

Zmienność parametrów eksploatacyjnych i fizykochemicznych wód leczniczych ujęcia Zubrzyk w warunkach współdziałania otworów

Tomasz Kotowski¹, Agnieszka Operacz¹

Variability of operational and physicochemical parameters of therapeutic waters under conditions of interaction between the wells of the Zubrzyk intake. Prz. Geol., 65: 983–988.

Abstract. Within the Poprad Valley, groundwater is found often as therapeutic, carbonated waters with high CO₂ concentrations. An attempt was made to assess the interactions of wells with therapeutic waters, operating in the area of Zubrzyk. In order to determine whether the interaction of wells does not cause changes in the nature of the exploited waters, an analysis of the variability of selected operational and physicochemical parameters was performed. The obtained results confirm the mosaic nature of the CO₂ inflow from the depths of the Earth and indicate a different effect of the operation on parameters observed in well. The differences relate mainly to depression of water level and the preconditions of directions and magnitude of electrolytic conductivity in exploited water.

Keywords: therapeutic waters, carbonated waters, waters containing carbon dioxide, principal component analysis, Poprad Valley

Szczawy powstają w skomplikowanych warunkach gazowo-wodnych, gdzie do strumieni wód podziemnych przemieszczających się w ośrodku skalnym następuje dopływ gazowego CO₂ z głębszego podłoża. Drogami migracji CO₂ są głównie systemy głębokich stref rozłamowych. Stały dopływ subdukcyjnego CO₂ oraz wód pochodzenia meteorycznego może sugerować odnawialność złóż szczaw pod warunkiem niezaburzenia ani dróg krążenia wód, ani migracji CO₂ (Rajchel, 2012, 2013). Wody takie są uznawane za lecznicze z uwagi na zawartość wolnego CO₂, przekraczającą progową wartość stężenia tego składnika swoistego, która wynosi co najmniej 250 mg/dm³ (Prawo geologiczne i górnicze – Pgg). Rejon Zubrzyka znajduje się w tzw. centralnej strefie hydrochemicznej, obejmującej obszar dorzecza Popradu od Tylicza k. Krynicy po Głębokie k. Piwnicznej (Węclawik, 1967). Współwystępowanie na tym obszarze wód leczniczych i zwykłych stwarza potencjalne zagrożenie, gdyż ich eksploatacja może powodować zmiany w reżimie wód. Wzajemne oddziaływanie przejawia się w zmianach wydajności, ciśnień złożowych i położenia zwierciadła wody. Często zmiany te mają charakter negatywny, tzn. obniżają się parametry eksploatacyjne ujęć i wzrasta głębokość położenia zwierciadła wody (Ciężkowski, 2007). Dodatkowo równowaga gazowo-wodna formująca skład chemiczny wód typu szczawy jest bardzo nietrwała (Czop i in., 2011). Oddziaływania te mogą przejawiać się także w składzie chemicznym, co jest szczególnie ważne w przypadku wód leczniczych, które powinny charakteryzować się stabilnością składu chemicznego.

Badania wykonano w celu oceny, czy eksploatacja prowadzona w warunkach współdziałania otworów ujmujących szczawy w rejonie miejscowości Zubrzyk nie powoduje zmian charakteru tych wód oraz ich podstawowych parametrów.

OBIEKT BADAŃ

Wody lecznicze eksploatowane na obszarze górniczym (OG) Zubrzyk zaliczają się do wód kwasowęglowych (500–999 mgCO₂/dm³) oraz szczaw (>1000 mgCO₂/dm³).

Eksploatowane są trzy otwory ujmujące wody lecznicze: Z-2, Z-3a i Z-8 (ryc. 1), spełniające warunki ustawy Pgg.

Otwór Z-2 zrealizowano w 2001 r. W 2007 r. w trakcie wykonywania otworu Z-3a oddalonego od Z-2 o 50 m stwierdzono ich współdziałanie. Otwór Z-8 odwiercono w 2016 r. Wszystkie ujmują wody z facji piaskowcowo-lupkowej, określanej jako piaskowce z Piwnicznej.

Zgodnie z badaniami izotopowymi wody z otworu Z-2 to wody mieszane (współczesne i glacialne), a wody z otworu Z-3a uznano za glacialne (Chowaniec i in., 2009). Podstawowe informacje zestawiono w tabeli 1.

Chemizm wód przedstawiono za pomocą diagramów Udlufta (ryc. 2).

METODY I REZULTATY BADAŃ

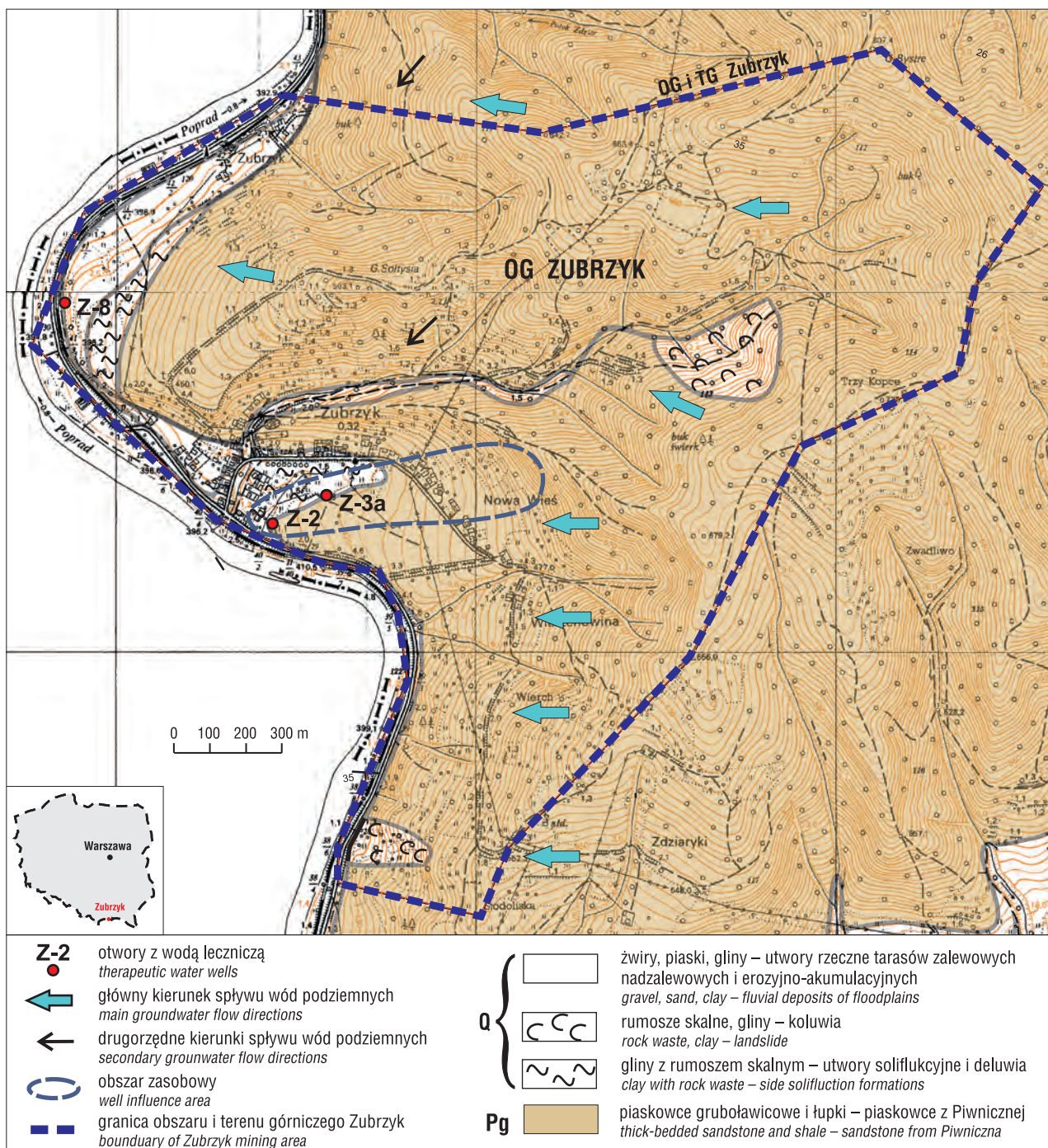
W celu stwierdzenia, czy eksploatacja otworów Z-2 i Z-3a w warunkach ich współdziałania nie spowoduje zmian charakteru ujmowanych wód, przeanalizowano zmienność wybranych parametrów eksploatacyjnych i fizykochemicznych. Otwór Z-8 z uwagi na krótki czas obserwacji i samodzielną pracę nie został objęty analizą.

Bazę danych stanowiły obserwacje z okresu od 15 lutego 2011 r. do 31 sierpnia 2016 r., obejmujące 392 oznaczenia dla Z-2 (n = 196) i Z-3a (n = 196). Analizowano: depresję (s), przewodność elektrolityczną właściwą (PEW), zawartość dwutlenku węgla (CO₂) i wydajność chwilową (Q). Podstawowe statystyki opisowe przedstawiono w tabeli 2.

Znaczną część analizowanych parametrów charakteryzują złożone typy rozkładów (np. bimodalne), jedynie s ma rozkład normalny. Dodatnie skośności wskazują na rozkłady o kierunku prawoskośnym, a dodatnie kurtozy – na znaczne zagęszczenie wyników wokół średnich. Widoczne są różnice zakresów zmienności analizowanych parametrów dla obu otworów oraz odmienna charakterystyka ich rozkładu (ryc. 3).

Wykonano analizę korelacji liniowej w celu oceny zróżnicowania parametrów (tab. 3 – wartości pogrubione są istotne statystycznie z prawdopodobieństwem 95% (p = 0,05), a korelacje o wysokiej wartości (>0,65) podkreślono).

¹ Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków; a.operacz@ur.krakow.pl.



Ryc. 1. Mapa geologiczna z elementami hydrogeologicznymi (Chrząstkowski i in., 1991, zmienione)
 Fig. 1. Geological map with hydrogeological elements (Chrząstkowski et al., 1991, modified)

KORELACJE PARAMETRÓW

Wysokie korelacje PEW–CO₂ są pochodną zmian agresywności chemicznej wód podziemnych względem zębca skalnego w rezultacie napływu wód o różnych stężeniach CO₂ i/lub zwiększenia/zmniejszenia natężenia migracji gazowego CO₂. Dla otworu Z-2 korelacja PEW–CO₂ jest najwyższa, dla Z-3a korelacja PEW–CO₂ jest zauważalna, lecz słabsza. Występują znaczne różnice w korelacji s–PEW dla obu otworów (0,73 dla Z-2 i –0,24 dla Z-3a). W przypadku Z-2 zwiększenie s wywołuje wyraźny wzrost napływu wód bardziej zmineralizowanych. Dla Z-3a wpływ zwiększenia s na zmianę PEW jest niejednoznaczny. Najprawdopodobniej wzrost depresji nie ma istotnego

wpływu na PEW lub okresowo może nawet powodować jego spadek. Korelacje Q–PEW nie są silne, ale zauważalne i mają odwrotny kierunek (analogicznie jak korelacje s–PEW). Wskazuje to raczej na występowanie okresowych przypadków wyraźniejszych związków korelacyjnych pomiędzy tymi parametrami. Analogicznie można opisać korelacje pomiędzy parametrami eksploatacyjnymi (s i Q) a zawartością CO₂. Dla Z-2 występuje wyraźna korelacja s–CO₂ (0,59) związana ze zmianami ciśnienia w strefie przyotworowej i wywołanym okresowym napływem wód o podwyższonych zawartościach CO₂. Dla Z-3a korelacja s–CO₂ jest niezauważalna, co wskazuje raczej na stabilny napływ wód do strefy przyotworowej. Wpływ zmian parametru Q na zawartość CO₂ jest słabo widoczny, a zmian

Tab. 1. Charakterystyka ujęć wód leczniczych w Zubrzyku
Table 1. Specific data of wells with therapeutic waters in Zubrzyk

| Otwór Well | Zasoby eksploatacyjne Admissible volume of extracted water [m ³ /h] | Rzędna dynamicznego zwierciadła Dynamic water level [m n.p.m.] | Depresja eksploatacyjna Operational depression [m] | Typ chemiczny i mineralizacja Chemical type and mineralization [mg/dm ³] |
|---------------|---|---|--|--|
| Z-2 | 2,8 | 348,8 | 57,9 | szczawa / carbonated water HCO ₃ -Ca-Mg-Na 1200÷2134 |
| Z-3a | 1,1 | 338,5 | 54,7 | szczawa / carbonated water HCO ₃ -Na-Mg-Ca 2035÷2270 |
| Z-8 | 3,0 | 346,9 | 51,3 | woda kwasowęglowa / water containing carbon dioxide HCO ₃ -Na-Mg 1673÷2270 |

Tab. 2. Statystyki opisowe analizowanych parametrów dla badanych otworów
Table 2. Descriptive statistics of the analyzed parameters for the investigated wells

| Otwór Well | Parametr Parameter | Średnia Average | Mediana Median | Min. | Maks. | Skośność Skewness | Kurtoza Kurtosis |
|---------------|-----------------------|--------------------|-------------------|------|-------|----------------------|---------------------|
| Z-2 | s | 23,2 | 22,8 | 6,1 | 44,5 | 0,23 | -0,28 |
| | PEW | 1,3 | 1,2 | 0,9 | 2,0 | 0,68 | -0,67 |
| | CO ₂ | 1060 | 1035 | 703 | 1423 | 0,90 | 1,39 |
| | Q | 2,4 | 2,6 | 1,4 | 2,8 | -1,07 | -0,26 |
| Z-3a | s | 30,3 | 30,2 | 16,2 | 52,4 | 0,54 | 1,35 |
| | PEW | 2,1 | 2,1 | 1,9 | 2,2 | -0,67 | -0,72 |
| | CO ₂ | 1342 | 1334 | 1014 | 1632 | -0,22 | 0,91 |
| | Q | 0,7 | 0,7 | 0,3 | 1,1 | 0,44 | 1,71 |

parametru Q na wielkość depresji jest odmienny dla obu otworów. Dla Z-2 wpływ ten nie jest znaczący, lecz zauważalny, a dla Z-3a praktycznie niezauważalny, chociaż jest istotny statystycznie. Wskazuje to na zróżnicowanie reakcji ośrodków wodonośnych na zmiany ciśnienia wywołane eksploatacją w przedziale zatwierdzonych wartości dopuszczalnych.

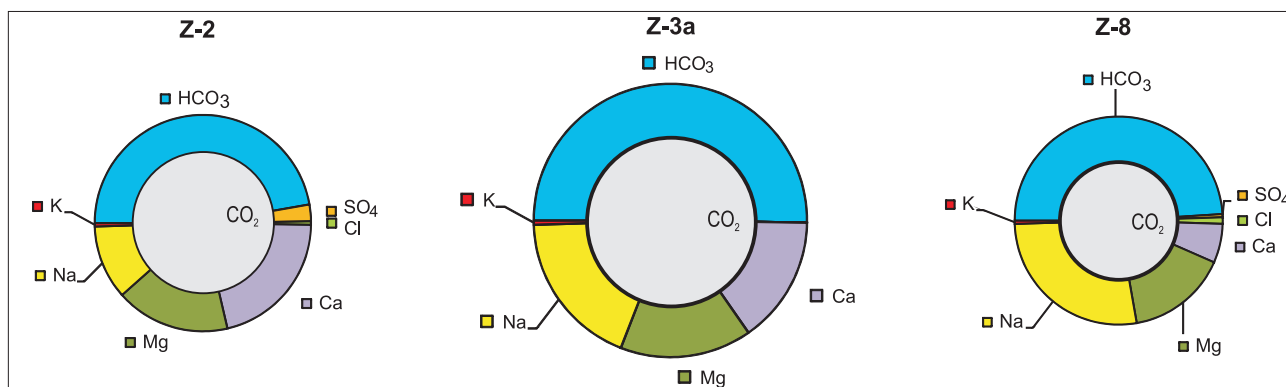
KORELACJE PARAMETRÓW POMIĘDZY OTWORAMI

Analizując podstawowe parametry hydrogeologiczne w kontekście współdziałania otworów Z-2 i Z-3a (szare pola w tab. 3), można zauważyć znaczącą korelację s-s, co jest w dużej mierze rezultatem nakładania się lejów depresji. Ponadto wielkość depresji jest kontrolowana przez adekwatne zmiany parametru Q i nie powinna prze-

kraczać dopuszczalnych wartości. Dla większości pozostałych parametrów wpływ wzajemnego oddziaływania jest słaby, lecz zauważalny (korelacje rzędu 0,3÷0,4). Prawdopodobnie wskazuje to na występowanie okresowych przypadków silniejszych związków korelacyjnych pomiędzy różnymi parametrami dla obu otworów. Przypadki te stanowią jednak niewielką część w całym okresie obserwacyjnym i nie mają istotnego wpływu na całokształt współdziałania otworów. Niektóre korelacje (np. CO₂-CO₂) są właściwie niezauważalne i/lub nieistotne statystycznie.

ANALIZA PCA

W celu rozpoznania współzależności parametrów dodatkowo zastosowano analizę składowych głównych (PCA). Metoda ta pozwala na wykrywanie struktury związków między zmiennymi i tym samym na wyodrębnienie



Ryc. 2. Diagramy Udlufta wód leczniczych rejonu Zubrzyka
Fig. 2. Udluft diagrams of therapeutic waters of the Zubrzyk region

Tab. 3. Korelacje liniowe analizowanych parametrów
Table 3. Linear correlations of analyzed parameters

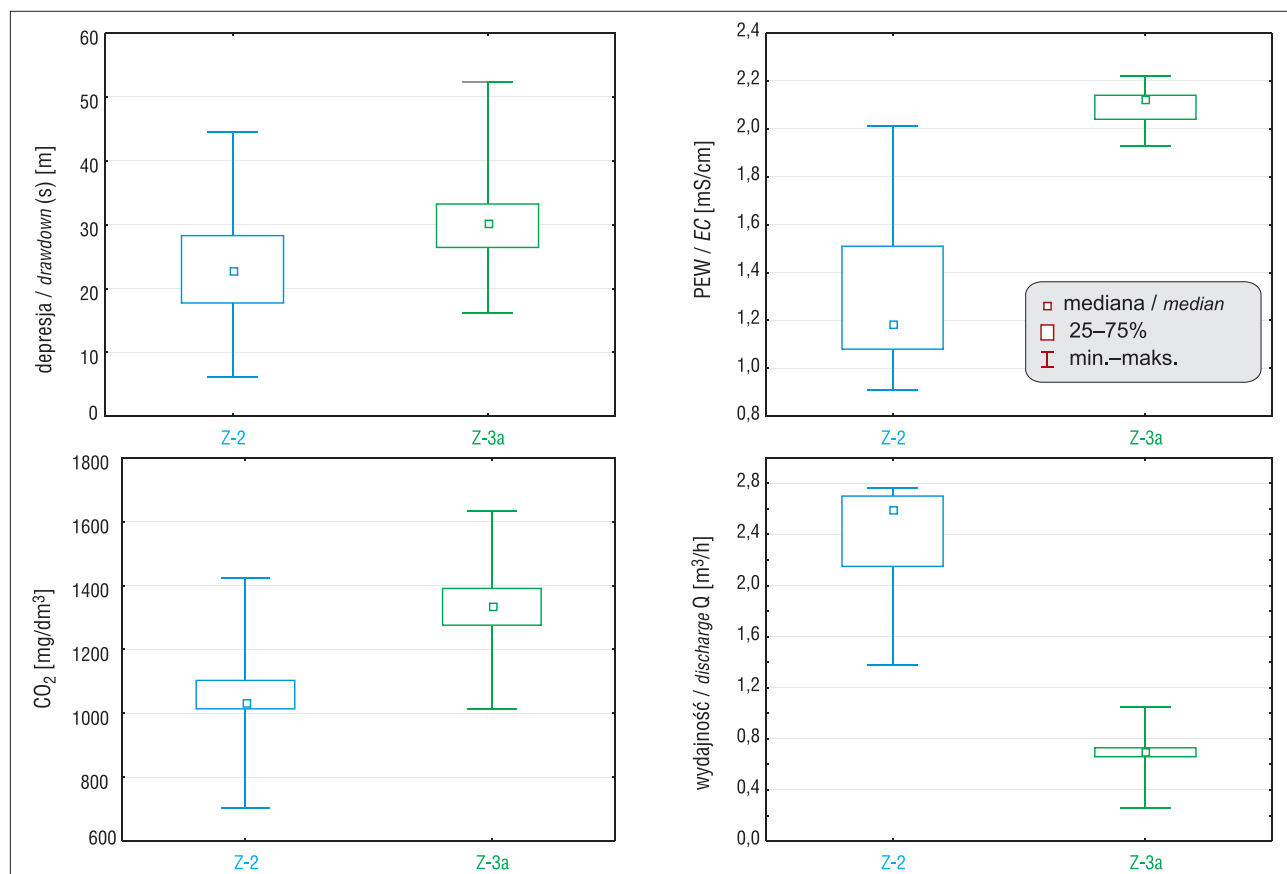
| | | Z-2 | | | | Z-3a | | | |
|------|-----------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|
| | | s | PEW | CO ₂ | Q | s | PEW | CO ₂ | Q |
| Z-2 | s | – | <u>0,73</u> | <u>0,59</u> | <u>0,52</u> | <u>0,68</u> | –0,30 | 0,03 | <u>0,22</u> |
| | PEW | <u>0,73</u> | – | <u>0,75</u> | <u>0,41</u> | <u>0,44</u> | –0,43 | –0,14 | <u>0,37</u> |
| | CO ₂ | <u>0,59</u> | <u>0,75</u> | – | <u>0,34</u> | <u>0,35</u> | –0,41 | –0,07 | <u>0,41</u> |
| | Q | <u>0,52</u> | <u>0,41</u> | <u>0,34</u> | – | <u>0,33</u> | –0,14 | <u>0,19</u> | <u>0,31</u> |
| Z-3a | s | <u>0,68</u> | <u>0,44</u> | <u>0,35</u> | <u>0,33</u> | – | –0,24 | 0,07 | <u>0,16</u> |
| | PEW | –0,30 | –0,43 | –0,41 | –0,14 | –0,24 | – | <u>0,51</u> | –0,56 |
| | CO ₂ | 0,03 | –0,14 | –0,07 | <u>0,19</u> | 0,07 | <u>0,51</u> | – | –0,22 |
| | Q | <u>0,22</u> | <u>0,37</u> | <u>0,41</u> | <u>0,31</u> | <u>0,16</u> | –0,56 | –0,22 | – |

procesów kształtujących ich zmienność. Ze względu na różne jednostki, w których zostały wyrażone analizowane parametry oraz znaczne różnice ich wielkości, analizę PCA wykonano na podstawie macierzy korelacji. W celu sprawdzenia adekwatności zastosowania PCA wykonano test Bartletta oraz określono współczynnik Kaisera-Mayera-Olkina (KMO). Wyniki tego testu ($p < 1,0 \cdot 10^{-5}$) oraz wartości KMO (rzędu 0,7 dla większości przypadków) wskazują na celowość zastosowania PCA dla wszystkich analizowanych parametrów. Do określenia liczby czynników zastosowano test osypiska oraz kryterium Kaisera i wyznaczono dwa czynniki. Wartości uzyskanych współrzędnych czynnikowych zestawiono w tabeli 4.

Kryterium grupowania parametrów było przekroczenie przez współrzędne czynnikowe wartości 0,6 i/lub –0,6. Tym samym uznano, że parametry te są najbardziej istotne

w tworzeniu określonego czynnika. Znaki wartości współczynników wskazują na kierunek liniowego związku pomiędzy danym czynnikiem głównym a poszczególnymi parametrami.

Analiza PCA pozwoliła wyróżnić dwa czynniki: F1 i F2 (ryc. 4). Zgrupowanie poszczególnych parametrów w tych czynnikach jest rezultatem występowania wspólnych procesów kształtujących ich zmienność. Widoczne jest jednocześnie występowanie parametru PEW (Z-3a) w dwóch czynnikach (F1 i F2), co wskazuje na efektywność zastosowania PCA. Wyodrębnione F1 i F2 jedynie w pewnym stopniu wyjaśniają wariancję analizowanych parametrów – F1 wyjaśnia 44,7% wariancji, a F2 – kolejne 20,4% wariancji. Czynniki F1 i F2 może być interpretowany jako syntetyczny zbiór procesów kształtujących zmienność PEW i CO₂ dla obu otworów w wyniku zmian depresji.



Ryc. 3. Zmienność analizowanych parametrów w badanych otworach
Fig. 3. Variability of the analyzed parameters in the investigated wells

Tab. 4. Wartości współrzędnych czynnikowych w badanych otworach**Table 4.** Factorial coordinates values in the investigated wells

| Otwór Well | Parametr Parameter | Czynnik 1 Factor 1 | Czynnik 2 Factor 2 |
|---------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Z-2 | s | 0,834 | 0,341 |
| | PEW | 0,865 | 0,037 |
| | CO ₂ | 0,803 | -0,003 |
| | Q | 0,580 | 0,395 |
| Z-3a | s | 0,639 | 0,349 |
| | PEW | -0,619 | 0,625 |
| | CO ₂ | -0,166 | 0,817 |
| | Q | 0,579 | -0,420 |

Pośród procesów najbardziej wyraźny i istotny jest wzrost depresji w otworze Z-2 i związany z tym napływ bardziej zmineralizowanych wód o podwyższonych stężeniach CO₂. Pozostałe procesy są mniej wyraźne, jednak zauważalne i wskazują m.in. na odmienny dla otworu Z-3a (w porównaniu do Z-2) wpływ wzrostu depresji, co wywołuje napływ wód o niższej mineralizacji. Kolejnym obserwowanym zjawiskiem jest współzależność wielkości depresji w obu otworach. Wynika to z faktu utrzymywania depresji na odpowiednio wysokim i jednocześnie dopuszczalnym poziomie. Wpływ zmian parametru Q na kształtowanie zmienności cech fizykochemicznych jest zbliżony dla obu otworów i relatywnie niski w kontekście wartości czynnikowych pozostałych parametrów. W czynniku F2 występują dwa parametry dla Z-3a, których udział jest istotny – stężenie CO₂ i będąca w dużej mierze jego pochodną PEW. Wydzielenie tych parametrów z czynnika F1 wskazuje, że ich struktura i zmienność mają zupełnie inny charakter niż analogiczne parametry dla Z-2. W przypadku Z-3a dopływ wód wzbogaconych w CO₂ jest w przeważnie niezależny od zmian wielkości Q i s w obu otworach.

ANALIZA ZMIENNOŚCI CZASOWEJ

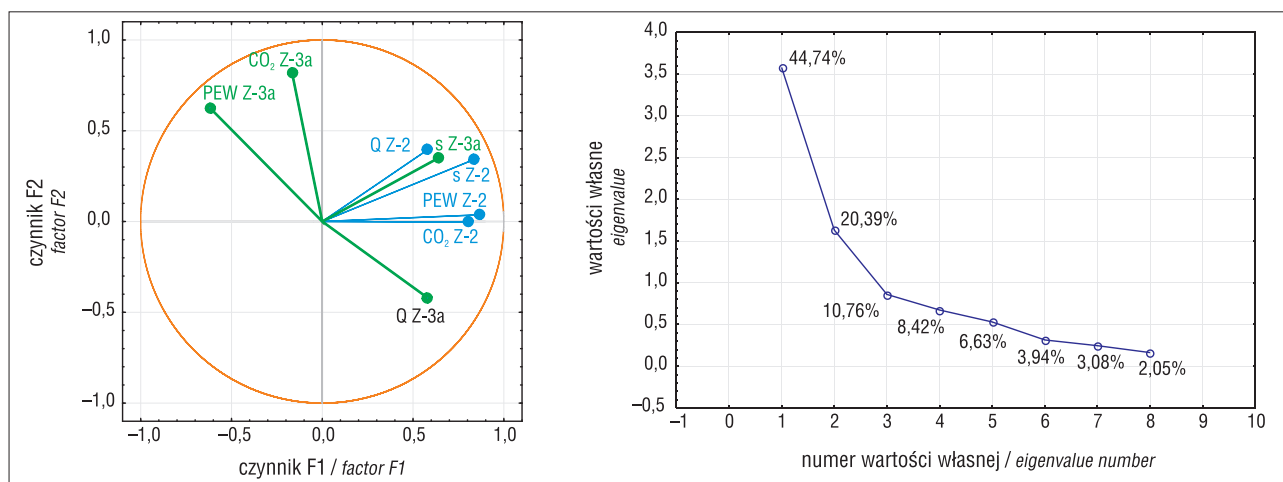
Zmienność w czasie analizowanych parametrów przedstawiono na rycinie 5 (dla Z-2 podano pełny okres). Widoczna jest duża zmienność zarówno krótkookresowa (miesiąc), jak i długookresowa (rok). Jedynie dla parametrów Q i PEW w Z-3a jest zauważalna znaczna stabilność.

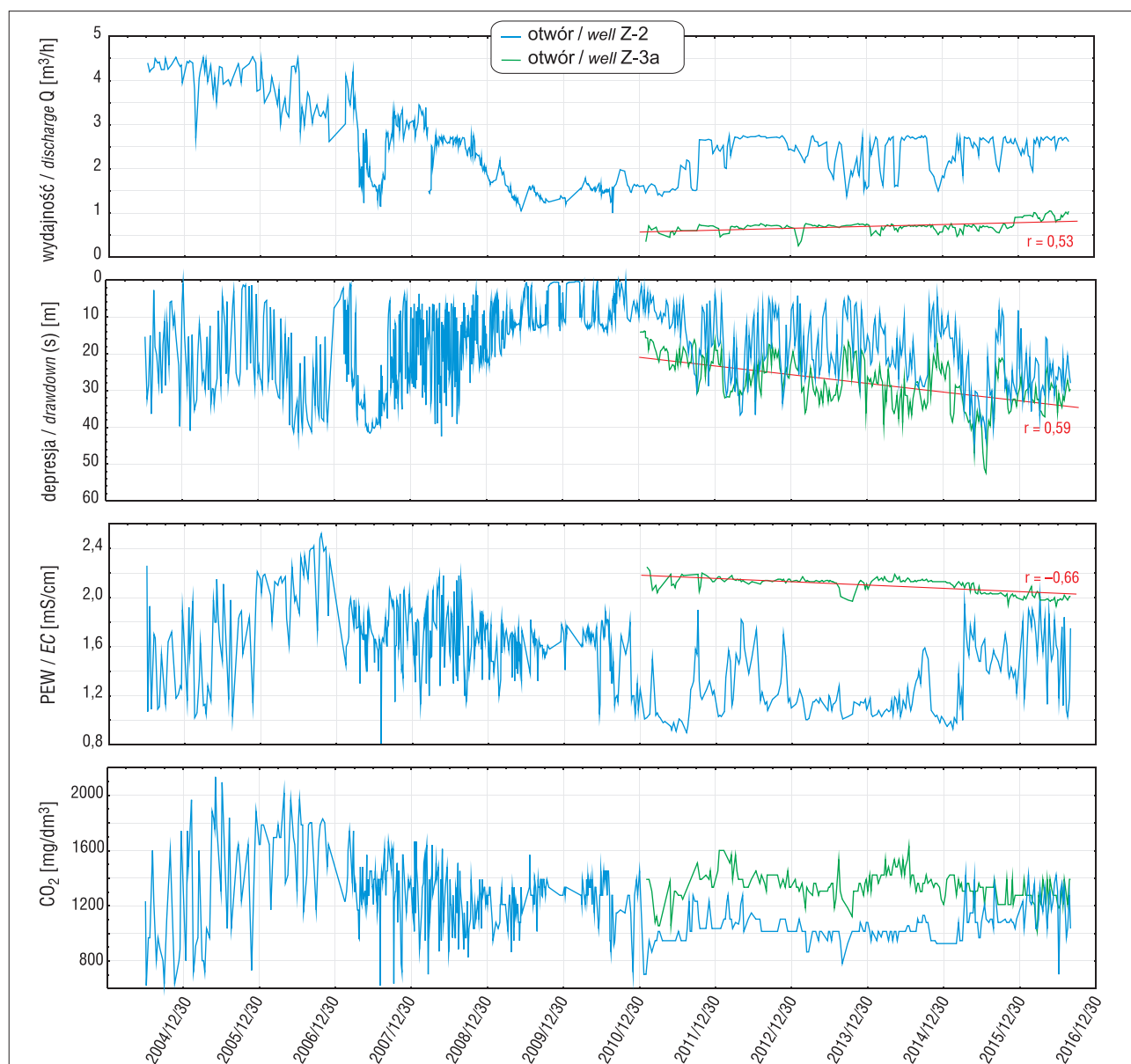
Zaznaczono parametry, dla których uzyskano dopasowanie liniowe o wartości $r > \pm 0,5$. Widoczne trendy długookresowe wskazują na występowanie w wodach z otworu Z-3a stałego obniżania się wartości PEW, przy jednoczesnym niewielkim, ale relatywnie stałym, powiększaniu się parametru Q. Widoczne są także oscylacyjne zmiany depresji w Z-3a, wskazujące na ogólne zwiększanie się depresji w dłuższym czasie. Uwzględniając pomiary od 2011 r., zbliżona zmienność s jest obserwowana także dla otworu Z-2, gdzie można zauważyć tendencję jej wzrostu.

PODSUMOWANIE

Obrazy zmienności i wzajemnych relacji analizowanych parametrów uzyskane z zastosowaniem regresji liniowej i PCA są zbliżone. Występujące różnice wynikają głównie z odporności zastosowanych metod badawczych na przypadki anomalne, przy czym usunięcie ich ze zbioru danych znacznie zniekształciłoby naturalny obraz ich zmienności. Podsumowując uzyskane rezultaty analizy, można stwierdzić, że występuje odmienny wpływ eksploatacji na parametry obserwowane dla otworów Z-2 i Z-3a. Różnice dotyczą głównie wywołanej eksploatacją depresji i warunkowanych tym kierunków i wielkości zmian PEW. Najprawdopodobniej wynikają one z odmiennej wydajności jednostkowej oraz odrębnego mechanizmu dopływu wód wymuszonego eksploatacją. Jest to ważne z punktu widzenia stałości składu chemicznego wód leczniczych w warunkach współdziałania otworów, ponieważ w pewnej mierze reagują one odwrotnie na zmiany eksploatacji. Zmiany PEW są bezpośrednim następstwem wywołanych eksploatacją zmian natężenia napływu wód o podwyższonym stężeniu CO₂ i/lub naturalnych zmian natężenia jego migracji, które w obu otworach jest niezależne od siebie i nie jest uwarunkowane w istotnym stopniu zmiennością eksploatacji. Wskazuje to na mozaikowe i skupione występowanie stref migracji CO₂ z głębszego podłoża, co potwierdza obserwowane na badanym terenie współwystępowanie wód zwykłych i leczniczych.

Zauważalna jest odmienna dla obu otworów struktura zmienności czasowej analizowanych parametrów, co dotyczy szczególnie parametrów PEW i Q. Kierunki zmian długookresowych dla Z-3a wskazują na możliwe obniżenie się PEW w odpowiedzi na wzrost Q i związane z tym

**Ryc. 4.** Projektacja wyodrębnionych zmiennych F1 i F2 na płaszczyźnie czynnikowej i wykres osypiska**Fig. 4.** Projection of parameters F1 and F2 on the plane of the factors and a scree plot



Ryc. 5. Zmienność analizowanych parametrów fizykochemicznych w okresie 2011–2016
 Fig. 5. Time variability of the analyzed parameters during 2011–2016

pogłębienie depresji. Zmienność w czasie pozostałych czynników jest trudna do jednoznacznego opisu z uwagi na swój oscylacyjny charakter.

Prowadzenie racjonalnej eksploatacji współdziałających otworów Z-2 i Z-3a w zakresie dopuszczalnych parametrów określonych w dokumentacji hydrogeologicznej oraz na podstawie kontroli wyników obserwacji stacjonarnych gwarantuje poprawną pracę ujęcia oraz minimalizuje ryzyko wysłodzenia się wód.

Autorzy pragną serdecznie podziękować Spółce MASSPOL za udostępnienie danych archiwalnych oraz anonimowemu Recenzentowi za cenne uwagi.

LITERATURA

CHOWANIEC J., CIĘŻKOWSKI W., DULIŃSKI M., JÓZEFKO I., PORWISZ B., ZUBER A. 2009 – Typy chemiczne szczaw w Karpatach Fliszowych, a wiek wody. Biul. Państw. Inst. Geol. 436: 47–54.

CHRZĄSTOWSKI J., NEŚCIERUK P., WÓJCIK A. 1991 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, ark. 1051 Muszyna. Państw. Inst. Geol., Warszawa.

CIĘŻKOWSKI W. 2007 – Wybrane zagadnienia gospodarki wodami leczniczymi w Polsce. [W:] Współczesne Problemy Hydrogeologii, 13: 101–121. AGH, Kraków.

CZOP M., MOTYKA J., RAJCHEL L. 2011 – Współczesne zagrożenia wód mineralnych i leczniczych Doliny Popradu (Karpaty, południowa Polska). [W:] Współczesne Problemy Hydrogeologii, Biul. Państw. Inst. Geol., 445: 67–74.

LEŚNIAK P.M., WĘCŁAWIK S. 1984 – Zbiorniki tzw. szczaw z płaszczowiny magurskiej jako otwarty względem CO₂ system wód podziemnych (polskie Karpaty fliszowe). Prz. Geol., 32: 591–596.

RAJCHEL L. 2012 – Szczawy i wody kwasowęglowe Karpat polskich. Wyd. AGH Kraków, s. 194.

RAJCHEL L. 2013 – Występowanie, chemizm oraz geneza szczaw i wód kwasowęglowych Karpat polskich. Biul. Państw. Inst. Geol., 456: 501–506.

WĘCŁAWIK S. 1967 – Mineral waters in the region of Polish-Czechoslovakian state boundary (Carpathians). Bull. Acad. Pol. Sci. Ser. Sc. Geol. Geogr., 15.

USTAWA z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze. Dz.U. z 2011 r. Nr 163 poz. 981.