

Małgorzata Kucharek, Wiktor Treichel

## Zastosowanie entropii informacji do oceny sieci monitoringu jakości wód podziemnych

Ocena sieci monitoringu jakości wód podziemnych powinna uwzględniać różne kryteria. Jednym z nich jest ilość informacji, jaką sieć monitoringu jest w stanie dostarczyć do systemu kontroli. Na wartość tego kryterium w istotnym stopniu wpływa sposób, w jaki sieć została zaprojektowana. W czasie projektowania sieci monitoringu określa się, jakie parametry muszą być mierzone, gdzie powinny być usytuowane punkty pomiarowe oraz jak często i jak długo należy pobierać próbki wody do badań. Od tych decyzji zależy zarówno koszt eksploatacji sieci, jak również jej jakość. Dotyczy to zarówno rozległych, regionalnych, sieci monitoringowych, jak i sieci lokalnych, których zadaniem jest kontrola jakości środowiska gruntowo-wodnego w otoczeniu obiektów uciążliwych.

O ile problem oceny kosztów eksploatacji sieci monitoringu – z metodycznego punktu widzenia – nie przysparza kłopotów, to dobór ilościowego kryterium jakości sieci nie jest już tak jednoznaczny. Jakość sieci monitoringu powinna być oceniana za pomocą kryterium, które pozwalałoby zmierzyć, czy ilość informacji uzyskanej z sieci monitoringu odpowiada oczekiwaniom. Z dotychczasowych doświadczeń i obserwacji wynika, iż często – mimo bogatego zbioru danych i ogromnych kosztów utrzymania sieci – otrzymuje się niewielką ilość informacji. W wielu pracach [1–5] proponuje się wykorzystanie do oceny jakości sieci monitoringu metod wywodzących się z teorii informacji opracowanej przez Shannona [6]. Podstawowym pojęciem tej teorii jest entropia informacyjna, która stanowi miarę ilości informacji zawartych w danych. Traktując sieć monitoringu jak sygnałowy system komunikacyjny, mający zdolność przekazu informacji hydrologicznej, można do tego systemu zastosować kryteria oceny wykorzystujące entropię informacyjną.

W niniejszej pracy zaprezentowano metodę pozwalającą na ocenę, czy istniejąca sieć monitoringu dostarcza wystarczającą ilość informacji do systemu. Podstawą tej oceny była wartość marginalnej entropii informacyjnej, obliczona w każdym punkcie pomiarowym. Na podstawie wartości tego kryterium zaproponowano warianty zmniejszenia liczby punktów pomiarowych w sieci monitoringu. Badania wykonano na sieci monitoringu wód podziemnych zbiornika odpadów poflotacyjnych „Żelazny Most”. Zbiornik ten, stanowiący składowisko odpadów poflotacyjnych powstałych w procesie wydobywania rudy miedzi, jest jednym z największych na świecie składowisk odpadów przemysłowych (pow. ok. 1400 ha). Na całkowitą ilość wyprodukowanych odpadów w KGHM

Polska Miedź SA w 2001 r., wynoszącą 28,7 mln ton, blisko 27 mln ton stanowiły odpady poflotacyjne wyprodukowane przez zakłady wzbogacania rudy miedzi [8]. Składowisko oddziałuje na środowisko poprzez zajęcie dużej powierzchni terenu, podtopienia, hałas, zmianę krajobrazu, a także zanieczyszczenie powietrza, gleby, roślin oraz wód powierzchniowych i podziemnych. Składowisko otoczone jest strefą ochronną o powierzchni około 1126 ha, o zasięgu 500+1500 m od podstawy zapory. Od początku lat 80. XX w. w rejonie składowiska prowadzony jest monitoring środowiska, w tym monitoring wód podziemnych. Sieć pomiarowa obejmuje około 350 punktów. Z dokonanego rozeznania wynika, że dotychczas nie prowadzono badań mających na celu optymalizację rozmieszczenia punktów pomiarowych i ocenę ilości informacji dostarczanej przez sieć monitoringu. W pracy zaprezentowano wyniki badań dotyczące wschodniego przedpola zbiornika, obejmującego 132 piezometry.

### Podstawowe pojęcia teorii informacji

Podstawowym pojęciem definiovanym w teorii informacji Shannona [6] jest entropia informacji. Pozwala ona w sposób ilościowy opisać niepewność związaną z występowaniem zjawiska losowego lub inaczej mówiąc – ocenić ilość informacji, jaką niesie obserwacja zjawiska losowego. Jeśli  $X$  jest dyskretną zmienną losową przyjmującą wartości  $x_1, x_2, \dots, x_N$  z prawdopodobieństwem  $p(x_n)$ , przy czym  $n=1, 2, \dots, N$ , to ilość informacji, jaką przynosi obserwacja zmiennej  $X$ , można obliczyć za pomocą zależności:

$$H(X) = - \sum_{n=1}^N p(x_n) \log p(x_n) \quad (1)$$

Wyrażenie  $H(X)$  nazywane jest entropią krańcową, której jednostką jest napier – jeśli do obliczeń we wzorze (1) wykorzystuje się logarytm naturalny, decybel – jeśli stosuje się logarytm dziesiętny lub bit – jeśli używa się logarytmu o podstawie 2. Wartość entropii krańcowej mieści się w przedziale od 0 do  $\log N$  [1]. Jeśli przyjąć, że zmienna  $X$  reprezentuje obserwacje pochodzące z punktu pomiarowego (piezometru) sieci monitoringu, to entropia  $H(X)$  określa ilość informacji zawartej w tych obserwacjach.

Należy zauważyć, że wartość entropii  $H(X)$  zależy od liczby możliwych wyników obserwacji ( $N$ ) oraz od rozkładu prawdopodobieństwa  $p(x_n)$  ( $n=1, 2, \dots, N$ ). W wypadku rozkładów skupionych, w których łatwo przewidzieć wynik obserwacji, wartość entropii jest mała. W szczególności, przy zdarzeniu pewnym (obserwacja daje tylko jedną wartość z prawdopodobieństwem 1),

którego rezultat daje się łatwo przewidzieć, wartość entropii równa jest 0. W tym przypadku nie ma niepewności, a wartość informacyjna obserwacji jest zerowa. Z kolei przy rozkładach o dużym rozrzucie, dla których możliwe są różne wyniki obserwacji z odpowiednio małym prawdopodobieństwem, wartość entropii jest duża. W krańcowym przypadku, gdy każda z  $N$  obserwacji  $x_n$  ( $n=1, 2, \dots, N$ ) jest jednakowo prawdopodobna, z prawdopodobieństwem  $p_n=1/N$ , entropia osiąga swoją wartość maksymalną równą  $\log N$ . Można powiedzieć, że zjawisko losowe z wysokim prawdopodobieństwem wystąpienia ma małą wartość informacyjną, natomiast zjawisko losowe z małym prawdopodobieństwem wystąpienia, którego rezultat trudno przewidzieć, ma dużą wartość informacyjną [7]. Reasumując, wartość entropii informacyjnej zjawiska losowego ocenia stopień zaskoczenia z obserwacji rezultatu tego zjawiska.

Można również zauważyć, że w wypadku dwóch niezależnych zjawisk losowych ( $\alpha$  i  $\beta$ ), które mają odpowiednio ( $N_1$  i  $N_2$ ) jednakowo prawdopodobnych wyników, zjawisko złożone łączne ( $\alpha\beta$ ), polegające na jednoczesnym zajściu obu zjawisk ( $\alpha$  i  $\beta$ ), ma niepewność większą niż niepewność tylko jednego z nich. Wartość informacyjna zjawiska  $\alpha\beta$ , mierzona entropią, równa jest sumie wartości informacyjnych każdego z nich. Zatem przy dwóch niezależnych procesach losowych ( $X$  i  $Y$ ) zachodzących w tym samym czasie, całkowita ilość niepewności lub całkowita ilość informacji, jaką procesy te przynoszą, definiowana jako entropia łączna, może być wyrażona za pomocą sumy ich entropii krańcowych:

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y) \quad (2)$$

Oprócz entropii krańcowej i entropii łącznej, w zastosowaniach teorii informacji wykorzystuje się również pojęcia entropii warunkowej oraz transinformacji.

Jeśli dwie zmienne losowe  $X$  i  $Y$  są skorelowane, wówczas do oceny ilości informacji wykorzystuje się entropię warunkową, która jest wyrażona jako funkcja prawdopodobieństwa warunkowego doświadczenia  $X$  pod warunkiem  $Y$  (lub odwrotnie):

$$H(X/Y) = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M p(x_n, y_m) \log p(x_n/y_m) \quad (3)$$

$$H(Y/X) = - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N p(y_m, x_n) \log p(y_m/x_n)$$

w której:

$p(x_n, y_m)$  ( $n=1, \dots, N$ ;  $m=1, 2, \dots, M$ ) – prawdopodobieństwo łączne zdarzeń  $X$  i  $Y$

$p(x_n/y_m)$  lub  $p(y_m/x_n)$  – prawdopodobieństwo warunkowe otrzymania wartości  $x_n$  pod warunkiem, że otrzymano wartość  $y_m$  lub odwrotnie ( $y_m$  pod warunkiem  $x_n$ ) [1]

Entropia warunkowa  $H(X/Y)$  jest miarą ilości informacji zawartej w zmiennej  $X$ , której nie zawiera zmienna  $Y$ .

W przypadku zmiennych stochastycznie zależnych, entropia łączna – zwana entropią całkowitą – wyrażona jest wzorem [1]:

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y/X) = H(Y) + H(X/Y) \quad (4)$$

W tym wypadku entropia łączna oblicza całkowitą ilość informacji zawartej w obu zmiennych  $X$  i  $Y$ .

Kolejnym pojęciem stosowanym do pomiaru wartości informacji wzajemnej pomiędzy zmiennymi  $X$  i  $Y$  jest wielkość zwana transinformacją lub wzajemną informacją. Jest ona opisana wzorem:

$$T(X, Y) = T(Y, X) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M p(x_n, y_m) \log \left[ \frac{p(x_n, y_m)}{p(x_n)p(y_m)} \right] \quad (5)$$

w którym:

$p(x_n, y_m)$  ( $n=1, \dots, N$ ;  $m=1, \dots, M$ ) – prawdopodobieństwo łączne dwóch zdarzeń ( $X$  i  $Y$ ) [4]

Transinformacja jest definiowana jako ilość informacji zawarta w  $X$ , która jest zawarta również w  $Y$ , i może być interpretowana jako zmniejszenie niepewności związanej ze zmienną  $X$  osiągnięte dzięki znajomości zmiennej  $Y$ . Zatem:

$$T(X, Y) = H(X) + H(Y) - H(X, Y) \quad (6)$$

Wykorzystuje się również pojęcie entropii względnej, które definiowane jest zależnością:

$$H_R = \frac{H(X)}{H_{\text{maks}}} \quad (7)$$

w której:

$H_{\text{maks}}$  – entropia maksymalna ( $H_{\text{maks}} = \log N$ )

$N$  – całkowita liczba klas obserwacji [3]

Entropię maksymalną ma zjawisko losowe, którego każdy wynik zachodzi z jednakowym prawdopodobieństwem. Pojęcia entropii marginalnej, entropii łącznej, entropii warunkowej oraz transinformacji definiowane są również dla zmiennych losowych ciągłych. Jeśli  $X$  jest zmienną losową ciągłą o gęstości prawdopodobieństwa  $f(x)$ , to entropia marginalna tej zmiennej wyrażona jest wzorem:

$$H(X) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \log f(x) dx \quad (8)$$

W wypadku zmiennej losowej ( $X_1, X_2, \dots, X_M$ ), o wielowymiarowym rozkładzie normalnym lub logarytmiczno-normalnym, entropię łączną można obliczyć ze wzoru:

$$H(X_1, X_2, \dots, X_M) = \frac{M}{2} \ln 2\pi + \frac{1}{2} \ln |C| + \frac{M}{2} \quad (9)$$

w którym:

$M$  – liczba zmiennych

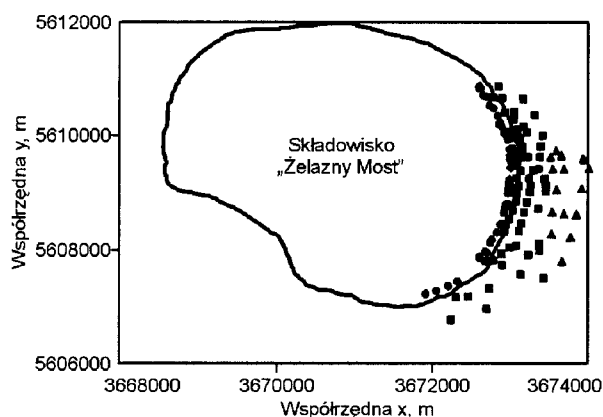
$|C|$  – wyznacznik macierzy kowariancji zmiennych  $X_1, X_2, \dots, X_M$  [1]

Można zauważyć, że stochastyczna zależność występująca pomiędzy dwoma procesami (zmiennymi losowymi) powoduje zmniejszenie entropii krańcowej i łącznej tych procesów. Ponadto entropia krańcowa pojedynczego procesu, który jest autoskorelowany, jest mniejsza niż niepewność zawarta w przypadku, gdyby ten proces był niezależny.

## Sieć monitoringu składowiska „Żelazny Most”

Do analizy wybrano sieć monitoringu wód podziemnych wózków składowiska odpadów poflotacyjnych „Żelazny Most”. Składowisko to jest eksploatowane od prawie 30 lat. Stale wzrastająca ilość odpadów poflotacyjnych oraz wód nadosadowych

stanowi poważne zagrożenie dla środowiska wodnego. Wskutek filtracji wód ze składowiska w jego podłoże oraz na przedpolu, następują zmiany zarówno w dynamice wód podziemnych, jak i w ich składzie chemicznym [9]. Zmiany te są rejestrowane i dokumentowane w oparciu o systematyczne wyniki pomiarów położenia zwierciadła wody czwartorzędowego piętra wodonośnego oraz wyniki badań wskaźników fizyczno-chemicznych. Sieć monitoringu jakości wód podziemnych, na którą składają się piezometry przedpola składowiska, studnie bariery drenażu pionowego, piezometry przystudzienne oraz studnie kopane, obejmuje około 350 punktów pomiarowych. Rozmieszczenie punktów pomiarowych charakteryzuje się dużą nieregularnością. Do analizy wybrano przedpole zapory wschodniej, na którym znajdują się 132 piezometry (rys. 1). Badania fizyczno-chemiczne wody zostały przeprowadzone podczas wrześniowej kampanii pomiarowej wykonanej w 2000 r. i obejmowały oznaczenia podstawowych wskaźników (substancje rozpuszczone, chlorki, siarczany, sól, potas oraz niektóre metale ciężkie). Wyniki modelowania geostatystycznego przestrzennego rozkładu stężeń jonów  $Cl^-$  w wodach podziemnych na przedpolach wschodnim i północnym zbiornika zaprezentowano w pracy [10]. Powierzchnia wód zdegradowanych na przedpolu wschodnim wynosiła około 175 ha i była większa o 30 ha w stosunku do 1999 r.



Rys. 1. Rozmieszczenie piezometrów na przedpolu wschodnim składowiska odpadów „Żelazny Most” z podziałem na trzy obszary względem odległości od zapory (● – piezometry umieszczone w zaporze, ■ – piezometry umieszczone w odległości 0+806 m od podstawy zapory, ▲ – piezometry umieszczone w odległości powyżej 806 m od podstawy zapory)

W pracy przeprowadzono analizę entropii informacji sieci monitoringu wód podziemnych, skupiając uwagę na jednym badanym wskaźniku, tj. na zawartości substancji rozpuszczonych w wodzie. Motywem takiego postępowania jest wysoki współczynnik korelacji pomiędzy wskaźnikami fizyczno-chemicznymi wód podziemnych (tab. 1).

Tabela 1. Współczynniki korelacji pomiędzy wskaźnikami fizyczno-chemicznymi wód podziemnych

| Wskaźnik                | Substancje rozpuszczone | Chlorki | Siarczany | Sól   |
|-------------------------|-------------------------|---------|-----------|-------|
| Substancje rozpuszczone | 1                       | 0,989   | 0,776     | 0,975 |
| Chlorki                 | 0,989                   | 1       | 0,712     | 0,968 |
| Siarczany               | 0,776                   | 0,712   | 1         | 0,796 |
| Sól                     | 0,975                   | 0,968   | 0,796     | 1     |

## Wyniki badań

Po przeanalizowaniu rozkładu przestrzennego danych dokonano podziału całego obszaru badań na trzy obszary. Pierwszy obszar obejmował piezometry posadowione w zaporze zbiornika. Drugi obszar to strefa piezometrów oddalonych maksymalnie o 806 m od podstawy zapory, który charakteryzuje się dość dużą gęstością próbkowania. Trzeci obszar to rejon najbardziej oddalony, powyżej 806 m i mający stosunkowo niewiele punktów pomiarowych (rys. 1).

Przy obliczaniu entropii bardzo ważne jest określenie rozkładu prawdopodobieństwa badanej cechy. W tym wypadku przyjęto rozkład normalny, a następnie wykorzystano zależność (9) do obliczenia entropii w sieci monitoringu. Cały proces został podzielony na trzy etapy. W pierwszym kroku – korzystając z całego dostępnego zbioru danych – obliczono entropię poszczególnych obszarów, a następnie kolejno z każdego obszaru usuwano kilka punktów pomiarowych i ponownie liczono entropię. Kryterium wyboru punktów polegało na porównaniu zagęszczenia sieci. W pierwszym etapie pominięto punkty leżące blisko siebie oraz charakteryzujące się podobnym stężeniem zanieczyszczeń. Otrzymane wyniki zawiera tabela 2.

Tabela 2. Liczba usuniętych punktów pomiarowych

| Sieć monitoringu przedpola wschodniego                               | Liczba próbek | Liczba usuniętych punktów |        |        |
|--|---------------|---------------------------|--------|--------|
|  |               | etap 1                    | etap 2 | etap 3 |
| Obszar 1 – piezometry zapory   | 49            | 5                         | 14     | 21     |
| Obszar 2 – piezometry przedpola w odległości 0+806 m od zapory       | 65            | 8                         | 15     | 29     |
| Obszar 3 – piezometry przedpola w odległości powyżej 806 m od zapory | 17            | 4                         | 8      | –      |

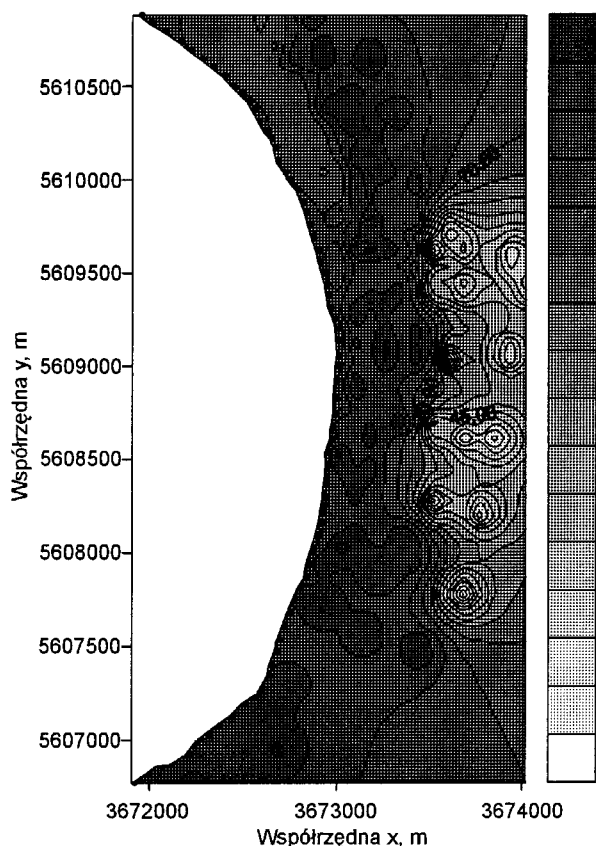
Entropię oznaczono kolejno dla etapu 1 –  $H_1(X)$ , dla etapu 2 –  $H_2(X)$  i dla etapu 3 –  $H_3(X)$ . W strefie położonej najdalej od zapory zrezygnowano z odrzucania punktów w etapie 3 ze względu na niewielką liczbę posadowionych tam piezometrów i utratę informacji z tego obszaru o prawie 2/3 w stosunku do pierwotnej wartości entropii (tab. 3).

Tabela 3. Wartości entropii w poszczególnych etapach i w kolejnych obszarach

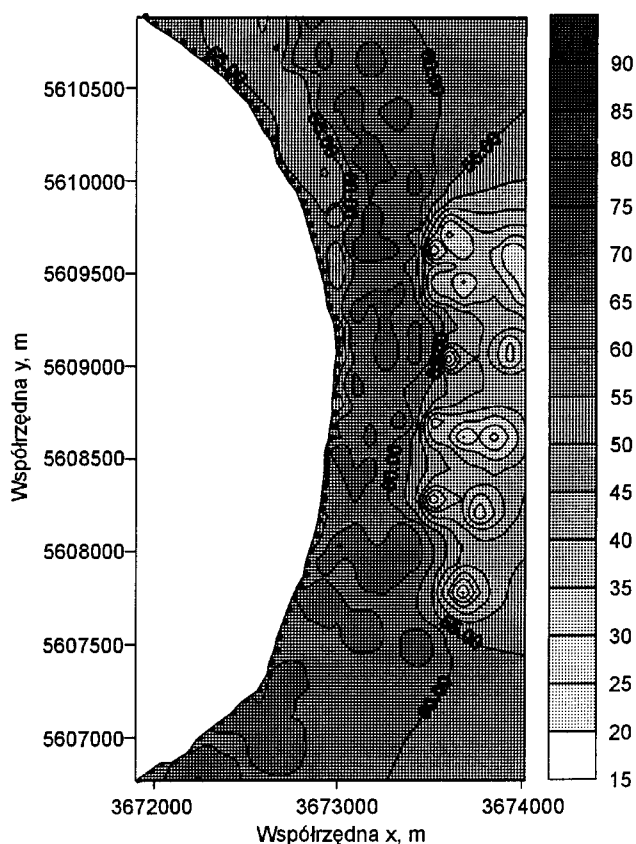
| Sieć monitoringu przedpola wschodniego                               | Entropia, % |                    |                    |                    |
|--|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|  | H(X)        | H <sub>1</sub> (X) | H <sub>2</sub> (X) | H <sub>3</sub> (X) |
| Obszar 1 – piezometry zapory   | 68,8        | 61,7               | 49,0               | 39,1               |
| Obszar 2 – piezometry przedpola w odległości 0+806 m od zapory       | 91,8        | 80,4               | 70,5               | 50,7               |
| Obszar 3 – piezometry przedpola w odległości powyżej 806 m od zapory | 23,0        | 17,3               | 11,7               | –                  |

Przestrzenny rozkład entropii informacyjnej w poszczególnych etapach zobrazowano na rysunkach 2–4, które wykonano przy pomocy programu Surfer.

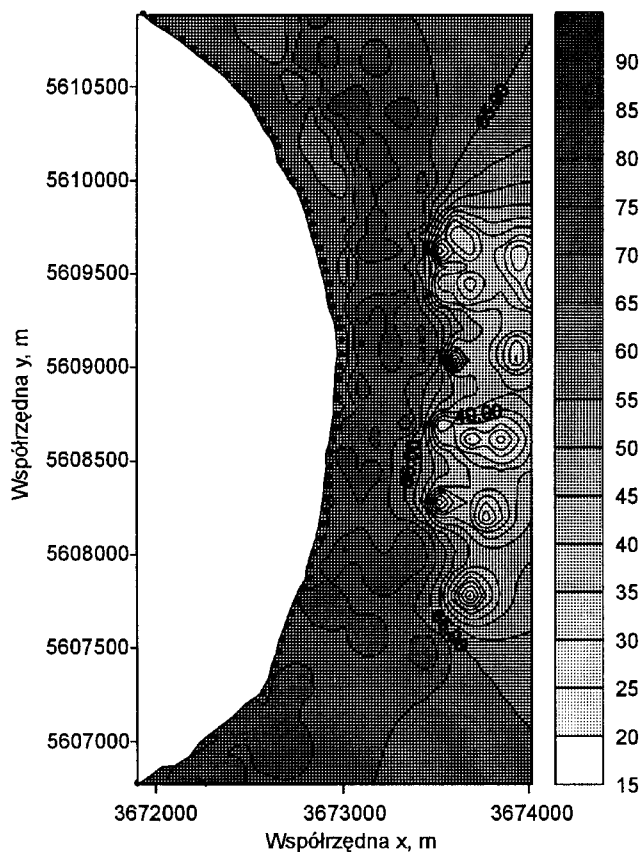
Analizując otrzymane wyniki widać, że zmniejszenie liczby punktów pomiarowych doprowadziło do zmniejszenia entropii informacyjnej sieci monitoringu wód podziemnych wokół składowiska odpadów „Żelazny Most” (rys. 3 i 4).



Rys. 2. Mapa entropii uwzględniająca wszystkie punkty pomiarowe



Rys. 4. Mapa entropii po zmniejszeniu liczby punktów pomiarowych w obszarze 1 i 2 w drugim etapie



Rys. 3. Mapa entropii po zmniejszeniu liczby punktów pomiarowych w pierwszym etapie

W tabelach 3 i 4 zebrano wartości entropii przy pominięciu niektórych piezometrów. Z badanej sieci monitoringu w poszczególnych podobzariach usuwano punkty usytuowane w miejscach największego zagęszczenia sieci pomiarowej. Często były to miejsca, gdzie piezometry oddalone były od siebie mniej niż 10 m. Najwięcej punktów usunięto w obszarze 2, czyli najbliższej zapory, a następnie, w miarę oddalania się od podstawy zapory, liczba usuniętych piezometrów była coraz mniejsza.

Tabela 4. Różnica pomiędzy entropią pełnego zbioru danych i zmniejszoną siecią monitoringu w poszczególnych etapach

| Sieć monitoringu przedpola wschodniego                               | Entropia $H(X)$ % | Utrata informacji, % |        |        |
|--|-------------------|----------------------|--------|--------|
|  |                   | etap 1               | etap 2 | etap 3 |
| Obszar 1 – piezometry zapory   | 68,8              | 7,1                  | 19,9   | 29,7   |
| Obszar 2 – piezometry przedpola w odległości 0+806 m od zapory       | 91,8              | 11,4                 | 21,3   | 41,1   |
| Obszar 3 – piezometry przedpola w odległości powyżej 806 m od zapory | 23,0              | 5,7                  | 11,3   | –      |

Należałoby rozważyć, czy utrata 7+20% informacji w obszarze zapory i 12+20% w bezpośredniej bliskości zapory nie jest korzystniejsza ekonomicznie. Obszar 2 charakteryzuje się bardzo wysoką entropią – 91,8% i prawdopodobnie w tej strefie można by było pozwolić sobie na utratę nawet 20% informacji w zamian za dokładniejsze opomiarowanie obszaru 3, w którym wyraźnie widać braki informacyjne. Wartość entropii w strefie oddalonej od zapory o 806 m wynosiła zaledwie 23%.

## Podsumowanie

Wartość informacyjna sieci monitoringu może być mierzona za pomocą krańcowej entropii informacji, która jest jednym z kryteriów wywodzących się z teorii informacji Shannona. Na podstawie wartości tego kryterium zaproponowano warianty zmniejszenia liczby punktów pomiarowych w sieci monitoringu na przedpolu wschodnim składowiska odpadów poflotacyjnych „Żelazny Most”. Stwierdzono, że zmniejszenie entropii informacji sieci monitoringu na skutek zmniejszenia liczby punktów pomiarowych było różne w różnych obszarach, co może być podstawą do zaproponowania modyfikacji programu monitoringu polegającej na dokładniejszym opomiarowaniu obszaru bardziej oddalonego od zapory, w zamian za zmniejszenie gęstości punktów pomiarowych w bezpośrednim obszarze zapory.

Ponieważ wskaźniki fizyczno-chemiczne wody pobranej z piezometrów były w dużym stopniu skorelowane ze sobą (współczynnik korelacji w wypadku substancji rozpuszczonych i chlorków wynosił 0,989), dlatego zaproponowano wykonywanie analizy chemicznej jednego wskaźnika, np. substancji rozpuszczonych w wodzie, zamiast analiz zawartości trzech jonów ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ). Zaoszczędzone w ten sposób nakłady finansowe można wykorzystać do przeprowadzenia innych oznaczeń fizyczno-chemicznych wody na obszarze zagrożonym zanieczyszczeniem.

*Badania zostały wykonane częściowo w ramach grantu Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej nr 503G/1116/0117/05.*

## LITERATURA

1. N.B. HARMANCIOGLU, N. ALPASLAN: Water quality monitoring network design: A problem of multi-objective decision making. *Water Resources Bulletin*, 1992, Vol. 28, No. 1, pp. 179–192.
2. N.B. HARMANCIOGLU, S.D. OZKUL: Entropy-based design considerations for water quality monitoring networks. In: N.B. Harmancioglu *et al.* [Eds.]: *Integrated Technologies for Environmental Monitoring and Information Production*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2003, pp. 119–138.
3. D.C. MAYS, B.A. FAYBISHENKO, S. FINSTERLE: Information entropy to measure temporal and spatial complexity of unsaturated flow in heterogeneous media. *Water Resources Research*, 2002, Vol. 38, No. 12, 1313, pp. 49.1–49.11.
4. Y. MOGHEIR, V.P. SINGH: Application of information theory to groundwater quality monitoring networks. *Water Resources Management*, 2002, Vol. 16, No. 1, pp. 37–49.
5. L.M. NUNES, M.C. CUHNA, L. RIBEIRO: Groundwater monitoring network optimization with redundancy reduction. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2004, Vol. 130, No. 1, pp. 33–43.
6. C.E. SHANNON, W. WEAVER: *The Mathematical Theory of Communication*. The University of Illinois Press, Urbana, Illinois, 1949.
7. A.M. JAGŁOM, I.M. JAGŁOM: *Prawdopodobieństwo i informacja*. Książka i Wiedza, Warszawa 1963.
8. S. SPECZIK, C. BACHOWSKI, A. MIZERA, A. GROTOWSKI: Stan aktualny i perspektywy gospodarki odpadami stałymi w KGHM Polska Miedź SA. *Warsztaty Górnicze z cyklu Zagrożenia naturalne w górnictwie*, Szklarska Poręba 2003, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2003.
9. *Ochrona Środowiska*. Biuletyn KGHM Polska Miedź SA, Oddział Hydrotechniczny, 1997–2000.
10. J. ZAWADZKI, M. KUCHAREK, W. TREICHEL: Modelowanie przestrzennego rozkładu stężeń jonów  $\text{Cl}^-$  w wodach podziemnych na przedpolu zbiornika odpadów poflotacyjnych „Żelazny Most”. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2004, t.7, nr 3–4, ss. 381–392.

### Kucharek, M., Treichel, W. Assessment of the Groundwater Quality Monitoring Network by the Information Entropy Method. *Ochrona Środowiska* 2006, Vol. 28, No. 3, pp. 45–49.

**Abstract:** With this method, the groundwater quality monitoring network is assessed in terms of the amount of information that can be supplied to the control system. If we assume that the monitoring network is a signal communication system capable of providing hydrological information, we can use the assessment criteria dealt with in the Shannon information theory. The fundamental criterion derived from this theory is the value of marginal information entropy calculated for each location of the sampling point. These values are assumed to be the measure of the amount of information included in the data. Furthermore, some variants are proposed of how to reduce the number of measuring points in the existing monitoring network. Our study involved the groundwater monitoring network serving a reservoir (called "Żelazny Most") which receives post-flotation contaminants originating in the course of copper ore treatment. The

reservoir has been classified as one of the world's largest industrial waste disposal site. The paper shows the results of physicochemical analysis of the groundwater from 132 piezometers located in the E forefield area. Samples were taken in the year 2000. The assessment of the network also included its density. The area under analysis was divided into three zones according to the distance from the barrage. The combination of spacing between the control points was analyzed in terms of the entropy value for each zone. The information entropy values were compared at each stage of reducing the number of the measuring points. A reliable assessment of the performance of the groundwater quality monitoring network will be of considerable help to environmentalists whose decisions about abating the environmental impact due to such industrial waste disposal sites must be based on dependable information.

**Keywords:** Information entropy, monitoring network, groundwater, industrial waste disposal.