

**METALE CIĘŻKIE
W WODZIE I OSADACH DENNYCH
ZBIORNIKA W KOZŁOWEJ GÓRZE
NA GÓRNYM ŚLĄSKU**

**STEFANIA RYBORZ-MASŁOWSKA,
KATARZYNA MORACZEWSKA-MAJKUT, JÓZEFA KRAJEWSKA**

Instytut Ekologii Terenów Przemysłowych, ul. Kossutha 6, 40-833 Katowice

Keywords: heavy metals, water and sediment contamination, speciation.

**HEAVY METALS IN WATER AND BOTTOM SEDIMENTS
OF THE KOZŁOWA GÓRA WATER RESERVOIR,
UPPER SILESIA**

Study on water and bottom sediment quality of the Kozłowa Góra drinking water reservoir in Silesian province was carried out. Heavy metal concentrations in water body and bottom sediment of the reservoir were determined. Water quality assessment was performed by comparing concentration of heavy metals to standards for I class water quality. The degree of sediment contamination was carried out by calculating cumulation coefficient: sediment/water and sediment/geochemical background. Present water and sediment contamination in the reservoir was compared with the state 20 years ago, which was a period of intensive metallurgical industry development in this region. At the same time, heavy metals speciation in sediment for those of high rate accumulation: Zn, Pb and Cd was determined. The results of heavy metal speciation in sediment provided a basis to secondary water pollution assessment, due to migration of these metals to water body.

Streszczenie

Przeprowadzono badania wód oraz osadów dennych zbiornika w Kozłowej Górze, w województwie śląskim, będącego źródłem wody pitnej. Oznaczano stężenia metali ciężkich w toni wodnej oraz w osadach dennych. Ocenę poziomu zanieczyszczenia wody metalami ciężkimi przeprowadzono, porównując ich stężenia do wymagań stawianych wodom o I klasie czystości. Stopień zanieczyszczenia osadów dennych oceniono, wyznaczając współczynniki kumulacji osad/woda i osad/tło geochemiczne. Aktualny stan zanieczyszczenia wód i osadów tego zbiornika porównano ze stanem sprzed lat dwudziestu, będących okresem intensywnego rozwoju przemysłu metalurgicznego w tym rejonie.

Równolegle przeprowadzono badania form wiązania metali wykazujących wysoki stopień akumulacji w osadach, tj. cynku (Zn), ołowiu (Pb) i kadmu (Cd). Na ich podstawie oceniono możliwość wtórnego zanieczyszczenia wód w wyniku uwalniania i migracji tych metali z osadów do toni wodnej.

WPROWADZENIE

W wodach powierzchniowych o typowym składzie fizyko-chemicznym metale ciężkie występują w postaci związków rozpuszczonych (jonowych i kompleksowych) oraz koloidów i zawiesin. Z punktu widzenia skutków biologicznych większe znaczenie mają formy rozpuszczalne [25]. Rozpuszczalne związki metali ciężkich, a więc łatwo dostępne dla organizmów i w związku z tym toksyczne, stanowią zwykle niewielki procent ich całkowitej zawartości w wodach. Dominują nierozpuszczalne w wodzie związki metali ciężkich, związane z zawiesinami pochodzenia organicznego i nieorganicznego, w tym wchodzące w skład żywego i martwego materiału biologicznego [6, 10, 22, 28].

W procesach samooczyszczania się wód powierzchniowych, w tym i obniżania stężeń metali ciężkich, istotne znaczenie odgrywają procesy sedymentacji [5, 6, 24, 25]. Procesy te powodują, iż stężenia metali ciężkich w osadach dennych są wielokrotnie wyższe niż w wodzie. Analiza chemiczna osadów stanowi przez to cenne źródło wiadomości o wcześniejszym i aktualnym stanie jakości środowiska wodnego [9, 10, 12, 13, 15, 23, 27, 28].

Metale nagromadzone w osadach dennych mogą stanowić źródło wtórnego zanieczyszczenia wód, jeśli zaistnieją warunki sprzyjające takim procesom, jak: obniżenie odczynu wody, zmiana potencjału utleniająco-redukcyjnego, wzrost zasolenia i stężeń związków kompleksujących metale [7, 19]. Bardzo cennych informacji o warunkach i możliwościach wtórnego zanieczyszczenia wód zbiornika dostarcza poznanie form chemicznych, w jakich metale się znajdują [1, 5, 7, 15, 17, 18, 20].

Formy wiązania metali z osadem, a zwłaszcza frakcje związane z osadem w sposób nietrwały, pozwalają określić potencjalne zagrożenie jakości wód. Należy podkreślić, że całkowita zawartość metali ciężkich w osadach jest wskaźnikiem zanieczyszczenia antropogenicznego środowiska wodnego, ale nie jest wystarczająca do oceny zagrożenia organizmów żywych.

CEL I ZAKRES BADAŃ

Badania miały na celu wyznaczenie poziomu zanieczyszczenia metalami ciężkimi wód i osadów dennych zbiornika wodnego w Kozłowej Górze oraz określenie możliwości wtórnego zanieczyszczenia wód w wyniku uwalniania metali ciężkich z osadów. Nawiązanie do badań zbiornika przeprowadzonych 20 lat temu pozwoliło na określenie trendów zachodzących zmian.

Zagadnienia podjęte w niniejszym artykule, dotyczące problemu zanieczyszczenia środowiska wodnego metalami ciężkimi, są ciągle aktualne w regionie Górnego Śląska. Jakość wód w zbiornikach stanowiących źródło zaopatrzenia dużej grupy ludności w wodę do picia wzbudza (ze względów zdrowotnych) szczególne zainteresowanie.

OBIEKT BADAŃ

Zbiornik zaporowy Kozłowa Góra o powierzchni 4,6 km², zwany również Jeziorem Świerklanieckim, powstał w okresie międzywojennym na 25 km rzeki Brynicy i zamyka on zlewnię o powierzchni 139 km² (Rys. 1). Jest on stosunkowo płytki — największa głębokość przy zaporze wynosi 6–8 m. Zasoby wody retencjonowanej w zbiorniku wynoszą średnio 17 800 tys. m³. Wody te wykorzystywane są do zaopatrzenia ludności okolicznych miast. Zbiornik położony jest w pobliżu ośrodków związanych z hutnictwem cynku, ołowiu i żelaza (Tarnowskie Góry, Piekary, Bytom, Miasteczko Śląskie). Zlokalizowany tu przemysł przez dziesiątki lat wywierał ujemny wpływ na środowisko, w tym i na zbiornik wody pitnej. Badania zbiornika prowadzone pod koniec lat 70. wykazały, że opad pyłowych zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego, zawierających metale ciężkie, był istotnym źródłem podwyższenia ich stężeń — głównie w osadach dennych zbiornika [4]. Należy podkreślić, że do zbiornika nie są doprowadzane ścieki przemysłowe (zawierające metale ciężkie). Zlewnia zbiornika i cieków zasilających zbiornik w przeważającej części ma charakter rolniczy lub leśny.

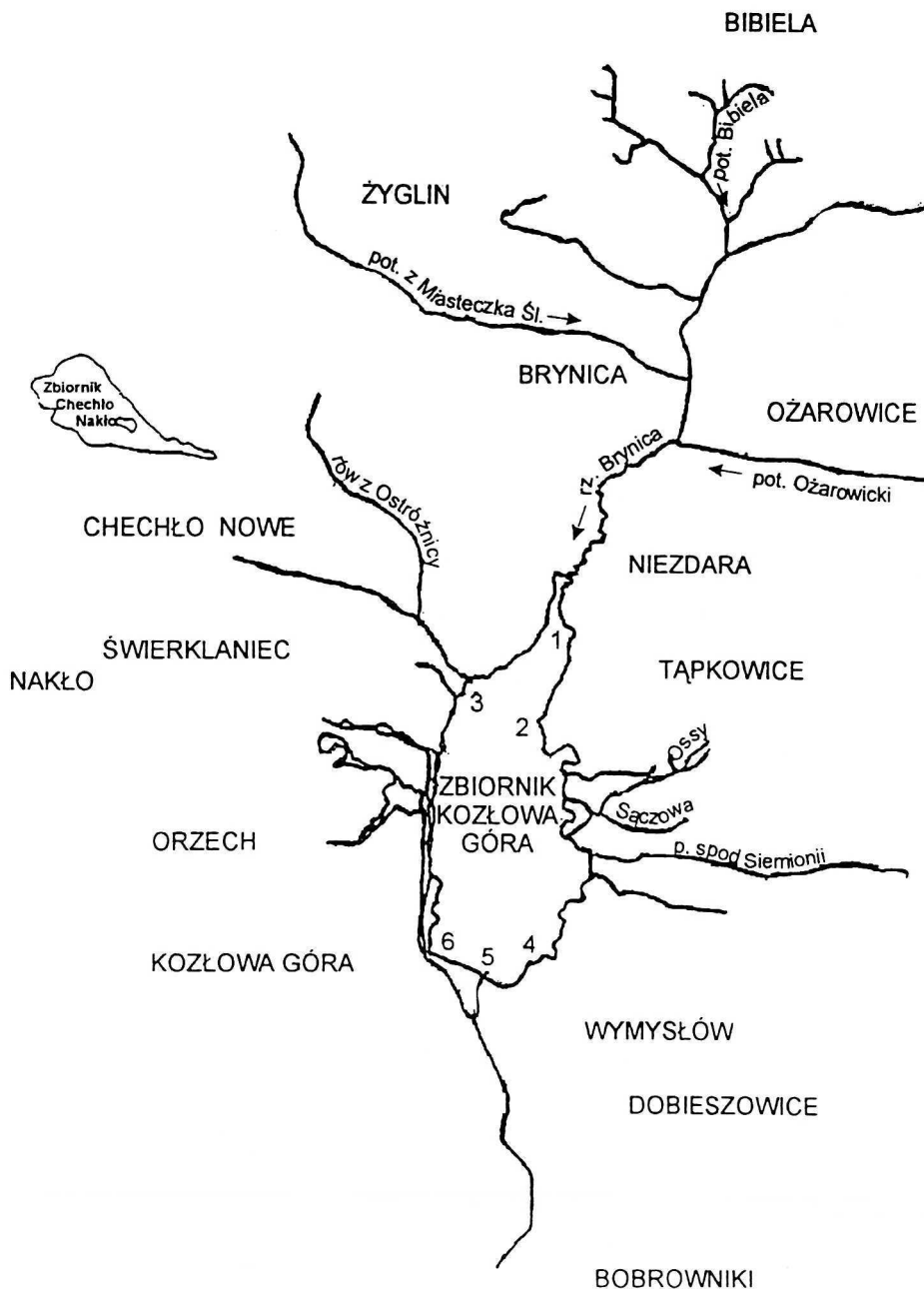
W wyniku likwidacji lub restrukturyzacji zakładów przetwarzających rudy cynkowo-ołowiowe i żelaza presja na zbiornik zmniejszyła się. Czy zmiany te znalazły odzwierciedlenie w poprawie jakości wody oraz osadów zbiornika? Znalezienie odpowiedzi na to pytanie było głównym celem badań, których wyniki prezentowane są w tej pracy.

STANOWISKA BADAWCZE I POBÓR PRÓBEK

Próbki wody i osadów dennych pobierano z 6 stanowisk usytuowanych we wlotowej oraz wylotowej części zbiornika (Rys. 1). W części wlotowej zbiornika stanowiska znajdowały się: w strefie środkowej — poniżej ujścia Brynicy (nr 1), przy lewym brzegu zbiornika (nr 2) i przy prawym brzegu — poniżej ujścia potoku z Ostróżnicy (nr 3). Przy wylocie ze zbiornika stanowiska usytuowane były również w środkowej części (nr 5), przy lewym brzegu (nr 4) i przy prawym (nr 6).

Próbki wód pobierano z warstwy powierzchniowej 7-krotnie, w okresie od czerwca do października 1996 roku. Osady denne z wierzchniej warstwy (0–3 cm) pobierano trzykrotnie: w czerwcu, lipcu i październiku 1996 roku.

MIASTECZKO ŚLĄSKIE



Rys.1. Stanowiska badawcze na zbiorniku Kozłowa Góra
 Location of sampling points in the Kozłowa Góra reservoir

METODY BADAŃ

Zawartość metali ciężkich w próbkach wody oznaczano po przesączeniu przez sączki membranowe o średnicy 0,45 μm i zakwaszeniu kwasem azotowym.

Przygotowanie próbek osadów do oznaczeń metali polegało na ich wysuszeniu do stanu powietrznie suchego, roztrąceniu w moździerzu i przesianiu przez sito o średnicy oczek 0,25 mm. Do analizy brano frakcję o uziarnieniu $< 0,25$ mm, stosowaną w pracach związanych z kartowaniem geochemicznym [2, 3]. Osad mineralizowano w wodzie królewskiej, w zamkniętym systemie mikrofalowym MDS-2000 [8]. Równolegle w powietrznie suchych próbkach osadów oznaczano zawartość wody.

Metale w próbkach wody i osadów oznaczono techniką absorpcyjnej spektrometrii atomowej (AAS). W każdej serii badań oznaczano Zn, Pb i Cd, natomiast jednorazowo, celem rozpoznania, również Cr, Cu, Hg, Co, Mn i Fe. Dla pełniejszej interpretacji rozszerzono zakres badań analitycznych osadów o charakterystyczne wskaźniki jakości. Oznaczenia przeprowadzono, stosując standardowe metody analityczne, zgodne z Polskimi Normami i normami międzynarodowymi. W próbkach osadów oznaczano: wilgotność (wg ISO 11465), straty prażenia (wg PN-78/C-04541), odczyn, zasadowość i kwasowość (wg PN-90/C-04540/01), pojemność sorpcyjną (wg ISO 13536:1995), fosfor ogólny (wg PN-88/C-04537.04) oraz potencjał redox i azot ogólny [14].

ANALIZA FORM WIĄZANIA METALI CIĘŻKICH W OSADACH

Formy wiązania Zn, Pb i Cd w osadach oznaczono jednorazowo, po uśrednieniu próbek osadów pobranych ze stanowisk z górnej i odrębnie – dolnej części zbiornika.

Zastosowano metodykę ekstrakcji sekwencyjnej opracowanej przez Tessiera, Campbella i Bissona [26]. Powyższa metodyka analizy sekwencyjnej osadów dennych uważana jest obecnie za klasyczną. Do niej odwołują się zainteresowani problemem badacze, modyfikując w najróżniejszy sposób procedurę opracowaną przez wspomnianych autorów [1, 17, 18, 29].

Zastosowana metodyka pozwala na wyróżnienie następujących form – frakcji metali ciężkich:

- frakcja I – metale zaadsorbowane (łatwo wymienne),
- frakcja II – metale związane z węglanami,
- frakcja III – metale związane z uwodnionymi tlenkami żelaza i manganu,
- frakcja IV – metale związane z materią organiczną,
- frakcja V – metale związane trwale w sieci krystalicznej minerałów.

WYNIKI BADAŃ

METALE CIĘŻKIE W WODACH ZBIORNIKA

Interpretację wyników oznaczeń z całego okresu badawczego, z podziałem na strefę wlotu do zbiornika (stanowiska 1–3) i strefę wylotu (stanowi-

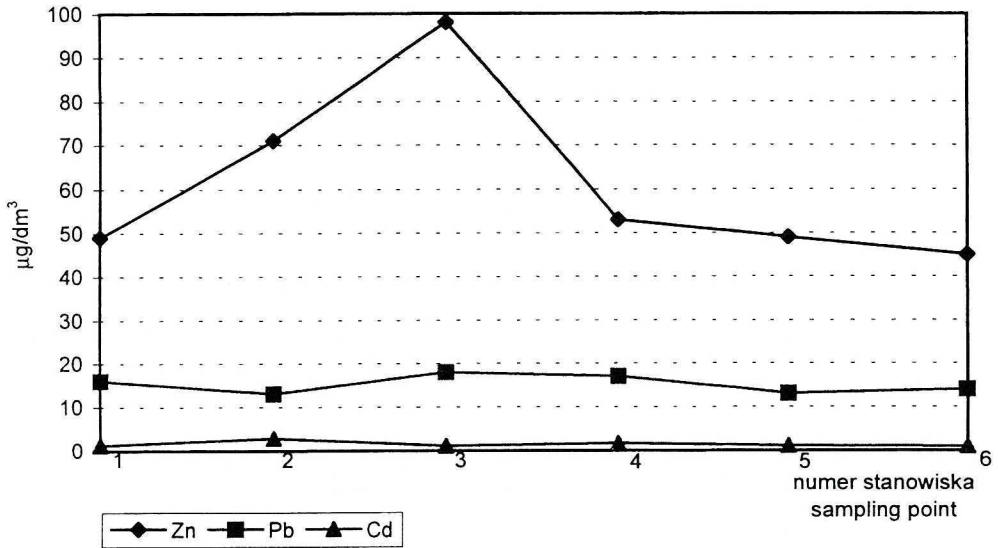
ska 4–6), zawiera tabela 1. Wynika z niej, że stężenia rozpuszczonych związków Zn, Pb i Cd w wodach zbiornika podlegały znacznym fluktuacjom, kształtując się w zakresach ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$): Zn – od 12 do 190, Pb – od 2 do 74 i Cd – od 0,2 do 8,0. Wystąpiły przekroczenia dopuszczalnych stężeń Pb i Cd dla wód I klasy czystości. Z kolei średnie stężenia tych metali, na podstawie których najczęściej dokonuje się klasyfikacji jakości wód, kształtowały się poniżej wartości dopuszczalnych dla wód I klasy czystości. Tylko stężenia Zn, w każdym przypadku, odpowiadały wodom I klasy czystości.

Tabela 1. Stężenia Zn, Pb i Cd w wodzie zbiornika Kozłowa Góra
Zn, Pb and Cd concentration in water of the Kozłowa Góra reservoir

Stężenie ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$) Concentration ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$)	Zn		Pb		Cd	
	Część wlotowa Inlet part	Część wylotowa Outlet part	Część wlotowa Inlet part	Część wylotowa Outlet part	Część wlotowa Inlet part	Część wylotowa Outlet part
Najmniejsze Min.	12	20	2	2	0,2	0,2
Największe Max.	190	83	47	74	7	8
Średnie Mean	74	49	17	15	1,7	2,2
Medialne Median	64	47	12	8	1,0	1,4
Odchylenie standardowe Standard deviation	52,2	14,9	14,5	17,2	2,0	2,4

Zmiany średnich stężeń Zn, Pb i Cd na poszczególnych stanowiskach badawczych, usytuowanych w części wlotowej i wylotowej zbiornika, przedstawia rysunek 2. Średnie stężenia ołowiu i kadmu pozostawały na zbliżonym poziomie zarówno w górnej, jak i dolnej części zbiornika. Stwierdzono jedynie spadek stężenia Zn. Stężenia tego metalu w strefie wlotu, na stanowiskach 2 i 3, były wyższe niż przy zaporze.

Porównując aktualne wyniki badań z wynikami sprzed lat 20 [4] można stwierdzić, że poziom zanieczyszczenia wód metalami ciężkimi w zasadzie nie zmienił się. Był on i pozostał stosunkowo niski, pomimo znacznej ekspansji przemysłu metali nieżelaznych w przeszłości i długoterminowych skutków: zanieczyszczonych metalami ciężkimi gleb tego rejonu.



Rys. 2. Średnie stężenia Zn, Pb i Cd w wodach zbiornika Kozłowa Góra
 Mean concentration of Zn, Pb and Cd in water of the Kozłowa Góra reservoir

SKŁAD FIZYKOCHEMICZNY OSADÓW

Skład osadów pobranych z części wlotowej i wylotowej zbiornika różnił się znacznie (Tab. 2). Osady w pobliżu zapory charakteryzowały się wyższą zawartością substancji organicznych i biogennych oraz wyższą pojemnością sorp-

Tabela 2. Charakterystyka fizykochemiczna osadów zbiornika Kozłowa Góra
 Physico-chemical characteristic of the sediments in the Kozłowa Góra reservoir

Parametr Parameter	Część wlotowa Inlet part	Część wylotowa Outlet part
Substancje organiczne Organic substances	5%	34,2%
Pojemność sorpcyjna, w tym: Sorption capacity, include:	12,5%	48,4%
Kationy zasadowe Basic cation	11,8%	48,1%
Odczyn pH	6,5 – 7,2	6,9 – 7,2
Potencjał redox Redox potential	-152 mV	-144 mV
Zasadowość Alkalinity	4,3 mval/l	8,4 mval/l
Kwasowość Acidity	1,5 mval/l	1,0 mval/l
Azot ogólny Total nitrogen	1927 mgN/kg	5242 mgN/kg
Fosfor ogólny Total phosphorus	353 mgP/kg	826 mgP/kg

cyjną. Średnia zawartość substancji organicznych w osadach przy zaporze – powyżej 30% – świadczy o zaawansowanym procesie ich degradacji. W osadach czystych akwenów zawartość substancji organicznych nie przekracza 5% [21]. Poziom żyzności osadów można ocenić jako średni. Był on niższy od zawartości stwierdzonej w osadach silnie zdegradowanego Jeziora Swarzędzkiego [24] czy Goczałkowickiego [11]. Całkowita pojemność sorpcyjna osadów (charakteryzowana przez zawartość kationów zasadowych, kwasowych, wodorowych i glinowych) w dolnej części zbiornika kształtowała się na poziomie 48%, podczas gdy przy wlocie wynosiła tylko 12%. W całym zbiorniku w osadach kationy zasadowe znacznie przeważały nad kwasowymi. Z kolei ujemny potencjał oksydacyjno-redukcyjny wskazuje na redukcyjne właściwości osadów.

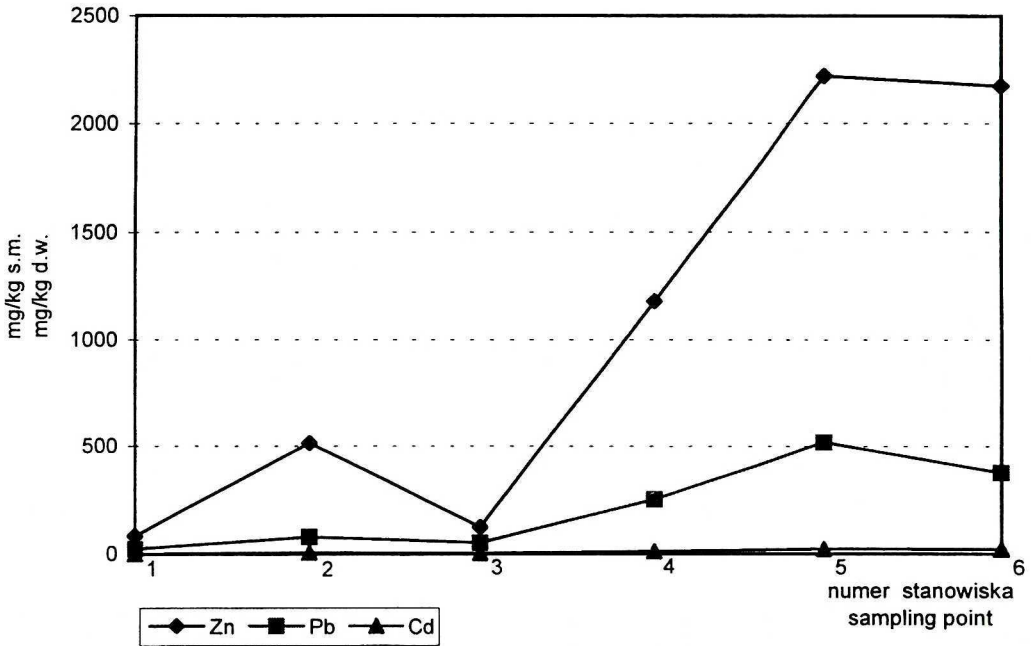
METALE CIĘŻKIE W OSADACH

Zawartość metali w próbkach osadów pobranych ze stanowisk usytuowanych w górnej (stanowiska 1–3) i dolnej części zbiornika (stanowiska 4–6) była znacznie zróżnicowana (Rys. 3). Zasadniczo, osady przy zaporze charakteryzowały się znacznie wyższymi stężeniami metali (Tab. 3). W części wlotowej średnie stężenia Zn, Pb i Cd były 5–7-krotnie wyższe niż w części wylotowej. Różnice w składzie osadów między wlotową i wylotową częścią zbiornika związane są z procesami transportu mas wody w kierunku zapory, sedymentacją łatwo opadających zawieszin w części wlotowej i osiadaniami drobniejszych cząstek stałych w dolnej części zbiornika, a także przemieszczaniem się osadów z górnej, płytszej części zbiornika do jego dolnej, głębszej części [21].

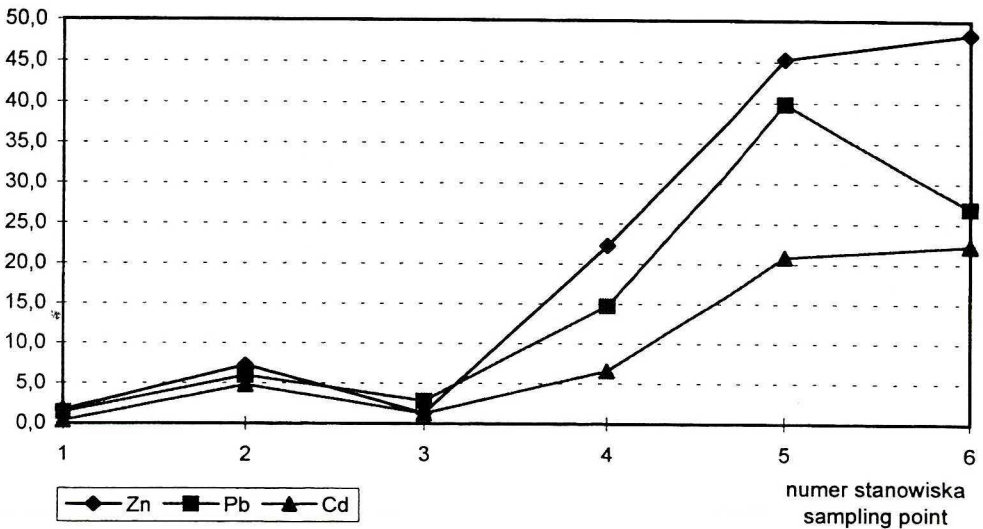
Stosunki ilościowe między stężeniami metali w wodzie i osadach charakteryzują współczynniki zagęszczenia osad/woda – znacznie niższe na stanowiskach w strefie wlotowej niż przy zaporze (Rys. 4). Średnie współczynniki zagęszczenia (stanowiska 1–6) osad/woda $\times 10^3$ dla Zn, Pb i Cd wynosiły odpowiednio: 10, 9 i 4.

Tabela 3. Całkowita zawartość Zn, Pb i Cd w osadach zbiornika Kozłowa Góra
Total content of Zn, Pb and Cd in sediments of the Kozłowa Góra reservoir

Zawartość (mg/kg s.m.) Content (mg/kg d.w.)	Zn		Pb		Cd	
	Część wlotowa Inlet part	Część wylotowa Outlet part	Część wlotowa Inlet part	Część wylotowa Outlet part	Część wlotowa Inlet part	Część wylotowa Outlet part
Najmniejsze Min.	64	192	15,2	43,4	0,31	1,63
Największa Max.	1066	2264	130,9	525,8	8,2	19,7
Średnia Mean	239	1451	49,6	266,3	1,8	12,8
Medialna Median	106	1623	32,9	267,7	1,1	14,8



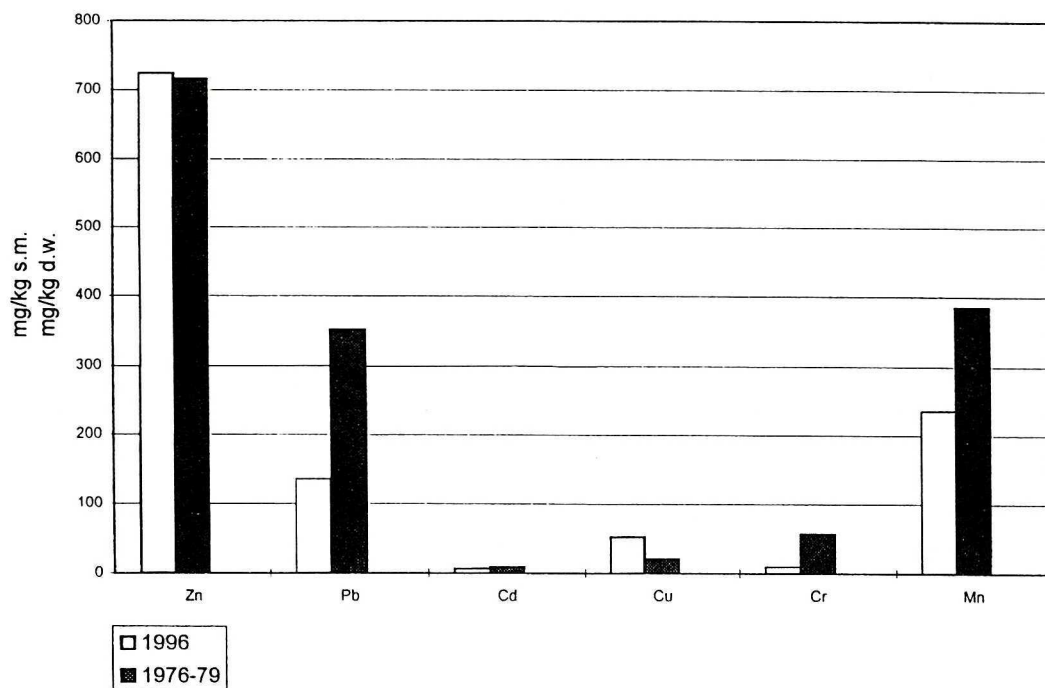
Rys. 3. Średnie stężenia Zn, Pb i Cd w osadach zbiornika Kozłowa Góra
 Mean concentration of Zn, Pb and Cd in sediments of the Kozłowa Góra reservoir



Rys. 4. Współczynniki zagęszczenia osad/woda × 10³ w zbiorniku Kozłowa Góra
 Cumulation coefficient sediment/water × 10³ in the Kozłowa Góra reservoir

Z kolei poziom antropogenicznego zanieczyszczenia osadów zbiornika Zn, Pb i Cd charakteryzują współczynniki wzbogacenia, które obliczono w stosunku do tła geochemicznego podłoża zbiornika [16]. Biorąc pod uwagę średnią zawartość metali w osadach (ze wszystkich stanowisk badawczych na zbiorniku) w stosunku do zawartości metali w podłożu, współczynniki wzbogacenia wynoszą: 11 dla Zn i Pb oraz 32 dla Cd.

Obecnie osady w zbiorniku są mniej zanieczyszczone metalami ciężkimi, (z wyjątkiem miedzi) aniżeli 20 lat temu [4] (Rys. 5). Wzrost zawartości miedzi w osadach mógł być spowodowany stosowaniem preparatów miedziowych do likwidacji „zakwitów” wód w zbiorniku.



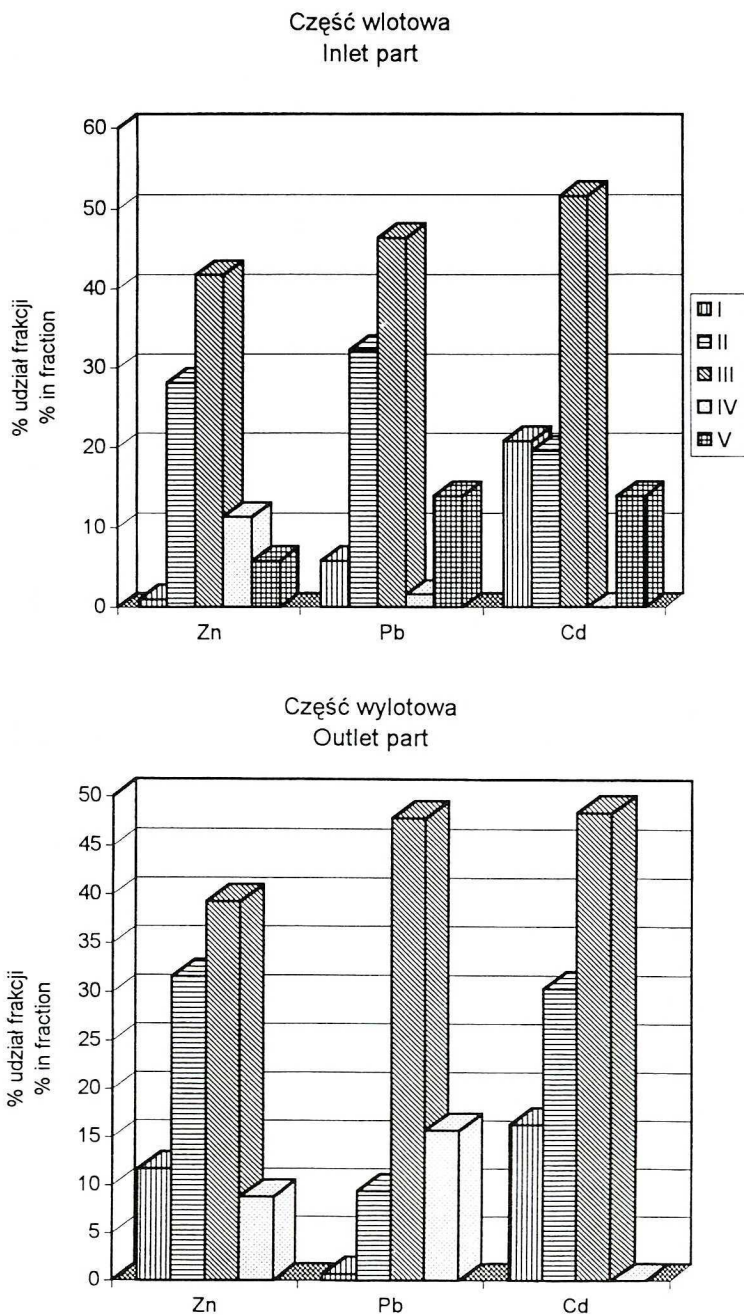
Rys. 5. Średnie zawartości metali ciężkich w osadach zbiornika Kozłowa Góra w 1996 r. i w latach 1976–1979

Mean contents of heavy metals in sediments of the Kozłowa Góra reservoir in 1996 and 1976–1979

FORMY WIĄZANIA METALI CIĘŻKICH W OSADACH

Analiza chemicznych form wiązania Zn, Pb i Cd, w uśrednionych odrębnie próbkach osadów z wlotowej i wylotowej części zbiornika, wykazała zróżnicowanie zawartości metali w poszczególnych frakcjach (Rys. 6).

We frakcji I, w której skład wchodzi metale zaadsorbowane, łatwo uwalniane do toni wodnej, zawartość Zn i Pb była stosunkowo niska. Udziały Zn i Pb w tej frakcji kształtowały się odpowiednio przy wlocie: 1 i 6%, przy



Rys. 6. Formy wiązania Zn, Pb i Cd w osadach zbiornika Kozłowa Góra
Zn, Pb and Cd speciation forms in sediments of the Kozłowa Góra reservoir

wylocie: 12 i 1%. Natomiast udział Cd we frakcji I był wyższy: 21% przy wlocie do zbiornika i 16% przy wylocie.

We frakcji II, w której skład wchodzi metale związane z węglanami, uwalniane z osadu do wody przy obniżeniu odczynu, udziały badanych metali były (z wyjątkiem Cd) znacznie wyższe niż w I frakcji. W strefie wlotu do zbiornika udział Pb w tej frakcji wynosił 32%, Zn – 28%, Cd zaś – około 20%. Przy wylocie ze zbiornika w tej frakcji najwyższy był udział Zn – 32%, następnie Cd – 30%, najmniejszy zaś Pb – tylko 9%.

We frakcji III, zawierającej metale związane z uwodnionymi tlenkami żelaza i manganu, które są uwalniane do wody przy zmianie warunków redox, udziały badanych metali były największe: od ponad 39 do około 52%. Nie było istotnych różnic między górną i dolną częścią zbiornika.

We frakcji IV, zawierającej metale związane z materią organiczną, z której są one uwalniane w procesach jej rozkładu, udział Zn i Pb był stosunkowo niski, kształtując się przy wlocie do zbiornika odpowiednio na poziomie 11 i 2%, przy jego wylocie zaś odpowiednio 9 i 16%. W tej frakcji w ogóle nie wykryto Cd.

W ostatniej frakcji – V, zawierającej metale wbudowane w sieć krystaliczną minerałów, które uważa się za trwale unieruchomione, a więc niedostępne dla organizmów żywych, udziały badanych metali w części wlotowej były wyższe niż przy wylocie.

WNIOSKI

W wodach zbiornika stężenie rozpuszczonych związków metali: Zn, Pb i Cd było niskie i odpowiadało, z nielicznymi wyjątkami, I klasie czystości wód.

Z kolei osady zbiornika wykazywały wysoki poziom kontaminacji Zn, Pb i Cd. W stosunku do tła geochemicznego podłoża zbiornika średnia zawartość Zn i Pb w osadach była 11-krotnie wyższa, a kadmu aż 32-krotnie wyższa.

Zawartość metali w osadach zbiornika była znacznie zróżnicowana: wyższa w dolnej części zbiornika – przy zaporze niż przy wlocie do zbiornika.

Nieznaczne udziały Zn i Pb zaadsorbowanego na osadach (frakcja I) w stosunku do całkowitej zawartości tych metali pozwalają stwierdzić, że zagrożenie jakości wód w wyniku uwolnienia tych metali do toni wodnej jest nieznaczne. W przypadku kadmu natomiast zagrożenie to może być większe, gdyż jego udział we frakcji I stanowił od 16 do 21% całkowitej zawartości w osadzie.

Ryzyko wtórnego zanieczyszczenia wód cynkiem, ołowiem i kadmem może wystąpić przy zmianie warunków utleniająco-redukcyjnych w osadzie (frakcja III), ponieważ udział metali w tej frakcji jest największy (od 39 do 52%).

Obecny poziom zanieczyszczenia osadów dennych metalami ciężkimi, nieco niższy niż 20 lat temu, wskazuje na odwrócenie niekorzystnych trendów pogarszania się stanu środowiska.

LITERATURA

- [1] Ajayi S.O., G.W. Vanloon: *Studies on redistribution during the analytical fractionation of metals in sediments*, Sci. Total Environ., **87/88**, 171–187 (1989).
- [2] Bojakowska I., T. Gliwicz, G. Sokołowska: *Wyniki monitoringu geochemicznego osadów wodnych Polski w latach 1996–1997*, PIOŚ – Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa 1998.
- [3] Bojakowska J., G. Sokołowska: *Wyniki monitoringu geochemicznego osadów wodnych Polski w latach 1991–1993*, PIOŚ – Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa 1994.
- [4] Bombówna M.: *Ecology of some waters in the forest – agricultural basin of river Brynica, near the Upper Silesian Industrial Region. Chemical composition of the water and atmospheric precipitation*, Acta Hydrobiologica, **4**, 423–432 (1986).
- [5] Florence T.M.: *Trace metal species in fresh water*, Water Research, **11**, 681–687 (1977).
- [6] Förstner U., G. Wittmann: *Metal pollution in the aquatic environment*, Springer Verlag, Berlin–Heidelberg–New York 1981.
- [7] Förstner U., W. Salomons: *Trace metals analysis in polluted sediments*, part I, Envir. Technol. Letter, **1**, 494–505 (1980).
- [8] Gzyl J., Z. Piesak, E. Weisło: *Analiza gleb rejonów zanieczyszczonych na zawartość metali ciężkich metodami stosowanymi w Polsce, Niemczech oraz zalecanymi przez ISO*, Instytut Ekologii Terenów Uprzemysłowionych, Katowice 1994.
- [9] Harding J.P.C., B.H. Whitton: *Zinc, cadmium, lead in water, sediments and submerged plants of the Derwent Reservoir, Northern England*, Water Research, **12**, 307–316 (1978).
- [10] Hussein I. Abdel-Shafy, Mamdouth F. Abdel-Sabour, Mohamed R. Farid: *Distribution pattern of metals in the environment of little Mourrah Lake*, Environmental Protection Engineering, **1–4**, 5–15 (1994).
- [11] Kajak Z.: *Eutrofizacja nizinnych zbiorników zaporowych*, [w:] Zalewski M.: *Procesy biologiczne w ochronie i rekultywacji nizinnych zbiorników zaporowych*, PIOŚ – Biblioteka Monitoringu Środowiska, Łódź 1995.
- [12] Kostecki M., E. Kowalski, A. Domurad: *Badania limnologiczne zbiornika zaporowego Dzierżno Małe. Część II. Metale ciężkie w wodzie i osadach dennych rzeki Dramy*, Arch. Ochr. Środ., **1**, 45–56 (1998).
- [13] Kwapuliński J., D. Wiechuła, B. Anders: *The occurrence of heavy metals in bottom sediments of the Goczałkowice Reservoir (southern Poland)*, Acta Hydrobiologica, **33**, 3–16 (1991).
- [14] Lityński T., H. Jurkowska, E. Gorlach: *Analiza chemiczno-rolnicza*, PWN, Warszawa 1976.
- [15] Pardo R., E. Barrado, L. Perez, M. Vega: *Determination and speciation of heavy metals in sediment of the Pisuerga River*, Water Research, **3**, 373–379 (1990).
- [16] Reczyńska-Dutka H.: *Atmospheric heavy metal pollution of the bottom sediments of the reservoir at Kozłowa Góra*, Acta Hydrobiologica, **4**, 465–476 (1985) za: Turekian K., H. Wedepohl: *Distribution of the elements in some major unit of the earth crust*, Bul. Geol. Sci. Am., **72** (1961).
- [17] Sager M., R. Belocky, R. Puscho: *Zur Ermittlung der Bindungsformen von Haupt und Spurenelementen in Sedimenten durch sequentielle L'severfahren*, Acta Hydroch. Hydrobiol., **18**, 157–173 (1990).
- [18] Salomons W.: *Adoption of common schemes for single and sequential extraction of trace metals in soil and sediments*, Inter. J. Environ. Anal. Chem., **51**, 161–165 (1993).
- [19] Salomons W., A. Stigliani: *Biogeodynamics of pollutants in soil and sediment*, Springer Verlag, Berlin–Heidelberg–New York 1995.
- [20] Sobczyński T., J. Zerbe, H. Elbanowska, J. Siepak: *Specjacja metali ciężkich w osadach jeziora Góreckiego poddanego ograniczonej antropopresji*, [w:] Mat. z Konferencji Naukowej: „Wpływ Antropopresji na Jeziora”, Wydawnictwo Uniwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu, Poznań 1997.

- [21] Starmach K., S. Wróbel, K. Pasternak: *Hydrobiologia – Limnologia*, PWN, Warszawa 1976.
- [22] Suschka J., S. Ryborz: *Surface water and sediment contamination in an old industrial region of Poland – two critical examples*, *Wat. Sci. Techn.*, **3**, 124–130 (1994).
- [23] Szarek-Gwiazda E.: *The effect of abiotic factors on the content and mobility of heavy metals in the sediment of an eutrophic dam reservoir (Dobczyce Reservoir, southern Poland)*, *Acta Hydrob.*, **2**, 121–129 (1998).
- [24] Szyper H., R. Goldyn, W. Romanowicz: *Lake Swarzędzkie and its influence upon the water quality of the River Cybina*, Wyd. Poznańskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk, Poznań 1994.
- [25] Świdzka-Bróż M.: *Występowanie, toksyczność i usuwanie metali ciężkich z wód naturalnych*, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1978.
- [26] Tessier A., P. Campbell, M. Bisson: *Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals*, *Anal. Chem.*, **51**, 844–851 (1979).
- [27] Wiechuła D., J. Kwapuliński, D. Majewicz, K. Loska: *Occurrence of copper in the Goczalkowice Reservoir (southern Poland)*, *Acta Hydrobiol.*, **39**, 121–131 (1997).
- [28] Zerbe J., J. Siepak, A. Osowski: *Skład chemiczny wody i osadów dennych w małych zbiornikach na obrzeżu Wielkopolskiego Parku Narodowego*, VI Środowiskowa Konferencja Naukowa Chemików, Wyd. PAN, Wrocław 1988.
- [29] Zerbe J., T. Sobczyński, J. Siepak: *Metale ciężkie w osadach dennych, ich specjacja na drodze ekstrakcji sekwencyjnej*, *Ekologia i Technika*, **3**, 7–12 (1995).

Wpłynęło: 17 stycznia 2000, zaakceptowano do druku: 7 czerwca 2000.