otworach obserwacyjnych. Poniżej przytoczono wyniki badań z kopalni Brzeszcze (Bromek 1993).

Uzyskane współczynniki filtracji dla węgla są znacznie niższe od wartości z badań laboratoryjnych (od $0,15 \cdot 10^{-6}$ do $4,5 \cdot 10^{-6}$ m/s), choć uwzględniają naturalną szczelinowatość węgla i są charakterystyczne dla skał bardzo trudno przepuszczalnych.

3. Ocena przepuszczalności skał karbońskich na podstawie badań sondą aerometryczną

Metoda geofizyczna jest metodą skomplikowaną i czasochłonną, wymagającą odwiercenia aż trzech otworów wiertniczych. Dlatego też do oceny przepuszczalności góro-



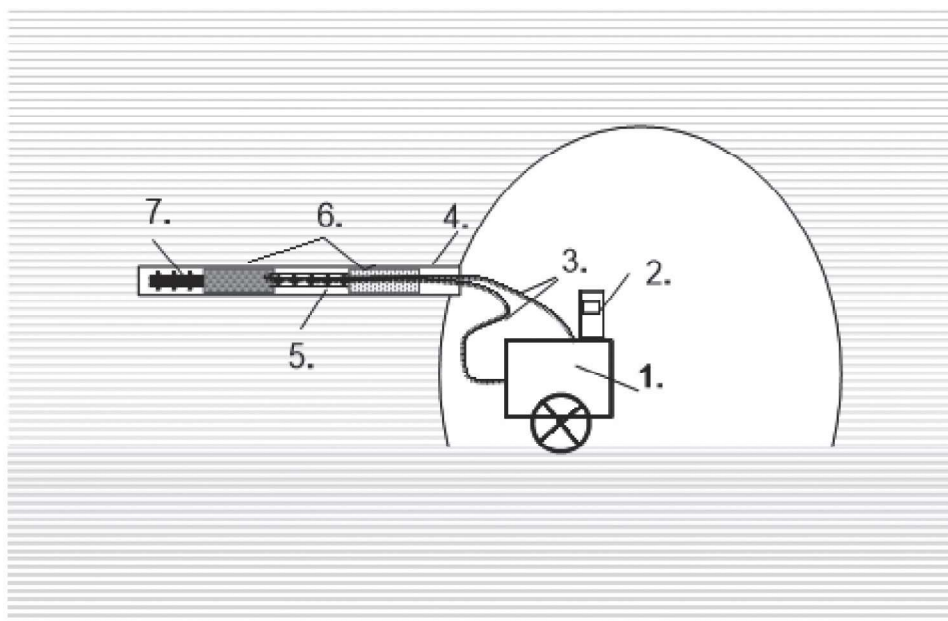
Rys. 1. Schemat stanowiska do pomiaru przepuszczalności węgla w wyrobisku górniczym. 1. Iłowiec, 2. pokład węgla, 3. otwór iniekcyjny, 4. otwór pomiarowy, 5. pakery, 6. sonda pomiarowa, 7. przewód wodny, 8. przewód sprężonego powietrza, 9. przewód elektryczny, 10. pompa tłocząca, 11. zbiornik cieczy, 12. zbiornik sprężonego powietrza, 13. aparatura do pomiaru zmian oporu elektrycznego

Fig. 1. Diagram of the station for measuring coal permeability in a mining excavation. 1. Claystone, 2. coal seam, 3. injection hole, 4. measuring hole, 5. packers, 6. measuring probe, 7. water pipe, 8. compressed air line, 9. electric wire, 10. pressure pump, 11. liquid tank, 12. compressed air tank, 13. apparatus for measuring changes in electrical resistance

Tabela 1. Wyniki badań przepuszczalności i porowatości węgla *in situ*

Table 1. In situ test results of coal permeability and porosity

Miejsce badań	współczynnik filtracji - k [m/s]	przepuszczalność χ [D]	porowatość n_v
KWK Brzeszcze, pokład 350	$4,8 \cdot 10^{-8}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	1,3
KWK Brzeszcze, pokład 352	$0,9 \cdot 10^{-8}$	$0,9 \cdot 10^{-3}$	1,3



Rys. 2. Schemat stanowiska do badań areometrycznych 1 - zbiornik ciśnieniowy, 2 - kompresor, 3 - przewody ciśnieniowe do rozparcia głowicy w otworze i badania spękań, 4 - otwór badawczy, 5 - sonda otworowa, 6 - pakery uszczelniające, 7 - głowica sondy

Fig. 2. The scheme of testing aerometric 1 - pressure tank, 2 - compressor, 3 - pressure conduits to sprawl head in a hole and crack tests, 4 - hole test, 5 - hole probe, 6 - sealing packers, 7 - sounder head

tworu można wykorzystać często wykonywane w kopalniach badanie sondą aerometryczną. Budowę i działanie sondy oraz sposób prowadzenia badań sondą aerometryczną opisano szczegółowo w publikacji (Nierobisz 2014).

Badania sondą przeprowadza się w otworach o średnicy 43 mm. Badanie prowadzi się odcinkami o długości 25 cm. Dla każdego z odcinków określa się parametry charakteryzujące spękania (Nierobisz 2014) tj.: powierzchnię otworu równoznacznego szczelin S_o , otwór równoznaczny spękania, szczelinowatość skał K_s , oraz równoznaczne rozwarście szczelin R_s .

Parametry te wyznacza się z zależności:

$$S_o = \frac{c}{l} [\text{mm}^2], K_s = 1000 \cdot \frac{S_o}{S}, R_s = \frac{S_o}{l_o} [\text{mm}]$$

gdzie:

- S – powierzchnia pobocznic walca badanego odcinka otworu [mm],
- c – stała sondy [mm²/s],
- t – czas spadku ciśnienia w zbiorniku sondy podczas badań [s],
- l_o – obwód otworu w przekroju poprzecznym [mm].

Pomiar za pomocą sondy aerometrycznej polega na wypuszczaniu gazu ze zbiornika o pojemności V do górotworu w przedziale czasu $t_2 - t_1$, co powoduje zmniejszenie ciśnienia gazu w zbiorniku z p_1 do p_2 . Poniżej przedstawiono wyniki przeliczenia wielkości parametrów uzyskiwanych w badaniach szczelinowatości skał z sondy aerometrycznej na przepuszczalność i współczynnik filtracji.

Wzór do obliczania przepuszczalności skał na podstawie pomiaru za pomocą sondy aerometrycznej konstrukcji GIG (Nierobisz 2014) wyprowadzono, wychodząc ze wzoru Girinskiego-Babuszki na dopływ wody do studni niezupełnej z filtrem usytuowanym w środkowej części warstwy wodonośnej (Babuszkin 1950, Silin-Bekczurin 1965). Wzór ten ma postać:

$$Q = \frac{2\pi k l s}{\ln \frac{\alpha l}{r}} \quad (3)$$

gdzie:

- Q – wydatek [m³/s],
- k – współczynnik filtracji [m/s],
- l – długość filtra [m],
- s – depresja w otworze [m],
- r – promień otworu [m],
- α – współczynnik korekcyjny, wynoszący wg Babuszki 0,66.

W przypadku analizowania filtracji gazu, współczynnik filtracji należy zastąpić współczynnikiem przepuszczalności, podstawiając

$$k = \chi \frac{\gamma}{\eta} \quad (4)$$

a ponadto należy dokonać podstawień:

$$Q = \frac{V(p_1 - p_2)}{p_2(t_2 - t_1)}; \quad s = \frac{p_1 + p_2}{2\gamma} \quad (5)$$

gdzie:

- χ – współczynnik przepuszczalności [m²],
- g – ciężar właściwy gazu [N/m³],
- h – lepkość dynamiczna gazu [Pa·s],
- V – objętość gazu [m³],
- p_1, p_2 – ciśnienie w czasie t_1 i t_2 [Pa],
- t_1, t_2 – czas rozpoczęcia i zakończenia wtłaczania gazu [s].

Zmniejszając przedział (t_1, t_2), można wyrażenia różnicowe zastąpić różniczkami, mianowicie: ($t_2 - t_1 \rightarrow dt, (p_1 - p_2) \rightarrow dp$, a ponadto $p_2 \rightarrow p_1 \rightarrow p$ i w rezultacie można napisać:

$$Q = \frac{V dp}{p dt} \quad \text{oraz} \quad s = \frac{p}{\gamma} \quad (6)$$

Po podstawieniu wyrażenia (4) i (6) do wzoru (3), uproszczeniu i rozdzieleniu zmiennych, otrzymuje się równanie

$$\chi dt = \frac{\eta V}{2\pi l} \ln \frac{\alpha l}{r} \frac{dp}{p^2} \quad (7)$$

Równanie (7) można scałkować obustronnie w przedziałach (t_p, t_2) i (p_2, p_1)

$$\chi \int_{t_1}^{t_2} dt = \frac{\eta V}{2\pi l} \ln \frac{\alpha l}{r} \int_{p_2}^{p_1} \frac{dp}{p^2} \quad (8)$$

Otrzymuje się

$$\chi = \frac{\eta V}{2\pi l(t_2 - t_1)} \left(\frac{1}{p_2} - \frac{1}{p_1} \right) \ln \frac{\alpha l}{r} \quad (9)$$

We wzorze tym χ wyrażone jest w metrach kwadratowych, p_1 i p_2 – w paskalach, t_1 i t_2 – w sekundach, pozostałe wielkości w metrach.

Lepkość dynamiczna powietrza w temperaturze 20°C wynosi $1,78 \cdot 10^{-5}$ P = 1,78 Pa·s. Podstawiając tę wartość do wzoru (9) i komasując stałe, otrzymuje się wzór ważny dla powietrza w temperaturze 20°C

$$\chi = 2,83 \cdot 10^{-8} \frac{V}{l(t_2 - t_1)} \left(\frac{1}{p_2} - \frac{1}{p_1} \right) \ln \frac{\alpha l}{r} \quad (10)$$

We wzorze (10) χ wyrażone jest w metrach kwadratowych. Dla uzyskania przepuszczalności w darcy, należy wprowadzić współczynnik przeliczeniowy: $1 \text{ m}^2 = 1,0132 \cdot 10^{12}$ darcy. Otrzymuje się:

$$\chi = 28700 \frac{V}{l(t_2 - t_1)} \left(\frac{1}{p_2} - \frac{1}{p_1} \right) \ln \frac{\alpha l}{r} \quad (11)$$

gdzie: χ wyrażone jest w darcy, pozostałe wielkości, jak wyżej.

Dla sondy aerometrycznej w wykonaniu GIG (Nierobisz 2003, 2014) można ustalić:

$$\begin{aligned} V &= 0,04 \text{ m}^3, & p_1 &= 0,4 \text{ MPa}, \\ l &= 0,25 \text{ m}, & p_2 &= 0,15 \text{ MPa}, \\ r &= 0,023 \text{ m}, & a &= 0,66 \end{aligned}$$

Wzór obliczeniowy przybiera wówczas prostą postać:

$$\chi = \frac{0,039}{t_2 - t_1} \quad (12)$$

gdzie χ wyrażone jest w darcy a t_1 i t_2 w sekundach.

W tabeli 2 przedstawiono obliczenia współczynników przepuszczalności i współczynników filtracji węgla w oparciu o interpretację badań areometrycznych przeprowadzonych w 6 otworach rozmieszczonych w dwóch przekrojach w chodniku podstawowym w pokładzie 214/1-2 kopalni Silesia (Kidybiński, Siemek 2006).

Otrzymane wartości przepuszczalności węgla w kopalni Silesia określone w oparciu o badania sondą areometryczną nie odbiegają od wartości uzyskanych dla węgla z KWK Brzeszcze, w oparciu o pomiar metodą geofizyczną prędkości rozprzestrzeniania się solanki wtłaczanej do otworów wiertniczych (Bromek 1993).

Szeroki zakres badań aerometrycznych wykonano w roku 1995 w kopalniach Sosnowiec i Porąbka - Klimontów (Kidybiński i in. 1995). Miały one na celu zbadanie rozkładu przepuszczalności górotworu wokół wyrobisk kapitalnych o możliwie długim czasie istnienia (powyżej 20 lat) dla potrzeb lokowania toksycznych odpadów przemysłowych w wyrobiskach likwidowanych kopalni. Badania przeprowadzono na 6 stanowiskach pomiarowych w miejscach znajdujących się poza bezpośrednimi wpływami eksploatacji górniczej oraz możliwie daleko od stref zaburzeń tektonicznych. W stropie i ociosach wyrobisk odwiercono otwory o długości do 5 m, w których określono zasięg stref szczelinowatości i spękań. Z rozkładu wskaźnika szczelinowatości K_s na długości otworów i jego zmiany wokół wyrobiska wynika, że zasięg spękań charakteryzowany wskaźnikiem szczelinowatości $K_s = 0,3\%$ w ociosach wyrobisk wahał się w granicach od 1,0 do 3,5 m. Wyniki badań wykazały, że wskaźnik szczelinowatości skał w strefie przyciosowej był na ogół ponad 10-krotnie większy niż w strefie nienaruszonej. Badania prowadzono z użyciem sondy aerometrycznej starego typu (ze zbiornikiem o pojemności 0,02 m³ przy ciśnieniu początkowym 0,3 MPa i zróżnicowanym ciśnieniu końcowym w zakresie od 0,28 do 0,10 MPa) Wyniki badań aerometrycznych, jak również wyniki obliczeń przepuszczalności i współczynników filtracji skał w otoczeniu badanych wyrobisk z zastosowaniem zależności (11) przedstawiono w tabeli 3.

Analiza wyników badań różnych rodzajów skał karbońskich (iłowce i mułowce warstw porębskich oraz piaskowce dolnorudzkie) wskazuje, że poza strefą odprężoną charakteryzują się one na ogół bardzo niską przepuszczalnością: mają współczynniki filtracji w granicach od $0,1 \cdot 10^{-8}$ do $3,6 \cdot 10^{-8}$ m/s, przy czym dla skał mułowcowo-iłowcowych ich przepuszczalność związana jest głównie ze szczelinowatością, tylko najniższe wartości rzędu 10^{-9} m/s są wynikiem ich naturalnej przepuszczalności; wyższe wartości to wynik ich wtórnego zeszczelinowacenia w odprężonej strefie wokół wyrobiska. W zasadzie dla tych skał już wartości współczynnika szczelinowatości powyżej 0,05 promila wskazują na ich szczelinowatość, choć autorzy metody areometrycznej stawiają granicę dopiero na wartości 0,2 lub 0,3 promila (Kidybiński i in. 1995, Nierobisz 2004). Z kolei dla skał piaskowcowych podobne wartości współczynników filtracji (od $0,6 \cdot 10^{-8}$ do $3,5 \cdot 10^{-8}$ m/s), wskazują raczej na przepuszczalność warstwową (porową); w przypadku takich skał nawet wartości współczyn-

Tabela 2. Ocena parametrów filtracyjnych węgla z kopalni Silesia na podstawie interpretacji badań sondą areometryczną
Table 2. Assessment of filtration parameters of coals from the Silesia mine based on the interpretation of the research with an aerometric probe

Miejsce	Odległość od ociosu [m]	Średni współczynnik szczelinowatości K_s [promile]	Średni czas spadku ciśnienia w zbiorniku Dt , [s]	Współczynnik przepuszczalności χ [D]	Współczynnik filtracji k [m/s]
P1-otwór 1	0,75 – 1,75	< 0,2	12,5	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$
	1,75 – 4,50	< 0,2	54,3	$0,7 \cdot 10^{-3}$	$0,7 \cdot 10^{-8}$
P1-otwór 2	0,05 – 1,75	< 0,2	45,7	$0,8 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-8}$
P1-otwór 3	0,25 – 4,50	< 0,2	59,4	$0,6 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-8}$
P2-otwór 1	0,25 – 6,00	< 0,2	26,4	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$
	0,75 – 1,25	0,7	5,85	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-8}$
P2-otwór 2	1,25 – 4,75	< 0,2	44,5	$0,8 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-8}$
	0,75 – 1,75	< 0,2	16,1	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$
	1,75 – 2,00	0,7	5,85	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-8}$
P2-otwór 3	2,00 – 4,75	< 0,2	29,2	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$

nika szczelinowości rzędu 1 promila nie oznaczają wcale zeszczelinowacenia górotworu wokół wyrobiska.

Badanie sondą aerometryczną przeprowadzono także w kopalni Sobieski w roku 2011 dla oceny parametrów hydrogeologicznych piaskowców łaziskich, ich celem było określenie możliwości zabudowy tamy wodnej. W rejonie głównej pochylni odstawczej z pokładu 118, na jej dotychczas wykonanym odcinku ok. 1057 m, występują kompleksy piaskowcowe w warstwach łaziskich (krakowska seria piaskowcowa), w interwale od pokładu 202/2 do pokładu 207. Zalegają one w warstwach o miąższościach przekraczających kilkadziesiąt metrów, rozdzielonych pokładami węgla i skał ilastych, a na wybiegu pochylni stanowią aż 98% udziału w całym jej profilu.

Piaskowce budujące warstwy wodonośne charakteryzują się zróżnicowanym uziarnieniem, a co za tym idzie, porowatością i przepuszczalnością. Te dwa podstawowe parametry hydrogeologiczne piaskowców łaziskich w obrębie południowej części złoża Jaworzno były słabo poznane, pomimo znacznej liczby otworów, są to bowiem głównie otwory starsze, z lat 60. ubiegłego wieku, w których nie wykonano tego rodzaju badań. Czoło pochylni oddalone jest tylko o ok. 450 m od złoża Byczyna, rozpoznawanego obecnie między innymi otworami wiertniczymi z powierzchni. W otworach tych, odwierconych do pokładu 207 oznaczono również parametry hydrogeologiczne: porowatości, przepuszczalności i odsączalności (tabela 4).

Porowatość efektywna piaskowców zawiera się w przedziale 14 – 24%, natomiast współczynnik odsączalności

Tabela 3. Ocena parametrów filtracyjnych skał w otoczeniu wyrobisk kopalni Sosnowiec i Porąbka - Klimontów na podstawie badań aerometrycznych

Table 3. Assessment of filtration parameters for the rocks surrounded by excavations of Sosnowiec and Porąbka - Klimontów mines, based on aerometric tests

Miejsce (rok wykonania wyrobiska)	Nr otworu	Odległość od odciosu, [m]	Rodzaj skał, głębokość występowania	Średni współczynnik szczelin. K_s [promile]	Współczynnik przepuszcz. χ [D]	Współczynnik filtracji k [m/s]
KWK Sosnowiec, przekop Koszlew (1964 r.)	otwór 1	0, 60 – 3,10	iłowiec, w-wy porębskie, gł. 260 m ppt	0,19	1,36•10 ⁻³	1,3•10 ⁻⁸
	otwór 2	0, 60 – 2,60		0,05	0,29•10 ⁻³	0,3•10 ⁻⁸
	otwór 3	0, 60 – 3,60		0,05	0,31•10 ⁻³	0,3•10 ⁻⁸
	otwór 4	0, 60 – 2,60		0,02	0,12•10 ⁻³	0,1•10 ⁻⁸
	otwór 5	0,60 – 0,85 0,85 – 2,10		0,50 0,04	2,61•10 ⁻³ 0,25•10 ⁻³	2,6•10 ⁻⁸ 0,2•10 ⁻⁸
KWK Sosnowiec, przekop transportowy Kania (1969 r.)	otwór 1	0,60 – 2,35	iłowiec, w-wy porębskie, gł. 430 m ppt	0,43	2,38•10 ⁻³	2,4•10 ⁻⁸
		2,35 – 2,60		0,17	1,10•10 ⁻³	1,1•10 ⁻⁸
	otwór 2	0,60 – 2,10		0,67	3,12•10 ⁻³	3,0•10 ⁻⁸
		2,10 – 2,85		0,05	0,29•10 ⁻³	0,3•10 ⁻⁸
	otwór 3	0,60 – 0,85		0,23	1,51•10 ⁻³	1,5•10 ⁻⁸
		0,85 – 3,85		0,09	0,31•10 ⁻³	0,3•10 ⁻⁸
	otwór 4	0,60 – 0,85		0,92	3,77•10 ⁻³	3,6•10 ⁻⁸
		0,85 – 2,35		0,18	1,19•10 ⁻³	1,1•10 ⁻⁸
		0,60 – 1,60		0,66	3,08•10 ⁻³	3,0•10 ⁻⁸
	otwór 5	1,60 – 2,35		0,16	1,05•10 ⁻³	1,0•10 ⁻⁸
KWK Sosnowiec, przekop Południowy (1979 r.)	otwór 1	0,60 – 1,10	iłowiec w-wy porębskie, gł. 250 m ppt	0,86	3,60•10 ⁻³	3,5•10 ⁻⁸
		1,10 – 2,35		0,13	0,85•10 ⁻³	0,8•10 ⁻⁸
	otwór 2	0,60 – 2,35		0,05	0,25•10 ⁻³	0,2•10 ⁻⁸
	otwór 3	0,60 – 4,35		0,08	0,42•10 ⁻³	0,4•10 ⁻⁸
otwór 5	0,60 – 2,35	0,53	2,35•10 ⁻³	2,3•10 ⁻⁸		
KWK Sosnowiec, przecznica V wschodnia (1955 r.)	otwór 1	0,60 – 2,35	iłowiec przewarstw. mułowcem, w-wy porębskie, gł. 270 m ppt	0,43	2,38•10 ⁻³	2,3•10 ⁻⁸
		2,35 – 2,60		0,05	0,29•10 ⁻³	0,3•10 ⁻⁸
	otwór 2	0,60 – 2,10		0,67	3,12•10 ⁻³	3,0•10 ⁻⁸
		2,10 – 2,85		0,17	1,10•10 ⁻³	1,1•10 ⁻⁸
	otwór 3	0,60 – 0,85		0,23	1,51•10 ⁻³	1,5•10 ⁻⁸
		0,85 – 3,85		0,09	0,96•10 ⁻³	0,9•10 ⁻⁸
	otwór 4	0,60 – 0,85		0,92	3,77•10 ⁻³	3,6•10 ⁻⁸
		0,85 – 2,35		0,16	0,89•10 ⁻³	0,9•10 ⁻⁸
		0,60 – 1,60		0,66	3,08•10 ⁻³	3,0•10 ⁻⁸
	otwór 5	1,60 – 2,35		0,18	1,19•10 ⁻³	1,1•10 ⁻⁸
SP V KWK Porąbka-Klimontów, przekop Będziński (1963 r.)	otwór 2	0,60 – 1,35	piaskowiec w-wy dolnorudzkie, gł. 550 m ppt	0,79	3,61•10 ⁻³	3,5•10 ⁻⁸
		1,35 – 3,60		0,08	0,59•10 ⁻³	0,6•10 ⁻⁸
	otwór 3	0,60 – 3,35		0,66	3,21•10 ⁻³	3,1•10 ⁻⁸
		3,35 – 3,60		0,14	0,98•10 ⁻³	1,0•10 ⁻⁸
	otwór 4	0,60 – 3,60		0,21	1,39•10 ⁻³	1,3•10 ⁻⁸
otwór 5	0,60 – 2,10	0,27	1,82•10 ⁻³	1,7•10 ⁻⁸		
SP VI KWK Porąbka-Klimontów, prz. Klimontowski (1975 r.)	otwór 1	0,60 – 2,10	iłowiec w-wy porębskie, gł. 550 m ppt	0,66	3,38•10 ⁻³	3,3•10 ⁻⁸
	otwór 2	0,60 – 3,85		0,66	3,21•10 ⁻³	3,1•10 ⁻⁸
	otwór 3	0,60 – 3,60		0,75	3,48•10 ⁻³	3,3•10 ⁻⁸

określony na podstawie pobranych próbek zawierał się w przedziale 0,02 – 0,12. Przepuszczalność piaskowców zawiera się w przedziale 9,6 – 90,3 mD. Współczynnik filtracji, określony na podstawie badań próbek skał pobranych głównie z warstw stropowych pokładu 207, zawiera się w przedziale od $4,1 \times 10^{-8}$ do $1,03 \times 10^{-7}$ m/s.

Jeszcze wyższe wartości parametrów (współczynniki filtracji rzędu 10^{-5} – 10^{-6} m/s) uzyskano w badaniach laboratoryjnych przeprowadzonych w AGH i GIG na próbach pobranych bezpośrednio z ociosów wyrobiska.

Wysoka przepuszczalność skał karbońskich występujących w otoczeniu projektowanej tamy wodnej może być powodem nadmiernej filtracji wody przez górotwór otaczający. Znaczne ciśnienie sphywowe powstające przy dużym

spiętrzeniu wody poza tamą w przypadku występowania słabozwięzłych piaskowców może doprowadzić do ich rozmycia i utraty stateczności przez ustrój tama – górotwór. Właściwa ocena przepuszczalności skał powinna w takiej sytuacji być oparta w miarę możliwości o badania *in situ*, bezpośrednio w wyrobisku górnym w miejscu lokalizacji tamy. Badania przeprowadzono w trzech otworach (jednym w stropie oraz w obu ociosach). W otworach ociosowych w trakcie pierwszych 3 pomiarów nie można było ustabilizować ciśnienia w zbiorniku, a zatem przyjmuje się, że strefa odprężona miała zasięg około 0,75 m, natomiast w otworze stropowym pomiary szczelności można było prowadzić dopiero w odległości 2,5 m od ociosu. Wyniki pomiarów w otworze stopowym przedstawiono w tabeli 5 (Rogoż i in. 2011).

Tabela 4. Wyniki oznaczeń parametrów hydrogeologicznych piaskowców stropowych pokładu 207 na podstawie badań laboratoryjnych

Table 4. Results of hydrogeological parameters determinations for the roof sandstones in seam 207, based on laboratory tests

Nr otworu	Otwór G – 8205 Nr próby	Głębokość pobrania [m]	Porowatość efektywna [%]	Gęstość objętościowa [g/cm ³]	Współczynnik odsączalności [μ]	Przepusz- czalność [D]	Wsp. filtracji [m/s]
G - 8205	1(piaskowiec)	539,0-545,0	13,73-21,13 śr. 18,27	2,21-2,54 śr. 2,45	0,051-0,122 śr. 0,084	0,026-0,070 śr. 0,058	2,6-7,0·10 ⁻⁷ 5,8·10 ⁻⁷
	2(piaskowiec)	669,0-675,0	13,85-18,31 śr. 15,48	2,31-2,94 śr. 2,61	0,048-0,108 śr. 0,085	0,061-0,090 śr. 0,075	6,1-9,0·10 ⁻⁷ 7,5·10 ⁻⁷
G - 8206	1(piaskowiec)	599,0 – 601,6	15,99 – 23,16	2,226 – 2,565	0,039 – 0,054	0,020-0,039	2,0-3,9·10 ⁻⁷
	2(piaskowiec)	677,0 – 679,0	13,82 – 22,74	2,382 – 2,691	0,024 – 0,037	0,010–0,013	1,0–1,3·10 ⁻⁷
	3(piaskowiec)	778,0 – 779,0	17,47 – 19,52	2,161 – 2,432	0,049 – 0,064	0,057–0,062	5,7-6,2·10 ⁻⁷
G -9001	2(piaskowiec)	627,8	24	2,11	0,02	-	0,66·10 ⁻⁷
	3(piaskowiec)	648,4	-	2,11	0,05	-	0,41·10 ⁻⁷
	4(piaskowiec) nad pokł. 207	667,9	22	2,11	0,03	-	1,03·10 ⁻⁷

Tabela 5. Ocena parametrów filtracyjnych piaskowców na podstawie badań aerometrycznych (otwór nr 2)

Table 5. Assessment of sandstone filtration parameters, based on aerometric tests (borehole No. 2)

Głębokość otworu [m]	Czas [s]	So [mm ²]	Ks [promile]	Rs [mm]	c [darcy]	k, [m/s]
0,25-2,50	-	-	-	-	-	-
2,75	15,02	4,08	0,11	0,03	2,60 10 ⁻³	2,6 10 ⁻⁸
3,00	16,12	3,78	0,10	0,03	2,42 10 ⁻³	2,4 10 ⁻⁸
3,25	18,12	3,82	0,09	0,02	2,15 10 ⁻³	2,2 10 ⁻⁸
3,50	19,25	3,11	0,08	0,02	2,03 10 ⁻³	2,0 10 ⁻⁸
3,75	20,98	2,84	0,08	0,02	1,86 10 ⁻³	1,9 10 ⁻⁸
4,00	22,87	2,59	0,07	0,02	1,71 10 ⁻³	1,7 10 ⁻⁸
4,25	26,87	2,18	0,06	0,02	1,45 10 ⁻³	1,5 10 ⁻⁸
4,50	26,76	2,19	0,06	0,02	1,46 10 ⁻³	1,5 10 ⁻⁸
4,75	28,88	2,02	0,05	0,01	1,35 10 ⁻³	1,4 10 ⁻⁸
5,00	27,13	2,16	0,06	0,02	1,44 10 ⁻³	1,4 10 ⁻⁸
5,25	25,38	2,32	0,06	0,02	1,54 10 ⁻³	1,5 10 ⁻⁸
5,50	25,87	2,27	0,06	0,02	1,51 10 ⁻³	1,5 10 ⁻⁸
5,75	25,85	2,27	0,06	0,02	1,51 10 ⁻³	1,5 10 ⁻⁸
6,00	38,98	1,48	0,04	0,01	1,00 10 ⁻³	1,0 10 ⁻⁸
6,25	63,24	0,90	0,02	0,01	0,62 10 ⁻³	0,6 10 ⁻⁸
6,50	62,87	0,90	0,02	0,01	0,62 10 ⁻³	0,6 10 ⁻⁸
6,75	59,64	0,95	0,03	0,01	0,65 10 ⁻³	0,6 10 ⁻⁸
7,00	66,89	0,85	0,02	0,01	0,58 10 ⁻³	0,6 10 ⁻⁸
7,25	66,18	0,81	0,01	0,01	0,59 10 ⁻³	0,6 10 ⁻⁸
7,50	69,67	0,81	0,02	0,01	0,56 10 ⁻³	0,6 10 ⁻⁸
7,75	69,75	0,81	0,02	0,01	0,56 10 ⁻³	0,6 10 ⁻⁸
8,00	68,18	0,83	0,02	0,01	0,57 10 ⁻³	0,6 10 ⁻⁸
8,25	70,24	0,81	0,02	0,01	0,56 10 ⁻³	0,6 10 ⁻⁸
średnia						1,310 ⁻⁸

Z tabeli 5 wynika, że skały stropowe wykazują przepuszczalność w granicach od $0,56 \cdot 10^{-3}$ do $2,6 \cdot 10^{-3}$ darcy, natomiast odpowiadające jej wartości współczynnika filtracji od $0,56 \cdot 10^{-8}$ do $2,6 \cdot 10^{-8}$ średnio $\sim 1,3 \cdot 10^{-8}$ m/s. Natomiast otwory odwiercone poziomo w warstwie piaskowca wykazują przy podobnej średniej $\sim 1,3 \cdot 10^{-8}$ m/s jeszcze mniejszy rozrzut wartości obliczonego współczynnika filtracji od $1,0 \cdot 10^{-8}$ do $1,6 \cdot 10^{-8}$ m/s w otworze nr 1 oraz od $1,1 \cdot 10^{-8}$ do $1,3 \cdot 10^{-8}$ m/s w otworze 3.

Poza strefą odprężoną (0,75-2,5 m od ociosu wyrobisk), przepuszczalność piaskowców wynikająca z przepuszczalności porowej jest już bardzo niska $< 0,002$ darcy (współczynnik filtracji średnio $1,3 \cdot 10^{-8}$ m/s) i charakterystyczna jest jak dla skał bardzo słabo przepuszczalnych. Badania aerometryczne wykonane w trzech otworach badawczych (Rogoż i in. 2011) nie potwierdziły wysokich wartości współczynników uzyskanych w badaniach AGH i GIG (współczynniki filtracji były aż 2 lub 3 rzędy wyższe). Badania laboratoryjne parametrów kolektorskich piaskowców wykonane zostały bowiem na próbkach odprężonych pobranych bezpośrednio z przekopu, a dla piaskowców słabozwięzłych o znacznej ściśliwości, może to mieć duży wpływ na wyniki oznaczeń parametrów kolektorskich. Ponadto nie można wykluczyć, że próbki te mogły zawierać mikroszczeliny, które w znaczący sposób wpływają na wyniki oznaczeń. W tej sytuacji należy uznać, że piaskowce występujące w rejonie lokalizacji tamy charakteryzują się na ogół niską przepuszczalnością, co powinno zapewnić dostateczną szczelność górotworu. Doszczelnienia (przeprowadzenia iniekcji wzmacniająco-uszczelniającej) wymagać będzie tylko strefa odprężona wokół wyrobiska. Badania aerometryczne wykazały że zasięg strefy odprężonej wokół wyrobiska sięga 1-2,5 m od jego ociosów. Natomiast zbliżone wartości współczynników filtracji poza strefą odprężoną wskazują na dużą jednorodność górotworu. Zabudowa tamy wodnej była możliwa i tamą ta pracuje do dzisiaj, zapewniając bezpieczeństwo dla przekopu głównego na poziomie 500 m.

4. Podsumowanie i wnioski

1. Skały karbońskie złożone z piaskowców, mułowców, ilowców i węgla tworzą ośrodek typu warstwowo-szczelinowego. Metody laboratoryjne badania własności filtracyjnych skał karbońskich opierające się na badaniach próbek nienaruszonych pozwalają na ocenę parametrów związanych, co najwyżej z porowatością, nie odzwierciedlają natomiast parametrów zbiornikowych związanych ze zdolnością migracji w nim cieczy lub gazów, czyli przepuszczalności lub współczynnika filtracji. Ocena rzeczywistych własności zbiornika warstwowo-szczelinowego może być zatem dokonana dopiero w badaniach *in situ*.
2. Jako metodę oceny przepuszczalności skał karbońskich wybrano tu metodę oznaczenia przepuszczalności oraz współczynnika filtracji z wykorzystaniem badań aerometrycznych, wykonywanych w kopalniach, między innymi do określenia stateczności stropu i ociosów wyrobiska korytarzowego, wyznaczania maksymalnego zasięgu rozwarstwienia dla metod projektowania systemów obudowy, badania szczelinowości górotworu wokół tam wentylacyjnych i wodnych, kontroli poziomu szczelinowości w sąsiedztwie skrzyżowań wyrobisk (Nierobisz 2014).
3. Wychodząc ze wzoru Girińskiego-Babuszki na dopływ wody do studni niepełnej z filtrem usytuowanym w środkowej części warstwy wodonośnej (o długości $l = 0,25$ m) w artykule wyprowadzono zależność, która pozwala na ocenę przepuszczalności skał wokół odwierconego

otworu badawczego o średnicy $r = 43$ mm, w którym wykonywano badania aerometryczne. Dla sondy nowego typu (ze zbiornikiem o pojemności $V = 0,04$ m³), przy ciśnieniu początkowym $p_1 = 0,4$ MPa (dla czasu t_1) oraz końcowym $p_2 = 0,15$ MPa w czasie t_2 , wzór obliczeniowy na przepuszczalność przybiera postać:

$$\chi = \frac{0,039}{t_2 - t_1},$$

gdzie χ wyrażone jest w darcy, a t_1 i t_2 w sekundach.

Podziękowania:

*Szczególne podziękowania za napisanie tego artykułu należą się dwóm wybitnym emerytowanym profesorom Głównego Instytutu Górniczego: Panu dr. hab.inż. Markowi Rogożowi - prof. GIG oraz Panu prof. zwyczaj. dr. hab.inż. Antoniemu Kidybińskiemu. Pierwszemu z nich za inspirację i wskazanie, że w hydrogeologii kopalnianej najważniejsze są badania *in situ*, a drugiemu, że umożliwił mi wykorzystanie wyników badań sondą aerometryczną wykonywanych w GIG do innych celów, do określenia parametrów hydrogeologicznych różnych rodzajów skał karbońskich bezpośrednio w wyrobiskach górniczych.*

Literatura

- BABUSZKIN V.D. 1950 - Ukazaniya po opriedeleniju koefficienta filtracji pri opytynych otkazkach iz niesoviersziennykh skvazhin. Gosstrojizdat, Moskva.
- BROMEK T. i zespół 1993 - Opracowanie metod i dobór aparatury do badania przepuszczalności węgla. Dokumentacja GIG, Katowice, (nie publikowano).
- FROLIK A. 1998 - Ocena szczelności przeciwwodnych filarów bezpieczeństwa. Prace Głównego Instytutu Górniczego. Seria Konferencje VII Konferencja na temat: Problemy geologii i ekologii i górnictwie podziemnym.
- FROLIK A. 2000 - Evaluation the strenght and sealing capability of boundary pillars in coal mines. 7th international mine water association congress. Mine water and the environment. Ustroń.
- FROLIK A., Gzył G. 2005 - Analiza przepływów wód między zatopionymi kopalniami w północno-wschodniej części GZW. „Przeгляд Górnicy” 4 (s. 17-28).
- KIDYBIŃSKI A. 1982 - Podstawy geotechniki kopalnianej. Wyd. Śląsk, Katowice.
- KIDYBIŃSKI A. i zespół 1995 - Zbadanie metodą aerometryczną rozkładu stref przepuszczalności górotworu wokół wybranych 6-u starych wyrobisk kapitalnych, w różnych skałach otaczających. Dokumentacja GIG, Katowice (nie publikowana).
- KIDYBIŃSKI A., SIEMEK J. 2006 - Podziemne magazyny gazu w zaniechanych kopalniach węgla, praca zbiorowa. Główny Instytut Górniczy, Katowice.
- NIEROBISZ A. 2003 - Analiza stopnia szczelności górotworu otaczającego wybrane wyrobiska na podstawie badań metodą aerometryczną. Dokumentacja GIG, Katowice (nie publikowana).
- NIEROBISZ A. 2014 - Sonda aerometryczna jako narzędzie do badania szczelinowości górotworu. „Przeгляд Górnicy” nr 3, s. 65-70.
- ROGOŻ M. FROLIK A WĄTOR L 2011 - Opinia hydrogeologiczna dotycząca sposobu zabezpieczenia głównej pochylni odstawczej z pokładu 118, w związku z zaistniałym, wzmożonym wypływem wody (nie publikowana).
- SILIN-BEKZURIN A.I. 1965 - Dynamika podziemnych wód. Izd. M.G.U.
- STAROŃ T. 1979 - Eksploatacja pokładów węgla z zawalem stropu w sąsiedztwie pól pozarowych. Wydawnictwo Śląsk, Katowice.

Artykuł wpłynął do redakcji – kwiecień 2020
Artykuł akceptowano do druku – 15.06.2020