

Dominika DĄBROWSKA, Marek SOŁTYSIAK*

WYKORZYSTANIE METOD STATYSTYCZNYCH DO OCENY ZMIAN JAKOŚCI WÓD PODZIEMNYCH

Zespół składowisk odpadów w Strzemieszycach (Dąbrowa Górnicza) obejmuje składowiska Huty Katowice, dwa składowiska odpadów komunalnych, składowisko odpadów koksowniczych oraz spalarnię odpadów. Składowiska te posiadają sieć monitoringową obejmującą czwartorzędowe i triasowe piętro wodonośne składającą się odpowiednio z 8 i 23 piezometrów. Niniejszy artykuł prezentuje zastosowanie metod statystycznych w wyznaczaniu trendów zmian jakości wód podziemnych w rejonie opisywanych składowisk na podstawie danych monitoringowych z lat 1991-2012.

1. WSTĘP

Składowiska odpadów stanowią potencjalne ogniska zanieczyszczeń wód podziemnych. Istotne jest prowadzenie rzetelnego monitoringu wód podziemnych w rejonie takich obiektów. Wiarygodne i reprezentatywne wyniki badań monitoringowych pozwalają wyznaczyć trendy zmian jakości wód, a tym samym określić negatywne oddziaływanie ognisk zanieczyszczeń bądź ocenić wpływ innych czynników, które pogarszają stan wód.

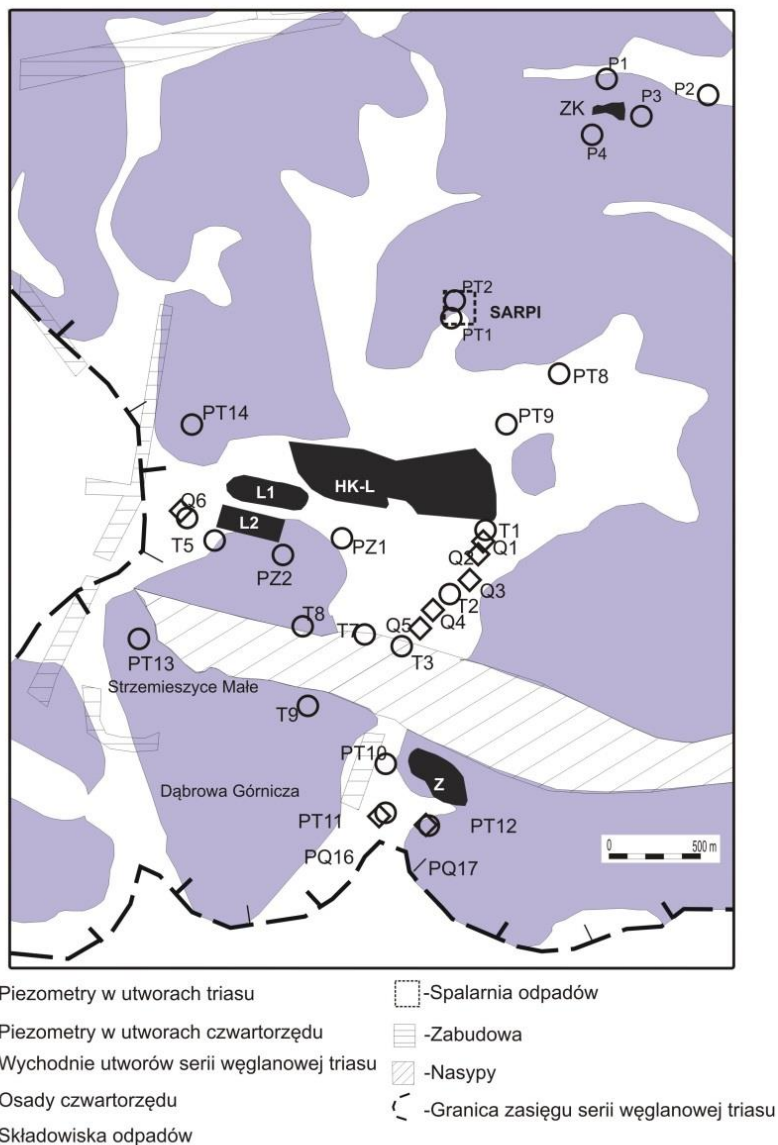
Do oceny zmian jakości wód podziemnych w rejonie zespołu składowisk odpadów w Strzemieszycach zastosowano statystyczną metodę wyznaczania trendów liniowych. Uzyskane wyniki pozwoliły na korelację zmian stężenia chlorków w wodach podziemnych z działalnością składowiska.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA SKŁADOWISK

W skład badanego zespołu składowisk odpadów w Strzemieszycach (Dąbrowa Górnicza) wchodzi: składowiska odpadów Huty Katowice – Lipówka i nieczynne składowisko

* Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec.

Zakawie, składowiska odpadów komunalnych Lipówka I oraz Lipówka II, składowisko Koksowni Przyjaźń i spalarnia odpadów SARPI - dawniej LOBBE (rys. 1).



Rys. 1. Lokalizacja obszaru badań na tle budowy geologicznej (HK-L – składowisko Huty Katowice Lipówka, L1 – Lipówka I, L2 – Lipówka II, Z – składowisko Zakawie, ZK – Zakłady Koksownicze)

Pierwsze ze składowisk powstały w roku 1985 (Lipówka oraz spalarnia). Na składowisku Lipówka deponowano odpady z Huty Katowice. Ze względu na brak uszczelnień podłoża, składowisko zostało zamknięte.

W roku 1987 uruchomiono produkcję mieszanek węglowych w Koksowni Przyjaźń. Wtedy też otwarto składowisko odpadów z tego obiektu.

W sąsiedztwie składowiska Lipówka, w roku 1992, powstało składowisko odpadów komunalnych Lipówka I. Składowisko to wyposażone jest w system drenażu wód gruntowych i asfaltobetonowe uszczelnienie podłoża [10]. W roku 2005 zostało otwarte kolejne składowisko odpadów komunalnych – Lipówka II pokryte od spodu folią PEHD i bentonitą.

Spalarnia odpadów LOBBE została przekształcona w roku 1994 w spółkę SARPI unieszkodliwiająca ponad 800 kategorii odpadów. W roku 2005 spółka stała się częścią francuskiego koncernu Veolia Environment.

3. BUDOWA GEOLOGICZNA I WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE

Zespół składowisk położony jest w północno-wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, w obrębie zachodniego fragmentu triasowej niecki błędowskiej, należącej do monokliny śląsko-krakowskiej [9]. Profil geologiczny stanowią utwory permu, triasu i czwartorzędu.

Trias reprezentowany jest przez utwory niższego i środkowego pstręgo piaskowca, utwory retu i lokalnie wapienia muszlowego. Pstry piaskowiec wykształcony jest w postaci zlepieńców, piasków, piaskowców, mułowców i ilowców. Ret na tym obszarze ma charakter dwudzielny: od spągu występują margle dolomityczne, dolomity margliste i wapień margliste. Górną część profilu stanowią dolomity i wapień o wyraźnym uławiceniu [1]. Wapień muszlowy tworzą utwory węglanowe wchodzące w skład warstw gogolińskich, dolomitów kruszczoonych i dolomitów diploporowych.

Osady czwartorzędu występują jedynie w obniżeniach terenu, zalegając na utworach węglanowych triasu lub na ilastych utworach pstręgo piaskowca. Utwory te stanowią pyły, gliny i piaski.

W rejonie opisywanego zespołu składowisk występują: piętro wodonośne czwartorzędu i triasu. Nieizolowane od powierzchni czwartorzędowe piętro wodonośne ma charakter nieciągły. Poziom wodonośny występuje w obrębie osadów fluwiogłacjalnych. Zasoby piętra czwartorzędowego są niewielkie. Miąższość utworów zawadzionych nie przekracza 6 m. Generalny przepływ wód podziemnych piętra czwartorzędowego odbywa się w kierunku południowym lub południowo-zachodnim, a podstawą zasilania jest infiltracja wód opadowych.

Triasowe piętro wodonośne tworzone jest przez poziomy wodonośny wapienia muszlowego, retu i pstręgo piaskowca. Pierwsze dwa poziomy tworzą kompleks wodonośny

serii węglanowej triasu [6]. Piętro to związane jest z dolomitami i wapieniami. Utwory te stanowią szczelinowo-krasowo-porowy typ ośrodka skalnego [4].

Pod względem regionalizacji hydrogeologicznych, opisywany obszar położony jest w obrębie Głównego Zbiornika Wód Podziemnych nr 454 Olkusz-Zawiercie [5]. Z uwagi na duże zagrożenie wód podziemnych na tym obszarze [7], opisywany zespół składowisk stanowi rzeczywiste ognisko zanieczyszczeń.

4. SIEĆ MONITORINGU JAKOŚCI WÓD PODZIEMNYCH

Monitoring wód podziemnych na opisywanym obszarze jest realizowany od roku 1988. W roku 1988 oraz 1991 odwiercono 14 piezometrów monitorujących składowisko odpadów przemysłowych Huty Katowice. Dwa lata później powstały kolejne cztery piezometry (PQ16, PQ17, PT11 oraz PT12). W roku 1994 utworzono piezometry PT8, PT9 i P10, a w 1997 piezometry PT13 i PT14.

Wg stanu na rok 2002 składowisko Lipówka I nie posiadało własnej sieci obserwacyjnej, a trzy piezometry stanowiące sieć obserwacyjną składowiska Lipówka II odwiercono w latach 1999-2002 (piezometry PZ1, PZ2, PZ3).

W latach 1998-2004 odwiercono sieć monitoringową wokół Koksowni Przyjaźń składającą się z 4 piezometrów (P1, P2, P3, P4). Do roku 2002 sieć obserwacyjna spalarni SARPI była złożona z dwóch punktów – PT1 i PT2 (rys. 1).

5. METODYKA

Wahania występujące w szeregach czasowych można oceniać za pomocą wskaźników indywidualnych lub zespołowych. Pojedyncze wskaźniki nie pozwalają jednak na ogólną ocenę opisywanego zjawiska w czasie, ale zastosowanie tylu wskaźników, ile okresów czasu w szeregu, pozwala na otrzymanie informacji o rozwoju badanego zjawiska.

Wyznaczanie trendów zmian zjawiska można wykonać za pomocą dwóch grup metod statystycznych – metod mechanicznych i analitycznych. W zakresie metod mechanicznych wyróżnia się metodę opartą na średniej ruchomej oraz metodę opartą na średniej podokresów. W zakresie metod analitycznych najpopularniejsza jest metoda najmniejszych kwadratów [3].

Zastosowanie średnich ruchomych w ocenie zmian jakości wód podziemnych jest łatwą w obliczeniach metodą pozwalającą na wyeliminowanie przypadkowych wahań, wygładzenie i określenie ogólnego trendu [2]. Bardziej skomplikowaną w obliczeniach jest metoda najmniejszych kwadratów. Metoda ta może być stosowana w różnych przypadkach w zależności od charakteru szeregu czasowego. Tendencję rozwojową można wy-

znaczać za pomocą prostej funkcji linowej, funkcji wykładniczej, funkcji parabolicznej lub funkcji hiperbolicznej. Każda z wymienionych funkcji przydatna jest w innym przypadku.

Na podstawie danych monitoringowych wyznaczono zmiany zawartości chlorków w wodach podziemnych piezometru PT1. W tym celu wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów dla funkcji liniowej. Zmienność zawartości chlorków w wodach tego piezometru kształtuje się niemal arytmetycznie, co pozwala na dokonanie obliczeń uproszczonych.

Na początku wyznaczono zmienne zależne (poszczególne wartości oznaczeń chlorków (y_i)) i zmienne niezależne (daty opróbowania – okresy (t_i)). Równanie prostej opisującej związek pomiędzy tymi zmiennymi, ma następującą postać:

$$\hat{y}_t = at + b \quad (1)$$

gdzie:

a – punkt przecięcia prostej z osią OY, oznacza okresowe tempo wzrostu ($a > 0$) lub ubytku ($a < 0$) wielkości badanego zjawiska,

b – oznacza stan zjawiska w okresie wyjściowym (dla $t = 0$).

Tak wyznaczona prosta powinna spełniać warunek minimum, tzn. suma kwadratów odchyłeń empirycznych wartości oznaczeń chlorków od wartości teoretycznych powinna stanowić minimum.

Wartości parametrów a oraz b zostały obliczone zgodnie z metodyką określania regresji prostoliniowej przy pomocy metody uproszczonej. Metoda ta określa poszczególne parametry przy założeniu, że okresy opróbowania zapisane są w formie odchylenia od średniej ($T_i = t_i - \bar{t}$). Tak zapisane poszczególne okresy pomiarów pozwalają na zastosowanie następujących wzorów:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{N} \quad (2)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n T_i y_i}{\sum_{i=1}^n T_i^2} \quad (3)$$

gdzie:

N – liczba okresów badań

6. WYNIKI

Powyższa metoda została wykorzystana w ocenie zmian jakości wód podziemnych w piezometrze PT1 ujmującym triasowe piętro wodonośne. Pod uwagę wzięto wyniki oznaczeń chlorków z lat 1991-2012. W każdym roku zawartość chlorków była oznaczana dwukrotnie. Wyjątek stanowi rok 2001, z którego wartości oznaczeń były mało wiarygodne i nie zostały uwzględnione w obliczeniach. Dane niezbędne do wyznaczenia trendu zmian zawartości chlorków przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Zawartość chlorków w wodach podziemnych w piezometrze PT1 w latach 1991-2012

| Rok | t_i | Zawartość Cl ⁻ [mg/dm ³] | T_i | T_i^2 | $T_i y_i$ | \hat{y}_i |
|------|-------|--|-------|---------|-----------|-------------|
| 1991 | 1 | 10,20 | -20,5 | 420,25 | -209,1 | 2,882481 |
| 1991 | 2 | 11,40 | -19,5 | 380,25 | -222,3 | 4,767214 |
| 1992 | 3 | 12,90 | -18,5 | 342,25 | -238,65 | 6,651948 |
| 1992 | 4 | 20,90 | -17,5 | 306,25 | -365,75 | 8,536682 |
| 1993 | 5 | 32,00 | -16,5 | 272,25 | -528 | 10,42142 |
| 1993 | 6 | 23,00 | -15,5 | 240,25 | -356,5 | 12,30615 |
| 1994 | 7 | 13,90 | -14,5 | 210,25 | -201,55 | 14,19088 |
| 1994 | 8 | 22,00 | -13,5 | 182,25 | -297 | 16,07562 |
| 1995 | 9 | 11,90 | -12,5 | 156,25 | -148,75 | 17,96035 |
| 1995 | 10 | 9,00 | -11,5 | 132,25 | -103,5 | 19,84508 |
| 1996 | 11 | 11,30 | -10,5 | 110,25 | -118,65 | 21,72982 |
| 1996 | 12 | 12,00 | -9,5 | 90,25 | -114 | 23,61455 |
| 1997 | 13 | 22,00 | -8,5 | 72,25 | -187 | 25,49929 |
| 1997 | 14 | 22,00 | -7,5 | 56,25 | -165 | 27,38402 |
| 1998 | 15 | 24,50 | -6,5 | 42,2 | -159,25 | 29,26875 |
| 1998 | 16 | 24,50 | -5,5 | 30,5 | -134,75 | 31,15349 |
| 1999 | 17 | 27,00 | -4,5 | 20,25 | -121,5 | 33,03822 |
| 1999 | 18 | 27,00 | -3,5 | 12,25 | -94,5 | 34,92296 |
| 2000 | 19 | 24,00 | -2,5 | 6,25 | -60 | 36,80769 |
| 2000 | 20 | 24,00 | -1,5 | 2,25 | -36 | 38,69242 |
| 2002 | 21 | 43,66 | -0,5 | 0,25 | -21,83 | 40,57716 |
| 2002 | 22 | 43,66 | 0,5 | 0,25 | 21,83 | 42,46189 |
| 2003 | 23 | 45,00 | 1,5 | 2,25 | 67,5 | 44,34662 |
| 2003 | 24 | 45,00 | 2,5 | 6,25 | 112,5 | 46,23136 |
| 2004 | 25 | 49,00 | 3,5 | 12,25 | 171,5 | 48,11609 |

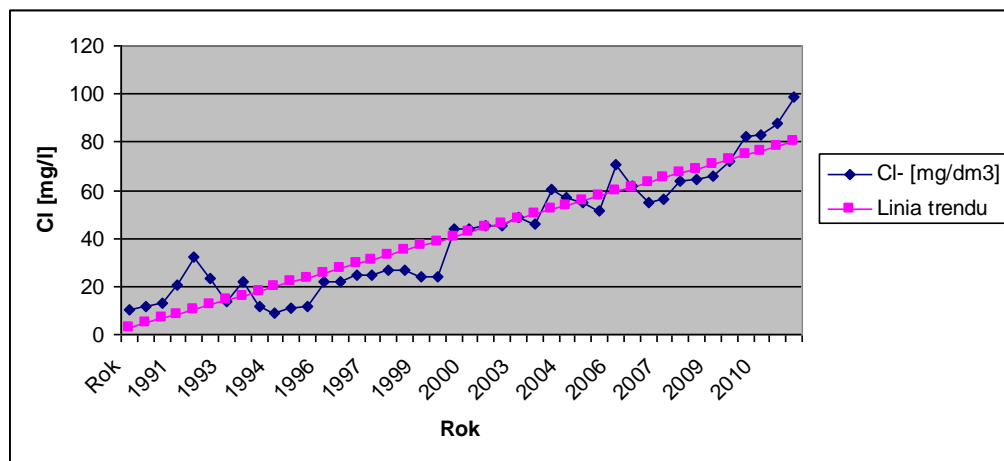
| | | | | | | |
|------|----|---------|------|---------|----------|----------|
| 2004 | 26 | 46,00 | 4,5 | 20,25 | 207 | 50,00083 |
| 2005 | 27 | 60,50 | 5,5 | 30,25 | 332,75 | 51,88556 |
| 2005 | 28 | 57,00 | 6,5 | 42,25 | 370,5 | 53,77029 |
| 2006 | 29 | 55,00 | 7,5 | 56,25 | 412,5 | 55,65503 |
| 2006 | 30 | 51,50 | 8,5 | 72,25 | 437,75 | 57,53976 |
| 2007 | 31 | 70,50 | 9,5 | 90,25 | 669,75 | 59,4245 |
| 2007 | 32 | 62,00 | 10,5 | 110,25 | 651 | 61,30923 |
| 2008 | 33 | 55,00 | 11,5 | 132,25 | 632,5 | 63,19396 |
| 2008 | 34 | 56,00 | 12,5 | 156,25 | 700 | 65,0787 |
| 2009 | 35 | 64,00 | 13,5 | 182,25 | 864 | 66,96343 |
| 2009 | 36 | 64,50 | 14,5 | 210,25 | 935,25 | 68,84816 |
| 2010 | 37 | 66,00 | 15,5 | 240,25 | 1023 | 70,7329 |
| 2010 | 38 | 72,00 | 16,5 | 272,25 | 1188 | 72,61763 |
| 2011 | 39 | 82,00 | 17,5 | 306,25 | 1435 | 74,50237 |
| 2011 | 40 | 83,00 | 18,5 | 342,25 | 1535,5 | 76,3871 |
| 2012 | 41 | 88,00 | 19,5 | 380,25 | 1716 | 78,27183 |
| 2012 | 42 | 99,00 | 20,5 | 420,25 | 2029,5 | 80,15657 |
| Suma | | 1743,82 | | 6170,50 | 11629,75 | |

Równanie linii trendu opisującego zawartość chlorków w wodach podziemnych tego piezometru ma postać:

$$\hat{y}_t = 0,99 + 1,88t \quad (4)$$

Na podstawie obliczeń trendu zmian jakości wód podziemnych w piezometrze PT1 wykonano wykres obrazujący dopasowanie linii trendu do rzeczywistych wyników oznaczeń chemicznych (rys. 2).

Określony w ten sposób trend zawartości chlorków w wodach podziemnych obrazuje spełniające warunek minimum dopasowanie liniowe krzywej do uzyskanych wyników. Obliczenia wskazują na ogólny rosnący trend zawartości chlorków w wodach podziemnych tego piezometru. Niewielkie wahania stężeń w pomiarach sąsiadujących są pomijane przy użyciu tej metody statystycznej.



Rys. 2. Trend zmian zawartości chlorków w wodach podziemnych piezometru T1

Analizując jednak zmiany stężenia chlorków w całym okresie badawczym, w przypadku opisywanego piezometru, w latach 1992-1994 obserwowano okresowy wzrost stężenia chlorków w wodach tego piętra, następnie w latach 1995-1996 spadek do poziomu z początku lat 90-tych. Widoczny jest również trend wzrostowy do ok. 25 mg Cl/dm³ (z kulminacją w 1993). W latach 2001/2002 uwidocznił się wyraźny trend wzrostowy do około 45 mg/dm³. Od roku 2008 odnotowano stały wzrost zawartości chlorków.

Zmienność stężeń Cl należy wiązać z działalnością składowiska – deponowaniem nowych odpadów oraz wymywaniem z nich substancji, w tym chlorków. Przykładowo, w badaniach lizymetrycznych z 1,2 m³ odpadów uzyskiwano odcieki o stężeniu Cl wynoszącym 2,2 g/dm³ [8]. Ulegają one szybkiemu wymywaniu, zaś intensywność procesu wymywania związana jest z opadami, jak i ilością deponowanego materiału. Przejście frontu chlorków w latach 1998-2004 przez utwory czwartorzędowe może być związane z rozpoczęciem w roku 1998 reeksploracji odpadów hutniczych zdeponowanych na składowisku.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wyznaczanie trendów w ocenie zmian jakości wód podziemnych jest bardzo przydatne w celu określenia zmian parametrów fizykochemicznych w czasie. Zastosowanie metod analitycznych pozwala na wyznaczenie trendu w przypadku różnych szeregów czasowych.

Ocena stanu chemicznego wód podziemnych metodami matematycznymi powinna uwzględniać jednak budowę geologiczną i warunki hydrogeologiczne badanej jednostki. Metody statystyczne przy ocenie zmian jakości wód podziemnych stanowią cenne narzędzie w pracy hydrogeologa pod warunkiem, że uwzględni się czynniki zewnętrzne mogące zaburzać trend zmian składu chemicznego, jak np. powstawanie nowych ognisk zanieczyszczeń, wahania wielkości infiltracji, zmiany stosunków wodnych, rekultywacja.

W przypadku wód z piezometru PT1 uwidocznił się wpływ składowiska odpadów hutniczych Lipówka – wykazały to podwyższone w stosunku do wartości tła stężenia m.in. chlorków. W latach 1992-2004 w wodach ujmowanych piezometrem PT1 zaobserwowano podwyższanie się stężeń chlorków. Zmiany składu chemicznego wód podziemnych należy wiązać z działalnością składowiska – deponowaniem nowych odpadów oraz wymywaniem z nich substancji przenikających wraz z przesączającą się wodą do strefy saturacji.

Metody analityczne, w tym wyznaczanie trendu za pomocą prostej funkcji liniowej, pozwalają na uogólnienie wyników badań i ewentualne odrzucenie mało wiarygodnych wyników oznaczeń chemicznych.

LITERATURA

- [1] ALEKSANDROWICZ S., ALEKSANDROWICZ Z., *Utwory triasowe w okolicach Strzemieszyc i Sławkowa*, [w:] Materiały do geologii obszaru śląsko-krakowskiego T. V., Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 1960, 95–171.
- [2] DĄBROWSKA D., SOŁTYSIAK M., *Mathematical assessing of the groundwater quality: a case study from Lipówka landfill*, Acta Geographica Silesiana, 2014, No. 17, 11–15.
- [3] KRZYSZTOFIAK M., URBANEK D., *Metody statystyczne*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1978, 361–380.
- [4] RÓŻKOWSKI A., *Szczelinowo-krasowe zbiorniki wód podziemnych Monokliny Śląsko- Krakowskiej i problemy ich ochrony*, Wydawnictwo SGGW-AR, Warszawa 1990.
- [5] RÓŻKOWSKI A., *Historia badań i stan rozpoznania hydrogeologicznego Górnośląskiego Zagłębia Węglowego i obszarów przyległych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2008, 87–95.
- [6] RÓŻKOWSKI A., RUDZIŃSKA T., SIEMIŃSKI A., *Mapa warunków występowania, użytkowania, zagrożenia i ochrony zwykłych wód podziemnych GZW i jego obrzeżenia*, 1: 100 000, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1997.
- [7] RÓŻKOWSKI A., SIEMIŃSKI A., *Mapa ognisk zanieczyszczeń wód podziemnych GZW i jego obrzeżenia*, 1: 100 000, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1995.
- [8] SOŁTYSIAK M., *Skład chemiczny i jakość wód podziemnych w rejonie składowisk odpadów Huty Katowice w świetle wyników badań monitoringowych*, Praca doktorska, archiwum WnoZ UŚ, Sosnowiec 2007.
- [9] STUPNICKA E., *Geologia regionalna Polski*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2007, 111–117.
- [10] <http://www.dabrowa.alba.com.pl>.

DETERMINING TRENDS OF GROUNDWATER QUALITY: A CASE STUDY FROM THE SYSTEM OF LANDFILLS IN STRZEMIESZYCE

The system of landfills in Strzemieszyce (Dąbrowa Górnicza) consists of two landfills, the iron landfill, the landfill of the coking plant and the waste incineration plant. These landfills have got a groundwater monitoring network of Quaternary and Triassic aquifers.

This paper presents the use of statistical methods in determining trends of groundwater quality in the region of described landfills based on monitoring data from the years 1991 to 2012.