

Ocena zmian stężenia chlorków w solankach Uzdrowiska Goczałkowice-Zdrój przy zastosowaniu metod statystycznych

Paweł Suchy¹, Dominika Dąbrowska², Rafał Kucharski³

Assessment of the chloride concentration changes in brines of Goczałkowice health resort using statistical methods. *Prz. Geol.*, 63: 1080–1084.

Abstract. The article presents the assessment of the groundwater quality trend on the example of chlorides in the region of Goczałkowice Zdrój health resort. The data from the years 1977–2014 from two boreholes: GN-1, GN-2 were analysed. The trend assessment was made using the linear model, the fixed effect model and the robust statistic. The results of these methods indicate a downward trend of chlorides concentration.

Keywords: brines, linear regression, Goczałkowice-Zdrój

W artykule przedstawiono zmiany jakości wód leczniczych (solanek) Uzdrowiska Goczałkowice-Zdrój, przeprowadzono test normalności badanych próbek, określono tło hydrogeochemiczne eksploatowanego karbońskiego piętra wodonośnego oraz dokonano oceny trendów zmian zawartości chlorków metodą trendu liniowego, modelu efektów stałych oraz modelu odpornościowego. Wykonano również prognozy zmian zawartości chlorków dla każdej z metod. W nawiązaniu do tempa szczyptywania się nieodnawialnych zasobów solanek goczałkowickich, zmiany ich składu fizykochemicznego będą znaczące dla ponownej aktualizacji dokumentacji hydrogeologicznej wód leczniczych.

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU

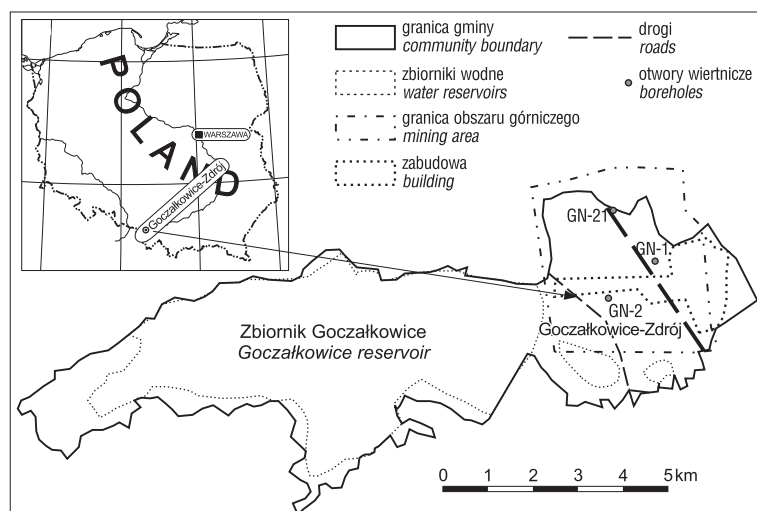
Gmina Goczałkowice Zdrój jest położona geograficznie w Dolinie Górnej Wisły, w południowo-wschodniej części Kotliny Oświęcimskiej, w sąsiedztwie Jeziora

Goczałkowickiego. W kierunku wschodnim, w odległości około 3 km od Uzdrowiska znajdują się szyby główne kopalni węgla kamiennego – Przedsiębiorstwa Górniczego „Silesia” Sp. z o.o.

Granice nowego obszaru górniczego „Goczałkowice-Zdrój I” o powierzchni 13,92 km², pokrywają się z granicami dawnego terenu górniczego „Goczałkowice-Zdrój I”. Obszar ten został ustalony w nowej koncesji na wydobywanie wód leczniczych (solanek) wydanej w maju 2013 r. Zgodnie z Ustawą Prawo geologiczne i górnicze obejmuje on przestrzeń, w granicach której Uzdrowisko jest uprawnione do eksploatacji kopaliny. Ograniczeniem tej przestrzeni są powierzchnie spągu warstw orzeskich utworów karbonu, stropu warstw karbonu oraz płaszczyzny pionowe stanowiące rzuty linii pomiędzy ustalonymi geodezyjnie punktami powierzchniowymi (ryc. 1). Obszar górniczy „Goczałkowice-Zdrój I” jest w większości położony na w granicach administracyjnych gminy Goczałkowice-Zdrój, tylko jego niewielkie fragmenty w części północnej należą do miasta Pszczyna (powiat pszczyński), a w części południowej – do miasta i gminy Czechowice-Dziedzice (powiat bielski).

BUDOWA GEOLOGICZNA

Pod względem geologicznym Uzdrowisko Goczałkowice jest położone w południowej części niecki głównej Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Utwory karbońskie w tym rejonie reprezentują trzy serie litostratygiczne: górnośląską serię piaskowcowa, serię mułowcowa oraz krakowska serię piaskowcowa. Górnośląską serię piaskowcowa i serię mułowcowa tworzą warstwy rudzkie o miąższości nieprzekraczającej 175 m, serię mułowcowa to warstwy orzeskie o miąższości od ok. 500 do 800 m, a serię piaskowcowa tworzą warstwy łaziskie o grubości dochodzącej do 500 m.



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru badań
Fig. 1. Location of the study area

¹ Uzdrowisko Goczałkowice-Zdrój Spółka z o.o. ul. Uzdrowska 54, 43-230 Goczałkowice-Zdrój; psuchy@gozdroj.pl.

² Katedra Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski, ul. Będzińska 60 41-200 Sosnowiec; ddabrowska@us.edu.pl.

³ Katedra Statystyki, Wydział Zarządzania, Uniwersytet Ekonomiczny, ul. Bogucicka 14, 40-226 Katowice; rafal.kucharski@ue.katowice.pl.

Utwory mioceńskie w postaci ilów pylastych charakteryzują się zróżnicowaną miąższością od 95 do 800 m. Czwartorzęd reprezentują holocenne utwory rzeczne oraz utwory plejstocenne związane z akumulacją lodowcową. W spągu zalegają gliny, przewarstwione seriami piasków, a w stropie występują piaski drobno- i średnioziarniste z przewartwieniami glin i pyłów. Miąższość czwartorzędu wynosi 10–40 m (Sokołowski, 1978; Jureczka i in., 2005).

WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE

Na omawianym obszarze istnieją trzy odrębne środowiska geologiczne, w których występują wody podziemne. W ujęciu Pazdro & Kozerskiego (1990) są to wody zwykłe, związane z osadami czwartorzędowymi oraz wody mineralne – od słabo zmineralizowanych do solanek – w utworach neogennych i karbońskich. W rejonie Goczałkowice-Zdroju wyraźnie zaznacza się pionowa strefowość hydrochemiczna – w utworach czwartorzędowych wody typu $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Mg}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$, w utworach mioceńskich Cl-Na-Ca , Cl-Na , a w utworach karbońskich Cl-Na+J+Fe .

Wody karbońskiego piętra wodonośnego są praktycznie odizolowane ilastymi utworami miocenu od wód neogennych i czwartorzędowych. Karbońskie poziomy wodonośne są związane z warstwami piaskowców zalegających wśród mułowców, ilowców i pokładów węgla. Wody lecznicze ujmowane dla Uzdrowiska Goczałkowice-Zdrój zalegają w warstwach orzeskich karbonu górnego. W północnej części omawianego rejonu występują one na głębokości poniżej 400–500 m i są przykryte piaskowcowym kompleksem warstw łaziskich. W południowej części obszaru warstwy orzeskie zalegają bezpośrednio pod ilastą serią miocenu na głębokości od 200 do 400 m. W przeważającej części są one zbudowane z utworów nieprzepuszczalnych reprezentowanych przez ilowce i mułowce, które stanowią ponad 80% ich profilu. Niewielkie miąższości warstw piaskowcowych (15 m), ich nieregularne występowanie, częste wyklinowania i rozszczepienia, decydują o tym, że kompleks warstw orzeskich jest słabo

wodonośny. Zgromadzone wody mają charakter wód o zasobach statycznych (Suchy, 2003).

CHARAKTERYSTYKA WÓD Z OPISEM ODWIERTÓW EKSPLOATACYJNYCH

Na potrzeby balneologii wykorzystuje się obecnie 3 otwory eksploatacyjne: Goczałkowice Nowy-1 (GN-1), Goczałkowice Nowy-2 (GN-2) oraz Goczałkowice 21 (G-21) (tab. 1).

Goczałkowice Nowy-1 (GN-1) znajduje się po wschodniej stronie drogi szybkiego ruchu Bielsko-Biała–Katowice (przy ul. Uzdrowskiej). Wylot otworu leży na wysokości 259,92 m n.p.m. Od 1957 r. są eksploatowane dwa z siedmiu najniższych położonych karbońskich poziomów wodonośnych, tj. z głębokości 458,6 i 478,0 m p.p.t. o łącznej miąższości 19,6 m (Sokołowski, 1978). Zgodnie ze stanem na 2014 r., głębokość zapuszczenia pompy w tych otworach wynosi ok. 290 m dla otworu GN-1, ok. 200 m dla otworu GN-2 oraz ok. 205 m dla otworu GN-21. Miąższości poziomów karbońskich kształtują się w granicach 4,0–63,6 m. Pobierana woda to w 8,20% solanka (2012) typu Cl-Na+J+Fe .

Zasoby eksploatacyjne udokumentowano w 1978 r. (Sokołowski, 1978) w kategorii rozpoznania A i wyniosły $Q = 0,66 \text{ m}^3/\text{h}$, przy depresji $S = 40,90 \text{ m}$, wg stanu na dzień 31.12.2000 r. (Wątor, 2001) przy depresji $S = 58,0 \text{ m}$. Depresję S obniżono do 63,0 m, wg stanu na dzień 31.12.2010 r., a prognostycznie zostanie jeszcze obniżona do 68,0 m, wg stanu na dzień 31.12.2020 r.

METODYKA BADAŃ

Ocenię trendów zmian jakości zostały poddane wody podziemne z rejonu uzdrowiska Goczałkowice ujmowane otworami GN-1 i GN-2. Pod uwagę wzięto wyniki badań zawartości chlorków z lat 1977–2014. Ocena trendów została wykonana trzema metodami statystycznymi. Są to odpowiednio: szacowanie trendów liniowych, model efektów stałych i statystyka odpornościowa (Suchy i in., 2015).

Tab. 1. Miąższości osadów w profilach otworów wiertniczych Goczałkowice Nowy-1, Goczałkowice Nowy-2 i Goczałkowice-21
Table 1. Thicknesses of the deposits in the Goczałkowice Nowy-1, Goczałkowice Nowy-2 and Goczałkowice-21 borehole sections

Stratygrafia <i>Stratigraphy</i>	Goczałkowice Nowy-1		Goczałkowice Nowy-2		Goczałkowice 21	
	Miąższość <i>Thickness</i> [m]	Głębokość <i>Depth</i> [m]	Miąższość <i>Thickness</i> [m]	Głębokość <i>Depth</i> [m]	Miąższość <i>Thickness</i> [m]	Głębokość <i>Depth</i> [m]
Czwartorzęd <i>Quaternary</i>	41,1	0,0–41,1	34,6	0,0–34,6	32,0	0,0–32,0
Neogen, miocen, baden dln w-wy skawińskie <i>Neogene, Miocene, lower Badenian, Skawina beds</i>	128,3	41,1–169,4	286,4	34,6–321,0	127,5	32,0–159,5
Karbon górny, górny westfal B i westfal C, w-wy łaziskie <i>Upper Carboniferous, upper Westphalian B and Westphalian C, Łaziska beds</i>	–	–	–	–	312,2	159,5–471,7
Karbon górny, westfal B, w-wy orzeskie <i>Upper Carboniferous, upper Westphalian B, Orzesze beds</i>	411,6	169,4–581,0*	279,3	321,0–600,3*	778,4	471,7–1250,1*

* Początkowa głębokość otworów przed likwidacją spodu w interwale głębokości 581,0–490,0 m (GN-1), 600,3–530,0 m (GN-2), 1250,1–580,0 m (G-21).

* Initial depth of boreholes before plugging back of the bottom of the boreholes within depth intervals: 581.0–490.0 m (GN-1), 600.3–530.0 m (GN-2), 1250.1–580.0 m (G-21).

Zbiór danych obejmował po dwa oznaczenia chlorków w latach 1977–1988, po jednym w latach 1989 i 1990 oraz po jednym co dwa lata, licząc od 1992 (tab. 2). Ponieważ zmiany sezonowe w przypadku analizowanych danych nie są istotne statystycznie, zostały one pominięte w ocenie trendów.

Do określenia trendów zmian stężenia chlorków i krótkoterminowego prognozowania zastosowano prosty model liniowy w postaci:

$$y = at + b + \varepsilon$$

gdzie:

y – obserwowany poziom chlorków,

t – czas w latach (za chwilę $t = 0$ przyjęto II kwartał 1977 – datę pierwszego pomiaru),

Tab. 2. Zmiany stężenia chlorków w otworach GN-1, GN-2 w latach 1977–2014 (Koczy, 2014; Suchy, 2014)

Table 2. Changes of chlorides concentration in GN-1, GN-2 boreholes in the years 1977–2014 (Koczy, 2014; Suchy, 2014)

Rok / Year	Cl ⁻ w/in GN-1 [mg/dm ³]	Cl ⁻ w/in GN-2 [mg/dm ³]
1977	48465	40463
1977	47975	41606
1978	47791	41196
1978	48039	41090
1979	47312	40655
1979	47694	40594
1980	48216	41303
1980	47826	40629
1981	46195	39176
1981	47507	40239
1982	47684	39885
1982	46302	38927
1983	47117	39140
1983	47684	39707
1984	47574	44316
1984	48023	39902
1985	47873	39062
1985	47734	40363
1986	47507	38289
1986	46775	37631
1987	47303	38159
1987	47739	38963
1988	47507	38644
1988	47578	38396
1989	47436	38352
1990	47011	37935
1992	46809	37304
1994	46719	38015
1996	46864	37491
1998	46811	37236
2000	46811	37236
2002	46372,5	37296,6
2004	44279	36054
2006	43350	36054
2008	45600	39600
2010	44165	35876
2012	48140	37300
2014	47000	39500

ε – składnik losowy,

a – nachylenie (parametr szacowany),

b – przecięcia z osią OX (parametr szacowany).

Parametry modelu są szacowane metodą najmniejszych kwadratów:

$$RSS = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2 \rightarrow \min \text{ (Christensen, 2001).}$$

Po oszacowaniu parametrów obliczono prognozy punktowe (ze wzoru: $y = at + b$) oraz 95% przedziały predykcji.

Ponieważ badane solanki mają ten sam typ hydrochemiczny, obserwujemy, że zmiany zawartości chlorków w obu otworach są zbliżone (współczynnik korelacji liniowej $\rho = 0,64$). Dlatego jako drugą metodę rozważono tak zwany model efektów stałych (ang. *fixed effects model*), w którym współczynnik kierunkowy linii trendu jest taki sam dla obu otworów, natomiast różne są wyrazy wolne. Zaletą tego modelu jest większy zbiór danych służący do oszacowania parametrów równania regresji, a co za tym idzie, lepsza identyfikacja przyczyn obserwowanych zmian zawartości chlorków w czasie (Christensen, 2001).

W obu powyższych modelach zaobserwowano, że w rozpatrywanym zbiorze danych mamy do czynienia z trzema obserwacjami odstającymi (*outliers*) od wyznaczonych trendów – wartości tych pomiarów leżą poza obliczonymi przedziałami predykcji. Pomiaru te zostały usunięte ze zbioru danych, po czym ponownie oszacowano parametry modelu z efektami stałymi. Tak oszacowany model można uznać za trzecią, „odporną” (*robust*) propozycję oceny trendu.

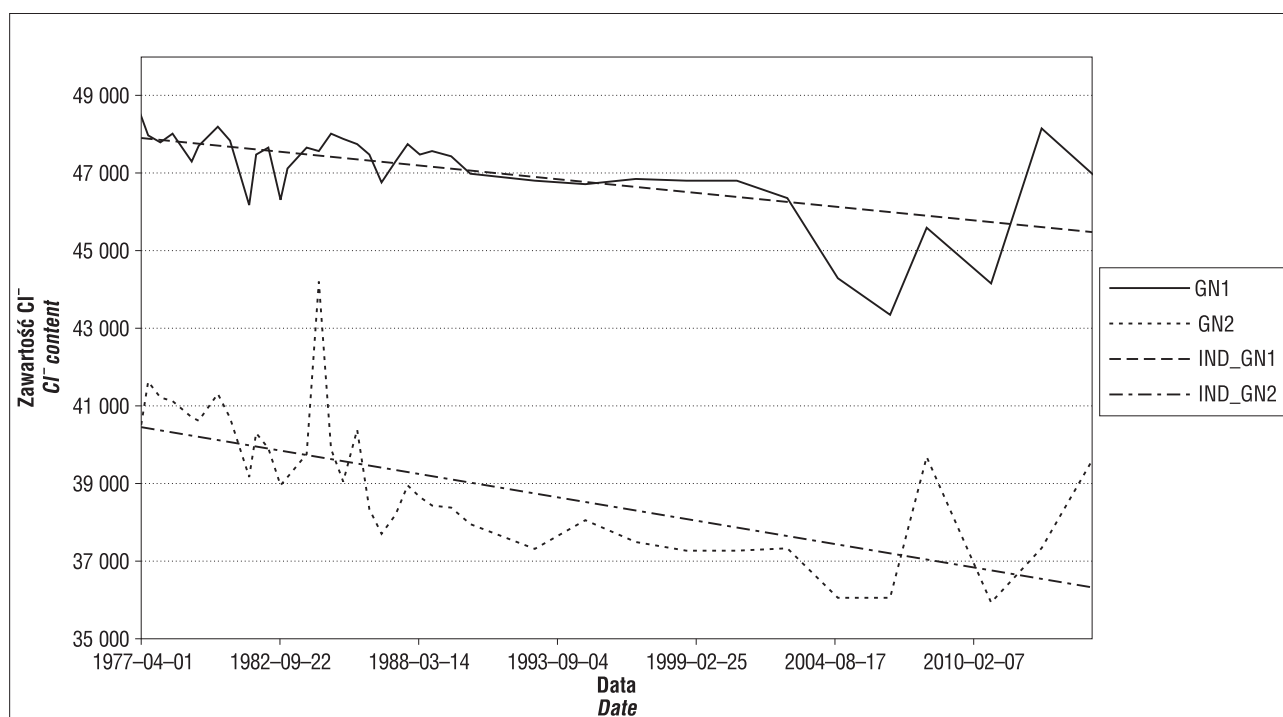
WYNIKI I Dyskusja

Wykonane obliczenia wskazują, że niezależnie od wybranej metody, zawartość chlorków w wodach podziemnych w badanych otworach wykazuje tendencję spadkową. Trend malejący jest istotny statystycznie. Wyniki analiz z 2012 r. nasuwają jednak wątpliwość, czy zmiana trendu nie jest związana ze zmianą głębokości eksploatacji solanek.

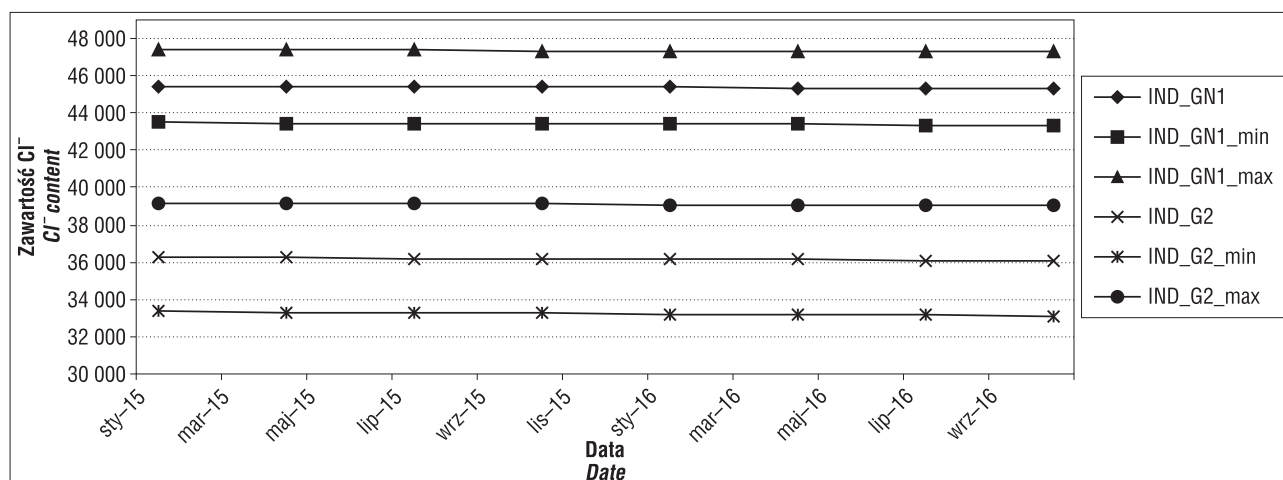
Prosta regresji wyznaczona metodą liniową dla otworu GN-1 ma postać: $y = -65,09t + 47895$, a dla otworu GN-2: $y = -110,49t + 40436$. Średnie błędy szacunku współczynników liniowych wyniosły odpowiednio 13,55 oraz 20,24. Zmianę zawartości chlorków i dopasowaną linię trendu dla tej metody przedstawiono na rycinie 2.

Wykonano także prognozy zmian zawartości chlorków w 2015 i 2016 r. za pomocą modelu liniowego. Szczegółowe wyniki przedstawia rycina 3. Prognozę tę podzielono na oszacowanie punktowe oraz na oszacowanie z 95% prawdopodobieństwem uzyskania wyników mieszczących się w podanych przedziałach.

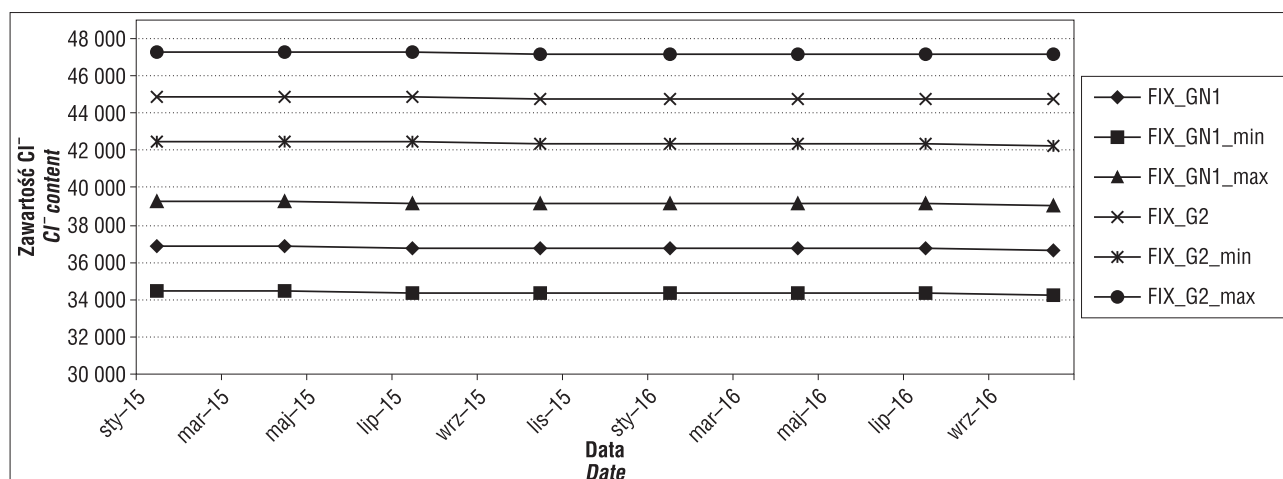
Po zastosowaniu dopasowania linii trendu w modelu efektów stałych, otrzymano następującą postać prostej regresji: $y = -87,79t + 40150 + 8031\alpha$, gdzie $\alpha = 1$ dla otworu GN-1, zaś $\alpha = 0$ dla otworu GN-2. Średnie błędy szacunku to 12,38 dla współczynnika liniowego oraz 243,28 dla parametru przy zmiennej zero-jedynkowej α . Również w przypadku tej metody wykonano omówione powyżej prognozy (ryc. 4).



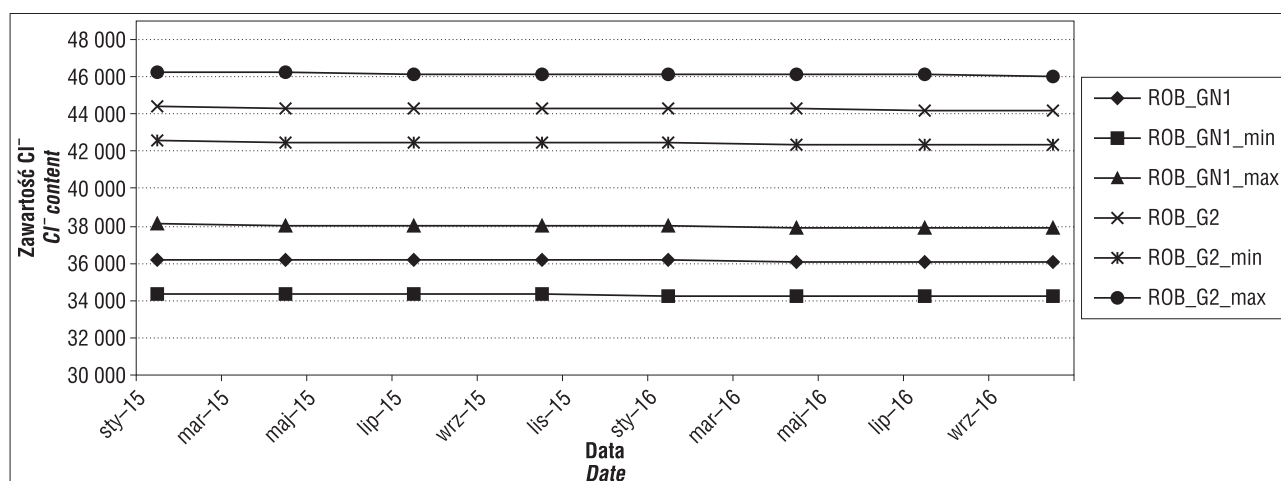
Ryc. 2. Trendy zmian jakości wód podziemnych w otworach GN-1 oraz GN-2 w latach 1977–2014 z zastosowaniem modelu liniowego
Fig. 2. Trends of the groundwater quality changes in the GN-1, GN-2 boreholes in the years 1977–2014 with the linear model



Ryc. 3. Oszacowane wartości stężeń chlorków w otworach GN-1, GN-2 w latach 2015, 2016 z wykorzystaniem trendu liniowego
Fig. 3. Estimated value of the concentration of chlorides with a linear trend in the GN-1, GN-2 boreholes in years 2015 and 2016



Ryc. 4. Oszacowane wartości stężeń chlorków w otworach GN-1, GN-2 w latach 2015, 2016 z wykorzystaniem modelu efektów stałych
Fig. 4. Estimated value of the concentration of chlorides with a fixed effect model in the GN-1, GN-2 boreholes in years 2015 and 2016



Ryc. 5. Oszacowane wartości stężeń chlorków w otworach GN-1, GN-2 w latach 2015, 2016 z wykorzystaniem modelu odpornego
Fig. 5. Estimated value of the concentration of chlorides with a robust linear model in the GN-1, GN-2 boreholes in years 2015 and 2016

Po usunięciu obserwacji odstających, obliczenia wykonane trzecią metodą są obciążone mniejszym błędem, w związku z czym dopasowanie prostej do wyników badań hydrogeochemicznych jest lepsze. Uzyskana prosta ma postać: $y = -103,30t + 40131 + 8153\alpha$, przy średnich błędach szacunku 10,16 i 190,59 odpowiednio dla współczynnika liniowego i parametru przy zmiennej α . Jednocześnie widać, że usunięcie obserwacji odstających nie wpłynęło znacząco na ocenę trendu. Prognozę zmian stężenia chlorków z zastosowaniem modelu odpornościowego przedstawia rycina 5.

WNIOSKI

Wyznaczanie trendów w ocenie zmian jakości wód podziemnych jest przydatne w celu określenia zmian składników w czasie. Zastosowanie metod analitycznych, jak model liniowy, model efektów stałych czy model odporny, pozwala na wyznaczenie trendu w przypadku różnych szeregów czasowych.

Wody podziemne, od słabo zmineralizowanych do solanek w utworach neogeńskich i karbońskich, w Uzdrowisku Goczałkowice-Zdrój są wodami typu Cl-Na+J+Fe. Ocenę trendu zmian stężenia chlorków przeprowadzono trzema ww. metodami. Najmniejszym błędem statystycznym i jednocześnie najwęższym zakresem szacowanych wartości charakteryzuje się model „odporny”. Dlatego metoda ta powinna być wykorzystywana przy szacowaniu trendów zmian zawartości składników wód podziemnych, jako najdokładniejsza. Wyniki analiz chemicznych z otworów GN-1, GN-2 wskazują, że zawartość chlorków w wodach podziemnych Uzdrowiska Goczałkowice-Zdrój do 2012 r. wykazuje tendencję spadkową. Oznaczenia z 2012 r. świadczą o możliwości zmiany trendu.

Głębokość eksploatacji zwiększa się sukcesywnie wraz z obniżaniem się zwierciadła udostępnionych i ujmowanych w odwiertach horyzontów wodonośnych. Wzrost głębokości zapuszczenia pompy następuje każdorazowo po ponownym jej zapuszczeniu do otworu. Ma to miejsce w przypadku nagłego zmniejszenia się wydajności pompy z powodów technicznych – awarii, zużycia czy perforacji

rud wydobywczych. Tempo obniżania zapuszczenia pompy w celach eksploatacyjnych jest związane z tempem szczypania się nieodnawialnych zasobów statycznych. Wraz z obniżeniem głębokości eksploatacji następuje wzrost wydajności urządzenia pompowego, a pompowana solanka wykazuje ostatnio, tj. od 2012 r., wzrost mineralizacji ogólnej oraz stężenia zawartości chlorków. Takiej sytuacji sprzyja fakt, że rezerwar wód podziemnych solanek, wraz z ich szczypaniem i brakiem stref zasilania przez okna hydrogeologiczne, kurczy się, zmniejszając swoją objętość w strefach saturacji poziomów wodonośnych o zwierciadle napiętym.

Wartości stężenia chlorków w 2014 r. w solankach z opisywanych otworów są niższe (GN-1) oraz niewiele wyższe (GN-2) w stosunku do 2012 r. Prognozy zawartości chlorków na lata 2015 i 2016 z użyciem omawianych trzech metod statystycznych nie wskazują jednak na zmianę trendu, co wiąże się z występowaniem tylko jednego podwyższonego pomiaru. Wyniki kolejnych analiz chemicznych mogą jednak potwierdzić przypuszczenie o zmianie trendu.

LITERATURA

- CHRISTENSEN R. 2001 – Advanced linear modeling. Springer, N. Jork.
- JURECZKA J., DOPITA M., GAŁKA M., KRIEGER W., KWARCZYŃSKI J. & MARTINEC P. 2005 – Atlas geologiczno-złożowy polskiej i czeskiej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Państw. Inst. Geol. i Min. Środ., Warszawa.
- KOCZY P. 2014 – Balneologiczne i fizykochemiczne walory uzdrowiska Goczałkowice-Zdrój. Praca magisterska. Arch. Wydz. Nauk o Ziemi, U.Śl., Sosnowiec.
- PAZDRO Z. & KOZERSKI B. 1990 – Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., Warszawa.
- SOKOŁOWSKI A. 1978 – Dokumentacja hydrogeologiczna wód leczniczych Goczałkowic Zdroju, aneks nr 3. Balneoprojekt, Warszawa (niepublikowane).
- SUCHY P. 2003 – Wody lecznicze Uzdrowiska Goczałkowice Zdrój – ochrona zasobów i perspektywy ujmowania. Górnictwo, Zesz. Nauk. PŚl., nr 1592 Gór., 256: 215–220.
- SUCHY P., DĄBROWSKA D. & KUCHARSKI R. 2015 – Metody statystyczne w ocenie zmian zawartości bromków w solankach Uzdrowiska Goczałkowice-Zdrój, Acta Geogr. Silesiana, 19: 61–66.
- WATOR L. 2001 – Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby eksploatacyjne ujęć wód leczniczych Goczałkowic-Zdroju. Nambud, Czechowice-Dziedzice (niepublikowane).