

OCENA ZANIECZYSZCZENIA WYBRANYMI METALAMI I METALOIDAMI OSADÓW DENNYCH RZeki STOŁY NA TERENIE MIEJSKO-PRZEMYSŁOWYM TARNOWSKICH GÓR

ASSESSMENT OF CONTAMINATION OF THE BOTTOM SEDIMENTS OF THE STOŁA RIVER WITH SELECTED METALS AND METALLOIDS WITHIN THE URBAN-INDUSTRIAL AREA OF TARNOWSKIE GÓRY

HANNA RUBIN¹, KRYSZTYN RUBIN¹, ALEKSANDRA SIODŁAK², PIOTR SKUZA³

Abstrakt. Badania zawartości wybranych metali i metaloidów w osadach dennych rzeki Stoły przeprowadzono dla próbek pobranych na obszarze silnie zurbanizowanym i uprzemysłowionym miasta Tarnowskie Góry, który co najmniej od XIII wieku poddawany jest intensywnej antropopresji. Oznaczenie całkowitej zawartości badanych składników we frakcji pyłowo-iłowej osadów ($< 0,063$ mm), pozwoliło określić wartości indeksów geoakumulacji i na tej podstawie ocenić ich zanieczyszczenie. Bardzo silne i silne zanieczyszczenie osadów stwierdzano najczęściej dla kadmu, ołowiu, cynku i rtęci. Pod względem zawartości chromu i niklu osady nie są zanieczyszczone, natomiast zawartości arsenu i boru wskazują na zróżnicowany stopień zanieczyszczenia.

Słowa kluczowe: osady denne rzeki, zanieczyszczenie, metale i metaloidy, Tarnowskie Góry.

Abstract. Studies into the contents of selected metals and metalloids in the bottom sediments of the Stoła River were based on samples collected within strongly urbanized and industrialized town of Tarnowskie Góry, which has been under intensive anthropopressure since the 13th century. Determination of the total contents of the components in the silt-clay fraction of the bottom sediments (< 0.063 mm) made it possible to calculate the value of the geoaccumulation indexes and to assess their contamination. Very strong and strong contamination levels of the sediments are mostly recorded for cadmium, lead, zinc and mercury. The sediments are not contaminated with chromium and nickel, while the arsenic and boron contents vary in the sediments.

Key words: river sediment, contamination, metals and metalloids, Tarnowskie Góry.

WSTĘP

Osady denne rzek, tworzące się na skutek osadzania zawieszin niesionych przez wody oraz erozji koryta, są odzwierciedleniem warunków geochemicznych zlewni, kształtowanych czynnikami zarówno naturalnymi, jak i antropogenicznymi. Występowanie podwyższonych zawartości pierwiastków śladowych w osadach dennych na obszarach zurbanizowanych i uprzemysłowionych jest w głównej mierze skutkiem działalności człowieka (Bojakowska, Soko-

łowska, 1998; Singh i in., 2002; Helios-Rybicka i in., 2005). Akumulacja zanieczyszczeń zachodzi szczególnie w najdrobniejszej, pyłowo-iłowej frakcji osadów dennych. Zanieczyszczone osady denne są potencjalnym ogniskiem zanieczyszczenia nie tylko dla środowiska wód powierzchniowych, ale także, w warunkach sprzyjających infiltracji tych wód, są zagrożeniem dla jakości wód podziemnych. Szczególnie dotyczy to obszarów płytkiego występowania wód

¹ Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec; e-mail: hanna.rubin@us.edu.pl

² Przedsiębiorstwo Projektowo-Budowlane Handlowo-Usługowe Euro-Eko-Pol, ul. Jana Heweliusza 21, 40-762 Katowice

³ Laboratorium Inżynierii Ładowej Labotest Sp. z o.o., ul. Lwowska 38, 40-397 Katowice

podziemnych w systemach szczelinowo-krasowych, o wysokiej podatności i możliwości migracji zanieczyszczeń. Obszarem badań był rejon Tarnowskich Gór, gdzie zlokalizowane są wychodnie szczelinowo-krasowego zbiornika wód podziemnych serii węglanowej triasu, w obrębie którego wydzielono dwa GZWP: 330 – Zbiornik Gliwice i 327 – Zbiornik Lubliniec–Myszków, stanowiące ważne źródło zaopatrzenia w wodę pitną mieszkańców NW części Górnego Śląska. Obszar Tarnowskich Gór położony jest w rejonie wododziału tych zbiorników, w strefie najwyższej ich ochrony (Kleczkowski, red., 1990), gdyż utwory wodonośne serii węglanowej triasu przykryte są tu jedynie utworami plejstocеныskimi, a w strefach dolin rzecznych również holocеныskimi. Miąższość tej pokrywy jest zmienna, lokalnie zredukowana do kilku metrów, a jej wykształcenie to głównie utwory piaszczysto-żwirowe z przewarstwieniami glin. Występujące w pokrywie plejstocеныskiej, nieciągłe poziomy wodonośne, związane z wodami powierzchniowymi, cechują się niską jakością wynikającą z oddziaływania dużej, wieloletniej antropopresji. Jak wykazały badania modelowe,

w obrębie poziomów plejstocеныskich dominuje przepływ pionowy, związany z przesączaniem się wód do poziomu wapienia muszlowego (Kowalczyk i in., 2003; Witkowski i in., 2005). Badania przepływu Stoły wykonane w sześciu profilach, prowadzone na potrzeby opracowania MhP, wykazały występowanie dwóch stref infiltracji wód rzeki (Kropka i in., 1998). Dotyczy to przekrojów pomiarowych w rejonie Strzybnicy, gdzie straty przepływu wynosiły odpowiednio 1,02 i 1,32 m³/min. W takiej sytuacji powstaje realne zagrożenie dla jakości wód podziemnych, nie tylko poziomów plejstocеныskich, ale też serii węglanowej triasu, związane z możliwością infiltrowania wód rzeki Stoły wraz z uruchomionymi z osadów dennych zanieczyszczeniami. Celem przeprowadzonych badań było ocena zanieczyszczenia wybranymi metalami i metaloidami osadów dennych rzeki Stoły na obszarze miejsko-przemysłowym Tarnowskich Gór, a tym samym rozpoznanie wielkości potencjalnego zagrożenia środowiskowego, w tym również wód podziemnych w tym rejonie.

CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ

Prezentowane wyniki dotyczą badań zawartości metali i metaloidów w osadach dennych rzeki Stoły, pobranych na obszarze miasta Tarnowskie Góry. Obszar ten poddawany jest silnej antropopresji od kilkuset lat, gdyż już w XIII–XIV wieku wydobywano tutaj w sposób przemysłowy srebrnonośne rudy Zn-Pb, występujące w dolomitach kruszczonośnych środkowego triasu, a także rudy żelaza. Rzeka Stoła rozpoczyna swój bieg w południowej części miasta Tarnowskie Góry, w dzielnicy Bobrowniki, następnie płynie w kierunku północnym, po opuszczeniu dzielnicy Lasowice, skręca na zachód w kierunku Strzybnicy i po przepłynięciu przez Boruszowice, Brynek, Tworóg, w Potępie dopływa do Małej Panwi. Badaniami objęto początkowy, najbardziej antropogenicznie zmieniony, odcinek przepływu rzeki Stoły od źródeł po ujście Pniowca (fig. 1). Monitoring jakości wód rzeki Stoły prowadzony w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska, w punkcie położonym w połowie badanego odcinka rzeki Stoły, w latach 2000–2006 wykazał silne zanieczyszczenie wód związkami organicznymi (maksymalna wartość CHZT_{Cr} wynosiła 2300 mgO₂/dm³), obserwowane są również wysokie zawartości jonu amonowego (maksymalnie 120 mg/dm³), fosforanów (maksymalnie 37 mg/dm³), oraz bakterii coli typu fekalnego (maksymalnie 46 000 000/100 ml). Powyższe wyniki świadczą o niezwykle wysokiej degradacji wód na skutek doprowadzania ścieków komunalnych. Poza zanieczyszczeniami organicznymi i biologicznymi, w wodach Stoły obserwuje się także wysokie stężenia metali i metaloidów, przekraczające wartości graniczne dla dobrego stanu chemicznego (Dz.U.Nr.162, Poz.1008, 2008, Dz.U.Nr.122, Poz.1018, 2009). Szczególnie dotyczy to kadmu, którego średnie stężenie wynosi 4,38 mg/dm³, (wartość graniczna – 1,5 mg/dm³),

boru – średnie stężenie 3,74 mg/dm³ (wartość graniczna – 2 mg/dm³), rtęci – średnie stężenie 0,46 mg/dm³ (wartość graniczna – 0,07 mg/dm³). W przypadku arsenu, ołowiu i niklu notowane są również stężenia powyżej wartości granicznych dla dobrego stanu chemicznego wód, jednakże średnie stężenia ich nie przekraczają.

Na badanym odcinku rzeki zinventaryzowano 20 miejsc zrzutu ścieków komunalnych, przemysłowych (w tym z szeregu zakładów należących do branży przemysłu ciężkiego i chemicznego) oraz wylotów kanalizacji deszczowej (fig. 1). Udział zrzucanych wód antropogenicznych w całkowitym przepływie Stoły jest przeważający, co potwierdza porównanie wielkości przepływu rzeki mierzonej w ramach monitoringu lokalnego w rejonie składowisk odpadów Zakładów Chemicznych z wielkością zrzucanych ścieków z oczyszczalni PWiK „Śródmieście”. Przykładowo oszacowano, wg pomiarów w sierpniu 2009 roku, że ścieki z tej oczyszczalni stanowiły ok. 65% objętości przepływu w punkcie monitoringu RS1 zlokalizowanym przed Zakładami Chemicznymi. Można przypuszczać, że dla początkowego odcinka rzeki udział wód antropogenicznych (głównie ścieków komunalnych) w całkowitym przepływie wód jest porównywalny lub większy.

Innym problemem jest dopływ do rzeki zanieczyszczonych wód podziemnych, szczególnie dotyczy to obszaru składowisk odpadów Zakładów Chemicznych „Tarnowskie Góry”. Z odpadów pozostałych po produkcji zlikwidowanych zakładów, składowanych bezpośrednio na powierzchni terenu lub wręcz wsypywanych do koryta Stoły, wymywana była przez ponad 70 lat cała gama zanieczyszczeń, w tym przede wszystkim: bor, bar, stront, cynk, miedź, arsen i inne metale ciężkie (Rubin, 1999; Rubin i in., 1999). Spowodowało

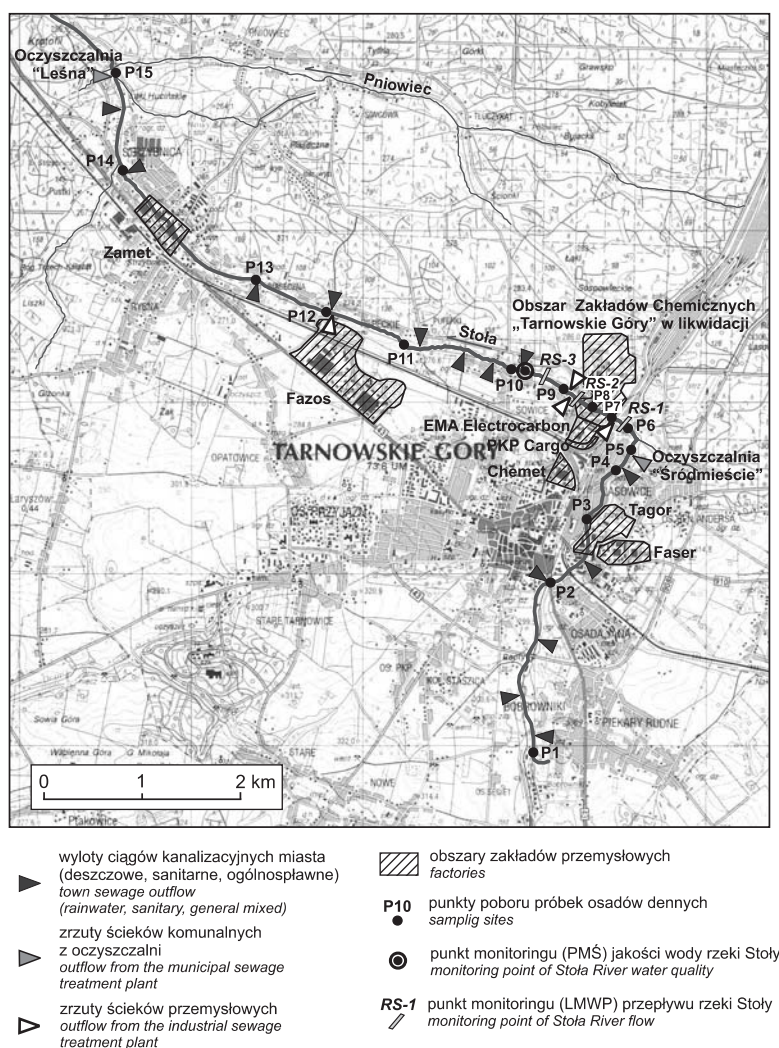


Fig. 1. Lokalizacja punktów poboru próbek osadów dennych Stoły

Location of the sites where samples of the bottom sediments of the Stoła River were collected

wało to znaczne zanieczyszczenie środowiska, w tym również wód podziemnych, a szczególnie poziomów wodonośnych plejstocenu, gdzie notowane są niezwykle wysokie zawartości składników rozpuszczonych (mineralizacja $> 3 \text{ g/dm}^3$), jak też wartości stężeń metali i metaloidów, w tym boru (240 mg/dm^3) jako składnika charakterystycznego dla zgromadzonych tu odpadów, ale też kadmu, arsenu, niklu, ołowiu (Rubin, Witkowski, 2003). Zanieczyszczone wody plejstocenijskiego poziomu wodonośnego są drenowane w tym rejonie przez Stołę, co potwierdzają wyniki comiesięcznych pomiarów przepływu wód prowadzone w ramach monitoringu lokalnego w trzech punktach RS-1, RS-2 i RS-3 (fig. 1). Według pomiarów wykonanych w 2008 roku, średni wzrost objętości przepływu pomiędzy sąsiadującymi punktami monitoringu wynosił odpowiednio $0,505$ i $0,580 \text{ m}^3/\text{min}$, natomiast pomiędzy skrajnymi punktami wynosił $1,085 \text{ m}^3/\text{min}$ (OBIKŚ, 2009).

Występowanie wysokich stężeń niektórych metali zarówno w wodach Stoły, jak i jej osadach, spowodowane jest również przez kilkusetletnią działalność górniczą (wydobycie rud Zn-Pb oraz Fe), która ułatwiła wietrzenie złóż

a tym samym wprowadzanie metali do środowiska. Na terenie dzisiejszych Tarnowskich Gór, praktycznie cały obszar przylegający do lewego brzegu Stoły był w XVII wieku rejonem płytkiej eksploatacji rud, a w wiekach następnych, wraz z rozwojem techniki wydobywczej, został udrożniony systemem sztolni odprowadzających wody do Stoły (Czaja, 2005). Efektem takiej działalności było uruchomienie i wprowadzenie do obiegu środowiskowego szeregu metali i ich akumulacja w osadach dennych.

Kolejnym impulsem do gromadzenia zanieczyszczeń w osadach dennych rzeki Stoły jest depozycja z atmosfery, związana głównie z industrializacją obszaru Tarnowskich Gór, szczególnie intensywnie postępującą od drugiej połowy XIX wieku. W początkowym okresie na tym obszarze rozwijany był przemysł hutniczy i chemiczny, a obecnie zlokalizowanych jest tu szereg zakładów przemysłu ciężkiego i chemicznego. Rozwój przemysłu przyczynił się do wzrostu zanieczyszczeń w atmosferze, które wraz z opadami i spływem powierzchniowym dostawały się do rzeki, a w konsekwencji do osadów.

POBÓR PRÓBEK I METODYKA BADAŃ

Opróbowanie osadów dennych rzeki Stoły przeprowadzono w 2010 roku na odcinku ok. 13 km, od jej początku po ujście Pniowca, czyli objęto badaniami blisko połowę całkowitej długości rzeki. Rozkład 15-tu punktów poboru próbek uzależniony był od położenia zinwentaryzowanych miejsc zrzutu ścieków, a odległość pomiędzy sąsiadującymi punktami poboru wynosiła od 0,25 do 2,2 km (fig. 1). Próbkę osadów pobierano za pomocą próbnika ręcznego (Soil Hand) firmy Eijkelkamp, pobór wykonywano z wierzchniej warstwy osadu, do głębokości 13 cm, a objętość pojedynczej próbki wynosiła 200 cm³. W każdym miejscu opróbowania pobierano pięć próbek z dna koryta rzeki, oraz pięć próbek ze strefy brzegowej, przeciwnej do nurtu, gdzie następuje osadzanie niesionej zawiesiny. Pobrane próbki były mieszane w celu sporządzenia uśrednionej próbki do badań. Dla uśrednionych próbek wykonano badanie składu uziarnienia (PKN-CEN ISO/TS 17892-4, 2009).

Badania zawartości wybranych metali i metaloidów w próbkach osadów przeprowadzono we frakcji pyłowo-iłowej

o średnicach ziaren < 0,063 mm (PN-EN ISO 14688-1; 2006). Z wysuszonych przez 24 godziny w temperaturze 105°C próbek osadów odsiano frakcję < 0,063 mm, którą roztarto w moździerzu agatowym. Rozkład próbek przeprowadzono techniką na mokro, z wykorzystaniem mikrofal.

Do 1 g próbki dodano 5 ml kwasu azotowego suprapur (Merck) i poddano działaniu mikrofal w czterech etapach, przez 6 minut każdy, w zakresach mocy: 250W, 400W, 650W, 250W. Rozłożone próbki uzupełniono do 100 ml wodą dejonizowaną, a roztwory poddano analizie w akredytowanym laboratorium, w zakresie zawartości 8 metali i metaloidów: As, B, Zn, Pb, Cd, Cr, Ni, Hg. Oznaczenia zawartości B, Zn, Pb, Cr, Ni wykonano metodą ICP-AES, oznaczenie zawartości As metodą ASA, z zastosowaniem generacji wodorków, natomiast oznaczenie zawartości Hg metodą ASA, techniką zimnych par.

WYNIKI I DYSKUSJA

Wyniki badań uziarnienia uśrednionych próbek osadów dennych Stoły, pobranych w 15. punktach opróbowania, wykazały duże zróżnicowanie zawartości poszczególnych frakcji. Zawartość najdrobniejszych frakcji pyłowo-iłowych (średnica ziaren < 0,063 mm) zmienia się w granicach od 0,4 do 23,5% wagowych. Generalnie ich zawartość w osadzie wzrasta wraz z biegiem rzeki, a szczególnie duży udział (> 20%) obserwowany jest w dwóch ostatnich próbkach (tab. 1).

Badanie zawartości metali i metaloidów przeprowadzono dla najdrobniejszych frakcji osadów, która wykazuje podwyższone zdolności kumulowania zanieczyszczeń, ze względu na występowanie procesów sorpcji fizykochemicznej i wymiany jonowej (Horowitz, 1991; Förstner, 2004). Zawartość metali i metaloidów we frakcji < 0,063 mm osadów dennych Stoły zmienia się w szerokich granicach i zależy od rodzaju oznaczanego składnika oraz lokalizacji pobranej próbki. Najwyższe zawartości stwierdzone zostały w przypadku cynku (1250–4130 mg/kg), ołowiu (270–4100 mg/kg) i boru (30–144 mg/kg) (tab. 1). Spośród oznaczanych metali i metaloidów największą zmiennością wartości charakteryzuje się ołów i cynk, a najniższą rtęć i kadm (tab. 1). Wzdłuż drogi przepływu obserwowana jest zróżnicowana zmienność zawartości badanych składników. Jednakże połowa z oznaczanych składników (As, B, Zn, Cd) maksymalne wartości wykazuje w próbce P9, pobranej poniżej rejonu składowisk Zakładów Chemicznych, co wskazuje na znaczny wpływ tego obszaru na zanieczyszczenie osadów dennych Stoły. Należy zwrócić uwagę, że niskie zawartości wszystkich badanych składników w punkcie P8, zlokalizowanym w centralnej części tego ogniska zanieczyszczenia, wynikają z prze-

prowadzonej w 2003 roku rewitalizacji tego odcinka rzeki, polegającej na przesunięciu koryta na teren wykonanego nasypu z nowego gruntu, o odpowiednich parametrach chemicznych.

Posłużono się wartościami wskaźników zanieczyszczenia CF, obliczanych jako stosunek zawartości metalu w osadzie dennym do tła geochemicznego (Hokanson, 1980), aby ocenić zanieczyszczenie osadów. Za wartości tła geochemicznego przyjmowana jest średnia zawartość pierwiastków w górnej części skorupy ziemskiej. Dla powyższych obliczeń przyjęto następujące wartości tła w mg/kg: As – 1,6; B – 12; Zn – 67; Pb – 17; Cd – 0,1; Cr – 69; Ni – 24; Hg – 0,08 (Li, Schoonmaker, 2003). Na podstawie wartości wskaźnika zanieczyszczenia ocenia się, czy osad jest wzbogacony w dany składnik z przyczyn naturalnych lub antropogenicznych, wtedy $CF > 1$, lub nie występuje wzbogacenie, wtedy $CF < 1$. W ocenie wielkości wskaźnika zanieczyszczenia stosuje się podział na cztery kategorie: niski wskaźnik zanieczyszczenia ($CF < 1$), umiarkowany wskaźnik zanieczyszczenia ($1 \leq CF < 3$), znaczny wskaźnik zanieczyszczenia ($3 \leq CF < 6$), bardzo wysoki wskaźnik zanieczyszczenia ($CF \geq 6$). Wartości obliczonych wskaźników zanieczyszczenia wskazują na następującą kolejność wzbogacenia osadów dennych dla oznaczanych metali i metaloidów: $Cd > Pb > Zn > Hg > As > B > Cr > Ni$ (tab. 2).

Kadm, ołów i cynk wykazują najwyższe wartości wskaźników zanieczyszczenia w pobranych próbkach osadów i jednocześnie kształtują się na znacznie wyższym poziomie niż wskaźniki dla pozostałych badanych składników. Minimalne wartości CF dla kadmu, ołowiu i cynku, przynajmniej od 2 do 10-krotnie, przekraczają wartość, powyżej której

Tabela 1

Zawartość frakcji pyłowo-iłowej (< 0,063 mm) i całkowitej zawartości metali i metaloidów w próbkach osadów dennych Stoły

Contents of silty-clay fraction (<0.063 mm) and total contents of metals and metalloids in the samples of the bottom sediments of the Stoła River

Próbka	Zawartość frakcji <0,063 mm [% wag.]	Składnik [mg/kg]							
		As	B	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	Hg
P1	2,8	30	75	3330	2100	26	89	41,7	0,175
P2	0,6	26	66	2440	1330	13	50	33,2	4,38
P3	0,8	9,8	30	1510	270	7,6	68	25,8	5,5
P4	2,9	26	55	4130	411	31	46	26,5	0,455
P5	1,4	24	83	2940	1230	19	135	121	4,75
P6	0,4	11	50	1250	443	5,6	41	60,1	6,13
P7	5,7	13	111	1680	363	13	68	47,4	1,88
P8	4,8	8,9	61	1400	339	6,2	35	32,2	1,75
P9	1,6	67	144	4030	2120	31	59	62,9	2,5
P10	2,8	23	47	2140	753	18	72	45,2	0,875
P11	5,6	43	75	3280	4100	22	72	52,8	1
P12	7,4	39	65	2710	2240	18	83	48,6	1,25
P13	7,4	66	75	3870	2200	25	140	69,2	1,1
P14	20,9	33	57	2300	1020	19	93	42,9	1,15
P15	23,5	22	45	1650	792	12	69	33,1	0,35
Min	0,4	8,9	30	1250	270	5,6	35	25,8	0,175
Maks	23,5	67	144	4130	4100	31	140	121	6,13
Średnia	5,9	29,4	69,3	2577	1314	17,8	74,7	49,5	2,2
Odch. stand.	7	18	28	981	1065	8	31	24	2

określa się, że wskaźnik zanieczyszczenia jest bardzo wysoki. Taka charakterystyka wskazuje, że wzbogacenie osadów dennych w te metale może w znacznej mierze wynikać z wietrzenia złóż cynkowo-ołowiowych udostępnionych historycznymi robotami górniczymi. Jest to rejon obserwowanej anomalii geochemicznej tych metali, szczególnie w biegu Stoły, poniżej obszaru badań, której występowanie wynika z nałożenia się czynników naturalnych i antropogenicznych związanych z przeróbką rud Zn-Pb (Lis, Pasieczna, 1995).

W przypadku arsenu wartości CF we wszystkich punktach klasyfikowane są jako bardzo wysokie. Jedynie w punkcie P8 wskaźnik jest charakteryzowany jako znaczny, co wynika z przeprowadzonych prac rewitalizacyjnych na tym odcinku rzeki. Zmienność wartości CF dla arsenu, obserwowana wzdłuż drogi przepływu Stoły, wykazuje znaczny wzrost poziomu wzbogacenia osadów tym metaloidem w punktach opróbowania poniżej obszaru Zakładów Chemicznych (fig. 2). Taka zmienność wskazuje, że odpady tu składowane są przyczyną zanieczyszczenia osadów dennych arsenem.

W przypadku boru obliczone wskaźniki zanieczyszczenia wykazują wartości kwalifikujące je przeważnie jako znaczne (dla 8 próbek) lub bardzo wysokie (dla 6 próbek), tylko jedna

wartość CF jest umiarkowana (tab. 2). Zmienność wartości wskaźników zanieczyszczenia dla boru nie wykazuje zauważalnego trendu, ulegają one wahaniom na całym badanym obszarze przepływu. Przy czym wartość maksymalna boru stwierdzona jest w punkcie opróbowania poniżej Zakładów Chemicznych, których składowiska odpadów zawierają niezwykle duże zawartości tego składnika (fig. 2).

Wartości wskaźnika zanieczyszczenia rtęcią dla badanych osadów należą przeważnie do bardzo dużych (tab. 2), a ich zmienność wskazuje na niezwykle wysoki poziom nagromadzenia tego składnika w osadach początkowego odcinka rzeki (fig. 2).

W przypadku chromu i niklu stwierdza się przeważnie niskie wartości wskaźnika zanieczyszczenia, bądź lokalnie wartości umiarkowane.

Do oceny zanieczyszczenia badanych osadów zastosowano również indeks geoakumulacji obliczany na podstawie formuły Müllera (1969): $I_{geo} = \log_2(C_n/1,5B_n)$, gdzie C_n to zmierzona koncentracja metalu, B_n to średnia zawartość pierwiastka w górnej części skorupy ziemskiej, współczynnik 1,5 służy do uwzględnienia naturalnej zmienności litologicznej zlewni. Na podstawie wartości indeksu geoakumulacji

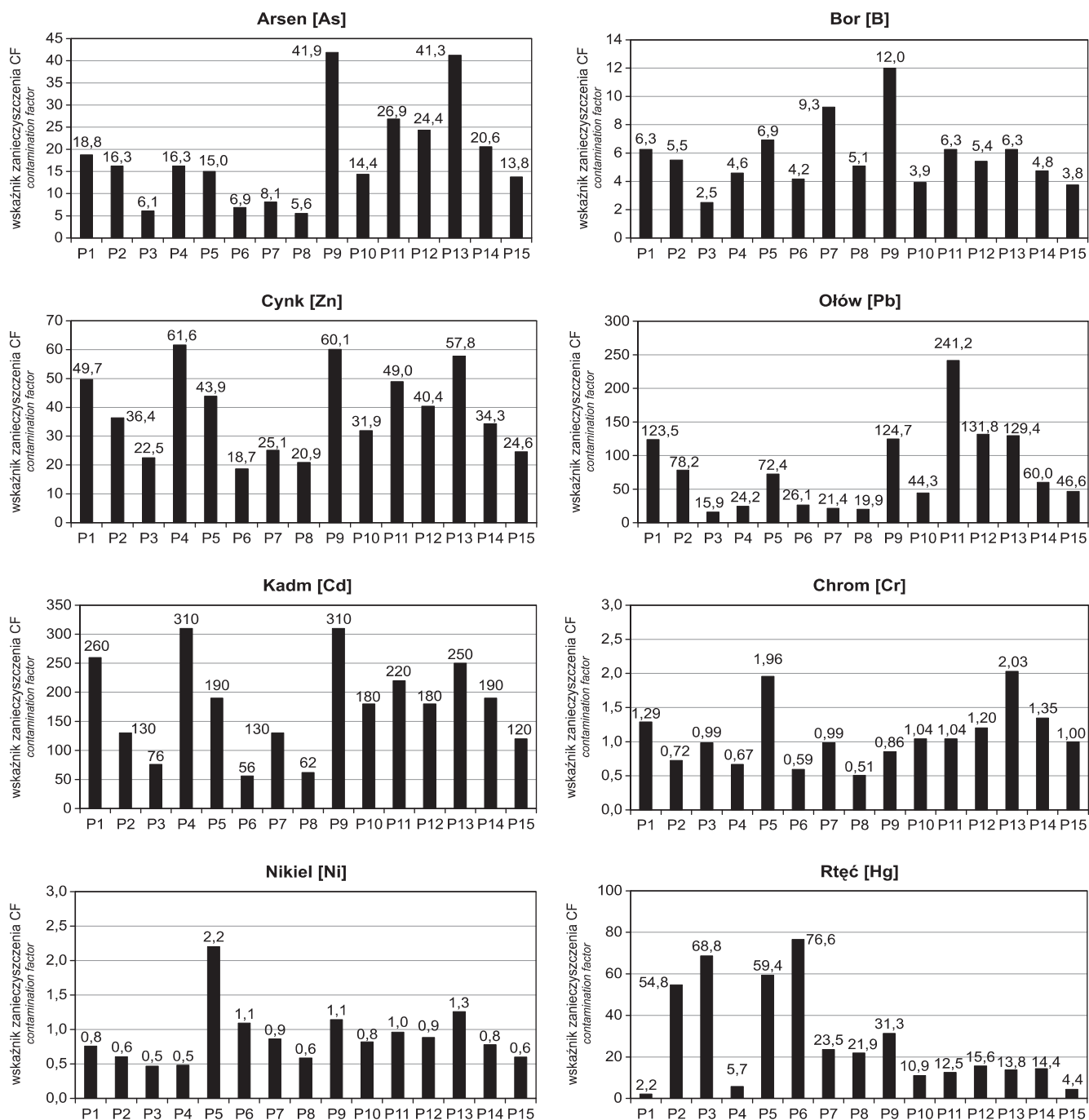


Fig. 2. Zmienność wskaźników zanieczyszczenia metalami i metalloidami w punktach poboru próbek osadów dennych Stoły (frakcja ziarnowa < 0,063 mm)

Variability of the contamination factors of metals and metalloids in the samples of the bottom sediments of the Stoła River (grain fraction < 0.063 mm)

Tabela 2

Wskaźniki zanieczyszczenia dla metali i metaloidów w osadach dennych rzeki Stoły

Contamination factors for metals and metalloids in the bottom sediments of the Stoła River

Próbka	Wskaźnik zanieczyszczenia CF							
	As	B	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	Hg
P1	18,8	6,3	49,7	123,5	260,0	1,29	0,8	2,2
P2	16,3	5,5	36,4	78,2	130,0	0,72	0,6	54,8
P3	6,1	2,5	22,5	15,9	76,0	0,99	0,5	68,8
P4	16,3	4,6	61,6	24,2	310,0	0,67	0,5	5,7
P5	15,0	6,9	43,9	72,4	190,0	1,96	2,2	59,4
P6	6,9	4,2	18,7	26,1	56,0	0,59	1,1	76,6
P7	8,1	9,3	25,1	21,4	130,0	0,99	0,9	23,5
P8	5,6	5,1	20,9	19,9	62,0	0,51	0,6	21,9
P9	41,9	12,0	60,1	124,7	310,0	0,86	1,1	31,3
P10	14,4	3,9	31,9	44,3	180,0	1,04	0,8	10,9
P11	26,9	6,3	49,0	241,2	220,0	1,04	1,0	12,5
P12	24,4	5,4	40,4	131,8	180,0	1,20	0,9	15,6
P13	41,3	6,3	57,8	129,4	250,0	2,03	1,3	13,8
P14	20,6	4,8	34,3	60,0	190,0	1,35	0,8	14,4
P15	13,8	3,8	24,6	46,6	120,0	1,00	0,6	4,4
Min.	5,6	2,5	18,7	15,9	56,0	0,50	0,5	2,2
Maks.	41,9	12,0	61,6	241,2	310,0	2,00	2,2	76,6
Średnia	18,4	5,8	38,5	77,3	177,6	1,10	0,9	27,7

wyróżnia się sześć klas jakości osadów, od niezanieczyszczonych do bardzo silnie zanieczyszczonych (tab. 3).

Obliczone indeksy geoakumulacji oraz klasyfikację badanych osadów przedstawiono w tabeli 3. Bardzo silne i silne zanieczyszczenie osadów stwierdzano najczęściej dla kadmu, ołowiu, cynku i rtęci. Obliczone wartości I_{geo} wskazują, że w przypadku kadmu maksymalna zawartość w osadach przekracza ponad 300 razy wartość przyjętą jako tłową ($1,5B_n$), ołowiu – 240 razy, cynku i rtęci – ok. 70 razy. Pod względem zawartości chromu i niklu osady są niezanieczyszczone, natomiast zawartości arsenu i boru wskazują na zróżnicowany stopień zanieczyszczenia. Przy czym wartości I_{geo} dla arsenu wskazują, że maksymalna zawartość w osadach przekracza 42 razy wartość tłową, a boru – 12 razy.

Występowanie podwyższonych stężeń oznaczanych metali i metaloidów w osadach dennych Stoły na obszarze Tarnowskich Gór jest w głównej mierze spowodowane odprowadzaniem ścieków komunalnych i przemysłowych do rzeki oraz dostawianiem się odcieków oraz zanieczyszczonych wód podziemnych z rejonu składowisk odpadów Zakładów Chemicznych „Tarnowskie Góry”. Znaczący udział może mieć także kilkusetletnia działalność górnicza (wydobywanie rud Zn-Pb oraz Fe), która ułatwiła wietrzenie złóż i wprowadzanie metali i metaloidów do środowiska. Również intensywny rozwój przemysłu przyczynił się do wzrostu zanieczyszczeń w atmosferze, które wraz z opadami i spływem powierzch-

niowym dostawały się do rzeki, a w konsekwencji do osadów dennych.

Wyniki opróbowania osadów dennych na odcinku przepływu rzeki Stoły przez miasto Tarnowskie Góry wykazały, że zawartość metali i metaloidów we frakcji pyłowo-iłowej osadów zmienia się w szerokich granicach i zależy od rodzaju oznaczanego składnika oraz lokalizacji pobranej próbki. Najwyższe zawartości stwierdzone zostały w przypadku cynku, ołowiu i boru. Zmienność zawartości badanych składników wzdłuż drogi przepływu jest zróżnicowana, jednakże zaznacza się znaczny wpływ rejonu składowisk Zakładów Chemicznych na wzrost zanieczyszczenia osadów

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Występowanie podwyższonych stężeń oznaczanych metali i metaloidów w osadach dennych Stoły na obszarze Tarnowskich Gór jest w głównej mierze spowodowane odprowadzaniem ścieków komunalnych i przemysłowych do rzeki oraz dostawianiem się odcieków oraz zanieczyszczonych wód podziemnych z rejonu składowisk odpadów Zakładów Chemicznych „Tarnowskie Góry”. Znaczący udział może mieć także kilkusetletnia działalność górnicza (wydobywanie rud Zn-Pb oraz Fe), która ułatwiła wietrzenie złóż i wprowadzanie metali i metaloidów do środowiska. Również intensywny rozwój przemysłu przyczynił się do wzrostu zanieczyszczeń w atmosferze, które wraz z opadami i spływem powierzch-

Tabela 3

Indeksy geoakumulacji dla metali i metaloidów w osadach dennych rzeki Stoły
 Geoaccumulation indexes for metals and metalloids in the bottom sediments of the Stoła River

Składnik	Indeks geoakumulacji I_{geo}														
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
As	3,64	3,44	2,03	3,44	3,32	2,20	2,44	1,89	4,80	3,26	4,16	4,02	4,78	3,78	3,20
B	2,06	1,87	0,74	1,61	2,21	1,47	2,62	1,76	3,00	1,38	2,06	1,85	2,06	1,66	1,32
Zn	5,05	4,60	3,91	5,36	4,87	3,64	4,06	3,80	5,33	4,41	5,03	4,75	5,27	4,52	4,04
Pb	6,36	5,70	3,40	4,01	5,59	4,12	3,83	3,73	6,38	4,88	7,33	6,46	6,43	5,32	4,96
Cd	7,44	6,44	5,66	7,69	6,98	5,22	6,44	5,37	7,69	6,91	7,20	6,91	7,38	6,98	6,32
Cr	-0,22	-1,05	-0,61	-1,17	0,38	-1,34	-0,61	-1,56	-0,81	-0,52	-0,52	-0,32	0,44	-0,15	-0,58
Ni	-0,98	-1,31	-1,68	-1,64	0,55	-0,46	-0,80	-1,36	-0,39	-0,87	-0,64	-0,76	-0,25	-0,94	-1,32
Hg	0,54	5,19	5,52	1,92	5,31	5,67	3,97	3,87	4,38	2,87	3,06	3,38	3,20	3,26	1,54

I_{geo}	
<0	klasa 0 – niezanieczyszczone; <i>class 0 – unpolluted</i>
>0–1	klasa 1 – niezanieczyszczone do umiarkowanie zanieczyszczone; <i>class 1 – from unpolluted to moderately polluted</i>
>1–2	klasa 2 – umiarkowanie zanieczyszczone; <i>class 2 – moderately polluted</i>
>2–3	klasa 3 – umiarkowanie do silnie zanieczyszczone; <i>class 3 – from moderately polluted to strongly polluted</i>
>3–4	klasa 4 – silnie zanieczyszczone; <i>class 4 – strongly polluted</i>
>4–5	klasa 5 – silnie do bardzo silnie zanieczyszczone; <i>class 5 – from strongly polluted to extremely polluted</i>
>5	klasa 6 – bardzo silnie zanieczyszczone; <i>class 6 – extremely polluted</i>

dennych Stoły. Do oceny stopnia zanieczyszczenia osadów dennych Stoły wykorzystano obliczone wartości wskaźników zanieczyszczenia CF i indeksów geoakumulacji I_{geo} . Bardzo silne i silne zanieczyszczenie osadów stwierdzano najczęściej dla kadmu, ołowiu, cynku i rtęci.

Badania zostały sfinansowane z projektu badawczego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr NN525 410535 pn.: „Wpływ terenów miejsko-przemysłowych na zasoby i eksploatację wód podziemnych na przykładzie miast Tarnowskie Góry i Tarnów”.

LITERATURA

- BOJAKOWSKA I., SOKOŁOWSKA G., 1998 — Geochemiczne klasy czystości osadów wodnych. *Prz. Geol.*, **46**, 1: 49–54.
- CZAJA S.W., 2005 — Zmiany powierzchniowej sieci hydrograficznej i reżimu odpływu wód na obszarze Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego. W: Hydrogeologia obszarów zurbanizowanych i uprzemysłowionych. 30 lat hydrogeologii w Uniwersytecie Śląskim (red. A.Kowalczyk, A.Rózkowski). *Pr. WNoZ UŚ*, **37**: 23–33.
- DZ.U.Nr 162, poz.1008, 2008 — Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych.
- DZ.U.Nr 122, poz.1018, 2009 — Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego jednolitych części wód powierzchniowych.
- FÖRSTNER U., 2004 — Traceability of sediment analysis. *Trends in Analytical Chemistry*, **23**, 3: 217–236.
- HELIOS-RYBICKA E., ADAMIEC E., ALEKSANDER-KWATERCZAK U., 2005 — Distribution of trace metals in the Odra River system: Water-suspended matter-sediments. *Limnologia*, **35**: 185–198.
- HOKANSON L., 1980 — Ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach. *Water Research*, **14**: 975–1001.
- HOROWITZ A.J., 1991 — A primer on sediment-trace element chemistry. 2 ed., Lewis Publishers, Chelsea, Michigan.

- KOWALCZYK A., LEWANDOWSKI J., RUBIN K., WITKOWSKI A.J., WOJTAŁ G., WRÓBEL J., 2003 — Badania symulacyjne migracji zanieczyszczeń w rejonie Tarnowskich Gór. Arch. ZBU „INTERGEO”.
- KLECZKOWSKI A.S.(red.), 1990 — Mapa obszarów głównych zbiorników wód podziemnych (GZWP) w Polsce wymagających szczególnej ochrony 1:500 000, z objaśnieniami. Publikacja CPBP 04.10 Inst.Hydr. i Geol.Inż.AGH Kraków.
- KROPKA J., KOWALCZYK A., RUBIN K., 1998 — Mapa Hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000. Arkusz Bytom (910). Objaśnienia. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- LIS J., PASIECZNA A., 1995 — Atlas geochemiczny górnego Śląska 1:200 000. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- LI Y.H., SCHOONMAKER J.E., 2003 — Chemical composition and mineralogy of marine sediments. In: Sediments, Diagenesis, and Sedimentary Rocks (red. F.T.Mackenzie). Vol.7 Treatise on Geochemistry (red. H.D.Holland, K.K.Turekian), Elsevier-Per-gamon, Oxford.
- MÜLLER G., 1969 — Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2:108–118.
- OBIKŚ, 2009 — Monitoring środowiska w 2008 roku w rejonie Zakładów Chemicznych „Tarnowskie Góry” w Tarnowskich Górach. Arch. Starostwa Powiatowego w Tarnowskich Górach.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-4, 2009 — Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 4: Oznaczanie składu granulometrycznego.
- PN-EN ISO 14688-1, 2006 — Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis.
- RUBIN H., 1999 — Zastosowanie testów wymywalności zanieczyszczeń z odpadów do oceny zagrożenia wód podziemnych w rejonie składowisk Zakładów Chemicznych „Tarnowskie Góry”. Arch. WNoZ UŚ. Praca doktorska.
- RUBIN K., RUBIN H., KOWALCZYK A., 1999 — Zagrożenie jakości wód podziemnych serii węglanowej triasu w rejonie Zakładów Chemicznych w Tarnowskich Górach. *W: Współczesne Problemy Hydrogeologii*, t. 9: 324–328. Kielce.
- RUBIN H., WITKOWSKI A.J., 2003 — Wpływ składowania odpadów z Zakładów Chemicznych w Tarnowskich Górach na wody podziemne w świetle wyników badań monitoringowych. *W: Współczesne Problemy Hydrogeologii*, t. 11: 461–468. Gdańsk.
- SINGH M., MÜLLER G., SINGH I.B., 2002 — Heavy metals in freshly deposited stream sediments of rivers associated with urbanization of the Ganga Plain, India. *Water, Air and Soil Pollution*, 141: 35–54.
- WITKOWSKI A.J., KOWALCZYK A., RUBIN H., RUBIN K., 2005 — Chemical waste disposal site as a source of groundwater contamination in the multi-aquifer system of Upper Silesia Poland. *Slovak Geol. Mag.*, 11, 4: 211–217.

SUMMARY

Studies on the contents of selected metals and metalloids in the bottom sediments of the Stoła River were based on samples collected within the urbanized and industrialized area of Tarnowskie Góry. Over a few centuries, this area has been under strong anthropopressure. Initially, it was related to the extraction of silver-bearing zinc and lead ores as well as iron ore mining. This was followed by the development of metallurgical and chemical industries. Presently there are a number of heavy industry and chemical plants here. Contamination of the Stoła River waters is mainly the result of input of municipal and industrial wastes as well as recharge with contaminated groundwater drained from the landfill areas. Considerable proportion of contamination may also be associated with the mining industry (extraction of zinc, lead and iron ores) as it enables the metal-bearing deposits to be weathered and thus introduce metals and metalloids into the environment. Quality monitoring of the Stoła River water, conducted in 2000–2006, indicates strong contamination with organic compounds (max. COD_{Cr} is $2300\text{mgO}_2/\text{dm}^3$). Moreover, there are high contents of ammonia (max. $120\text{ mg}/\text{dm}^3$) and phosphates (max. $37\text{ mg}/\text{dm}^3$). Fecal contamination with bacteria *E. coli* was also recorded (max. $46000000/100\text{ ml}$). Such results indicate a considerably high level of degradation stemming from input of municipal waste. Apart from organic and biological contamination the river water also contains high concentrations of metals and metalloids: cadmium ($4.38\text{ mg}/\text{dm}^3$ on average), boron ($3.74\text{ mg}/\text{dm}^3$ on

average) and mercury ($0.46\text{ mg}/\text{dm}^3$ on average). The consequence of the river water contamination is accumulation of contaminants in the bottom sediments. This includes metals and metalloids. Sampling of the river sediments was conducted along a 13-km section of the Stoła River at 15 sites within the town of Tarnowskie Góry. Total contents of As, B, Zn, Pb, Cd, Cr, Ni, Hg was based on silt-clay fraction of the grain diameter $<0.063\text{ mm}$. The samples were treated with concentrated nitric acid and decomposed in a microwave mineraliser. Measurement of concentration of metals and metalloids was based on the ICP-AES and ASA methods. Contents of metals and metalloids in this fraction change significantly in relation to the type of a given component and the location of a given sample. The highest contents were recorded for zinc ($1250\text{--}4130\text{ mg}/\text{kg}$), lead ($270\text{--}4100\text{ mg}/\text{kg}$) and boron ($30\text{--}144\text{ mg}/\text{kg}$). Variability in the contents of these studied components along the river course is diverse. However, the highest concentrations of As, B, Zn and Cd are recorded in the sample collected below the industrial waste site of the Chemical Plant. This area significantly influences contamination of the bottom sediments of the Stoła River. In order to assess the contamination of the sediments, geoaccumulation indexes were calculated. Strong and very strong contamination of the sediments was recorded for cadmium, lead, zinc and mercury. The sediments are not contaminated with chromium and nickel, while the contents of arsenic and boron indicate a variable level of contamination.

