

Sylwia Siebielec, Grzegorz Siebielec, Bożena Smreczak

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

ZANIECZYSZCZENIA OSADÓW DENNYCH RZEK I ZBIORNIKÓW WODNYCH*

Słowa kluczowe: osady denne, pierwiastki śladowe, zanieczyszczenia organiczne

Wstęp

Osady denne rzek i zbiorników wodnych stanowią istotny element ekosystemów wodnych, biorąc czynny udział w cyklu geochemicznym pierwiastków i materii organicznej. Mają istotny wpływ na stan środowiska, ponieważ zawierają zanieczyszczenia nieorganiczne, do których należą pierwiastki śladowe takie jak: ołów (Pb), kadm (Cd), cynk (Zn), rtęć (Hg) i chrom (Cr) oraz wiele grup trwałych zanieczyszczeń organicznych (TZO), np. wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), polichlorowane bifenyle (PCB), chloroorganiczne pestycydy (COP), w tym heksachlorobenzen, lindan czy dichlorodifenylotrichloroetan (DDT), polichlorowane dibenzodioksyny (PCDD), polichlorowane dibenzofurany (PCDF) i inne. Wysokie stężenia zanieczyszczeń w osadach dennych mogą być potencjalnie toksyczne dla organizmów wodnych, a w przypadku niewłaściwego zagospodarowania osadów, m.in. z odmulanych zbiorników wodnych, również stwarzać ryzyko toksycznego oddziaływania dla organizmów lądowych (5, 17, 21, 31).

Drogi, którymi pierwiastki i związki przedostają się do wód powierzchniowych, a potem są akumulowane w osadach dennych, to przede wszystkim odprowadzanie ścieków komunalnych i przemysłowych do zbiorników wodnych, spływy powierzchniowe z pól uprawnych gdzie zanieczyszczenia dostają się do gleb w wyniku działalności rolniczej i pozarolniczej, opad pyłów oraz transport (12, 14, 20).

Skład chemiczny osadów dennych rzek i zbiorników wodnych jest w znacznym stopniu uzależniony od działalności człowieka, która wpływa na sytuację geochemiczną panującą w zlewni (13). Analiza zawartości zanieczyszczeń zakumulowanych w osadach dennych zbiornika może być wykorzystana do oceny źródeł, prędkości

* Problematyka prezentowana w trakcie XII Sympozjum "Trace elements in the environment", zorganizowanego w ramach zadania 1.2 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

i dróg dystrybucji np. metali oraz zmian ich stężenia w czasie (13). Osady denne mogą również zawierać znaczne ilości trwałych zanieczyszczeń organicznych, pochodzących zarówno ze źródeł naturalnych jak i antropogenicznych (tab.1) (14). Ze względu na słabą rozpuszczalność w wodzie część TZO występuje głównie w formie zawieszonej. Po opadnięciu na dno zbiornika kumulują się w osadach dennych, stanowiąc czuły wskaźnik antropopresji.

Tabela 1

Naturalne i antropogeniczne pochodzenie trwałych zanieczyszczeń organicznych w środowisku

Trwałe zanieczyszczenia organiczne	Źródło występowania
Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne	<ul style="list-style-type: none"> • Przetwarzanie węgla kamiennego w koksowniach • Spalanie węgla w gospodarstwach domowych • Transport • Spalanie odpadów komunalnych • Przetwarzanie ropy naftowej w rafineriach • Pożary naturalnych ekosystemów roślinnych itp.
Heksachlorobenzen	<ul style="list-style-type: none"> • Półprodukt - synteza substancji chemicznych • Spalanie odpadów komunalnych
Polichlorowane bifenyle	<ul style="list-style-type: none"> • Spalanie węgla w elektrowniach • Spalanie pozostałości szpitalnych • Spalanie węgla kamiennego i drewna • Transport • Wycieki z wymienników ciepła bądź transformatorów • Procesy technologiczne
Pestycydy chloroorganiczne	<ul style="list-style-type: none"> • Środki ochrony roślin

Źródło: GIOŚ, 2012 (14)

Regulacje prawne dotyczące zanieczyszczeń osadów dennych

Zagadnienia unijnej polityki wodnej i związanych z nią środowiskowych norm jakości są zawarte w Dyrektywie 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. (Dz.U.UE L z dnia 22 grudnia 2000 r.) (11) oraz Dyrektywie 2008/105/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 16 grudnia 2008 r. (Dz.U.UE L z dnia 24 grudnia 2008 r.), zmieniającej następujące dyrektywy Rady 82/176/EWG (10), 83/513/EWG, 84/156/EWG, 84/491/EWG i 86/280/EWG oraz przekształcającej dyrektywę 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady. Krajowe regulacje prawne zapisane są w rozporządzeniach Ministra Środowiska dotyczących klasyfikowania oraz sposobu prowadzenia obserwacji jednolitych części wód powierzchniowych i podziemnych (Dz. U. Nr 258, poz. 1550) (24, 25).

Jakość osadów dennych rzek i jezior pod względem zanieczyszczenia pierwiastkami śladowymi oraz trwałymi zanieczyszczeniami organicznymi (TZO) jest oceniana w ramach krajowego programu „Monitoring osadów dennych rzek i jezior” (14). Do roku 2012 ocena zawartości zanieczyszczeń w osadach dennych była prowadzona na podstawie Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 16 kwietnia 2002 r.

w sprawie rodzajów oraz stężeń substancji, które powodują, że urobek z pogłębiania akwenów morskich, zbiorników wodnych, stawów, cieków naturalnych oraz rowów jest zanieczyszczony (Dz. Ustaw Nr 55 poz. 498) (26). W Rozporządzeniu były wyszczególnione trzy grupy zanieczyszczeń: pierwiastki śladowe, WWA, PCB oraz podane ich dopuszczalne zawartości (tab. 2.). W 2013 r. powyższe Rozporządzenie zostało uchylone z braku podstawy prawnej. Obecnie klasyfikacja osadów prowadzona jest na podstawie kryteriów geochemicznych (tab. 3) oraz ekotoksykologicznych. Kryteria geochemiczne opracowane przez Państwowy Instytut Geologiczny – PIB dotyczą klasyfikacji czystości osadów dennych na podstawie zawartości w nich wybranych pierwiastków śladowych (6, 7). Kryteria ekotoksykologiczne oparte są na wskaźniku PEC (*Probable Effect Concentration*) (19). Wartość wskaźnika PEC mówi o takiej zawartości pierwiastka lub związku chemicznego, powyżej którego zauważalny jest toksyczny wpływ na organizm (21). Wskaźnik PEC przyjmuje następujące wartości: 33 mg arsenu (As); 4,98 mg Cd; 111 mg Cr; 149 mg miedzi (Cu); 48,6 mg niklu (Ni); 128 mg Pb; 1,06 mg Hg oraz 459 mg Zn·kg⁻¹ s.m. osadu. Dla zanieczyszczeń organicznych wartości PEC wynoszą 1,45 mg benzo(a)pirenu; 22,8 mg ΣWWA; 4,77 μg DDT; 1,38 μg lindanu i 676 μg PCB w kilogramie s.m. osadu (19).

Tabela 2

Dopuszczalne zawartości pierwiastków śladowych oraz trwałych zanieczyszczeń organicznych w osadach dennych według Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 16 kwietnia 2002 r. (26)

Rodzaj zanieczyszczenia	Zawartość graniczna (mg·kg ⁻¹ suchej masy)
Pierwiastki śladowe	
Arsen (As)	30
Chrom (Cr)	200
Cynk (Zn)	1000
Kadm (Cd)	7,5
Miedź (Cu)	150
Nikiel (Ni)	75
Ołów (Pb)	200
Rtęć (Hg)	1
Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA)	
Benzo(a)antracen	1,5
Benzo(b)fluoranten	1,5
Benzo(k)fluoranten	1,5
Benzo(ghi)perylene	1,0
Benzo(a)piren	1,0
Dibenzo(a,h)antracen	1,0
Indeno(1,2,3-c,d)ipren	1,0
Polichlorowane bifenyle (PCB)	
Suma kongenerów PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153 i 180	0,3

Tabela 3

Klasy czystości osadów dennych na podstawie kryteriów geochemicznych (6)

Pierwiastek	Tło geochemiczne	Klasa I niezanieczyszczone	Klasa II miernie zanieczyszczone	Klasa III zanieczyszczone	Klasa IV silnie zanieczyszczone
Arsen (As)	<5	10	30	50	>50
Bar (Ba)	<50	100	500	1000	>1000
Chrom (Cr)	6	50	100	400	>400
Cynk (Zn)	73	200	500	1000	>1000
Kadm (Cd)	<0,5	1	3,5	6	>6
Kobalt (Co)	3	10	20	50	>50
Miedź (Cu)	7	40	100	200	>200
Nikiel (Ni)	5	16	40	50	>50
Ołów (Pb)	15	30	100	200	>200
Rtęć (Hg)	<0,05	0,1	0,5	1,0	>1,0
Srebro (Ag)	<0,5	1	2	5	>5

Źródło: Bojakowska, Sokołowska, 1998 (6)

Zanieczyszczenia osadów dennych jezior

W zakresie osadów dennych jezior dostępne są informacje na temat naukowych badań obiektów położonych w różnych częściach kraju, reprezentujących tereny rolnicze, naturalne i przemysłowe, a także wyniki krajowego monitoringu osadów dennych, nadzorowanego przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. S i d o r u k i P o t a s z n i k (30) prowadziły ocenę stanu zanieczyszczenia ołowiem, cynkiem i chromem osadów dennych pobranych z jeziora Sunia położonego w obszarze niskiej intensywności rolnictwa w woj. warmińsko-mazurskim. Jezioro to jest wykorzystywane rekreacyjnie i w celach wędkarskich. Przeprowadzone analizy wykazały, iż osady denne jeziora charakteryzują się zróżnicowaniem pod względem zawartości wybranych pierwiastków. Największe zawartości pierwiastków śladowych zmierzono w osadach zlokalizowanych w strefie jeziora pozbawionej dostępu światła, umiejscowionej poniżej dolnej granicy występowania roślin. Najmniejsze zawartości pierwiastków oznaczono w próbkach pochodzących z miejsc strefy przybrzeżnej.

T r o j a n o w s k i i A n t o n o w i c z (34) przeprowadzili badania właściwości chemicznych osadów dennych jeziora Dołgie Wielkie, o charakterze przymorskim, woj. pomorskie. Pomiarów wprawdzie nie obejmowały pierwiastków potencjalnie toksycznych (kadm, rtęć, arsen, ołów), jednak scharakteryzowano zmienność substancji i pierwiastków wpływających bezpośrednio na mobilność pierwiastków śladowych. Osady jeziora były zróżnicowane w zależności od położenia. Podążając w głąb jeziora zmniejsza się zawartość materii organicznej, a także związków azotu i fosforu. Azot występował w osadach głównie w formie azotu organicznego (średnio 88% azotu ogólnego). Fosfor występował w zbliżonych proporcjach zarówno w formie organicznej, jak i nieorganicznej, co decyduje z kolei o jego ruchliwości w środowisku.

Obszary z ograniczoną antropopresją reprezentują również badania S z a f r a n (32), które wykazały zróżnicowanie zawartości metali śladowych w osadach dennych płytkich jezior Pojezierza Łęczyńsko-Włodawskiego tj. Syczyńskiego, Sumin, Rotocze. Badane osady w porównaniu do tła geochemicznego, odznaczały się niską zawartością kadmu, cynku oraz miedzi, oraz podwyższoną zawartością ołowiu, co Autorka wiązała z wieloletnim nawożeniem gruntów ornych, reprezentujących główny sposób użytkowania gleb w tym rejonie. Wykazano istotną korelację poziomu pierwiastków śladowych z zawartością materii organicznej osadów, która pełni rolę sorbentu dla pierwiastków.

S z a l i ń s k a i i n . (33) badali zawartość metali śladowych w osadach dennych u ujść dopływów Jeziora Goczalkowickiego w woj. śląskim. Jezioro to pełni istotną rolę w zaopatrzeniu Górnego Śląska w wodę, znajduje się jednak pod presją zarówno rolnictwa, jak i częściowo działalności przemysłowej. Osady jeziora były z reguły miernie zanieczyszczone metalami (kadm, miedź, cynk), a poziom zanieczyszczenia był zróżnicowany przestrzennie. Według Autorów fakt ten wskazuje na zagrożenie ekotoksykologiczne dla organizmów bentosowych jeziora, przy czym większość osadów dennych dopływów jeziora jest zatrzymywana w przepompowniach przed zrzutem do jeziora.

Krajowy monitoring jakości osadów dennych jest realizowany przez Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, jako komponent Monitoringu jakości śródlądowych wód powierzchniowych, będącego podsystemem Państwowego Monitoringu Środowiska. Nadzór nad monitoringiem osadów dennych prowadzi Główny Inspektorat Ochrony Środowiska (GIOŚ). Z badań monitoringowych przeprowadzonych w 2012 roku, wynika iż 20% osadów jeziornych nie jest zanieczyszczonych pierwiastkami śladowymi według kryterium geochemicznego, natomiast w 75% próbek stwierdzono niewielkie zanieczyszczenie (14). Stan zanieczyszczenia osadów poszczególnymi pierwiastkami śladowymi przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Udział osadów jezior w danej klasie zanieczyszczenia pierwiastkami śladowymi na podstawie krajowego monitoringu w 129 punktach pomiarowych

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GIOŚ (14)

Spośród analizowanych pierwiastków największy udział próbek zanieczyszczonych (od miernego do silnego zanieczyszczenia) wykazano dla niklu (57%), baru (43%) i rtęci (37%) (tab. 4). Znacznie mniej przekroczeń w osadach jeziornych stwierdzono dla innych toksycznych pierwiastków: arsenu, kadmu i ołowiu, dla których ilość zanieczyszczonych próbek nie przekraczała 17%.

Tabela 4

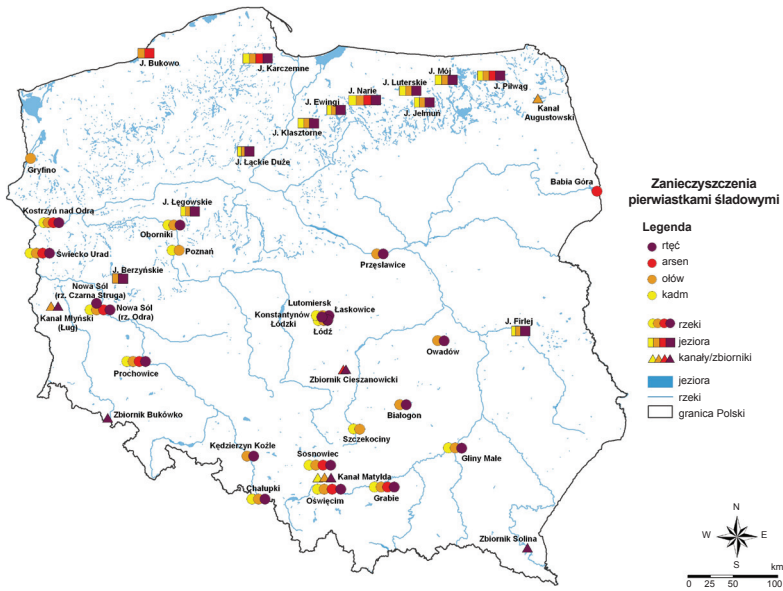
Procentowy udział osadów dennych jezior zanieczyszczonych pierwiastkami śladowymi

Pierwiastek	Niezanieczyszczone	Miernie zanieczyszczone	Zanieczyszczone	Silnie zanieczyszczone
Srebro (Ag)	98,45	0,78	0	0,78
Arsen (As)	87,60	10,85	1,55	0
Bar (Ba)	56,59	43,41	0	0
Kadm (Cd)	83,72	16,28	0	0
Kobalt (Co)	98,45	1,55	0	0
Chrom (Cr)	81,40	16,28	1,55	0,78
Miedź (Cu)	75,19	24,03	0	0,78
Rtęć (Hg)	62,79	35,66	1,55	0
Nikiel (Ni)	42,64	57,36	0	0
Ołów (Pb)	86,05	13,18	0,78	0
Cynk (Zn)	97,67	1,55	0	0,78

Źródło: opracowanie na podstawie krajowego monitoringu osadów dennych rzek i jezior (14)

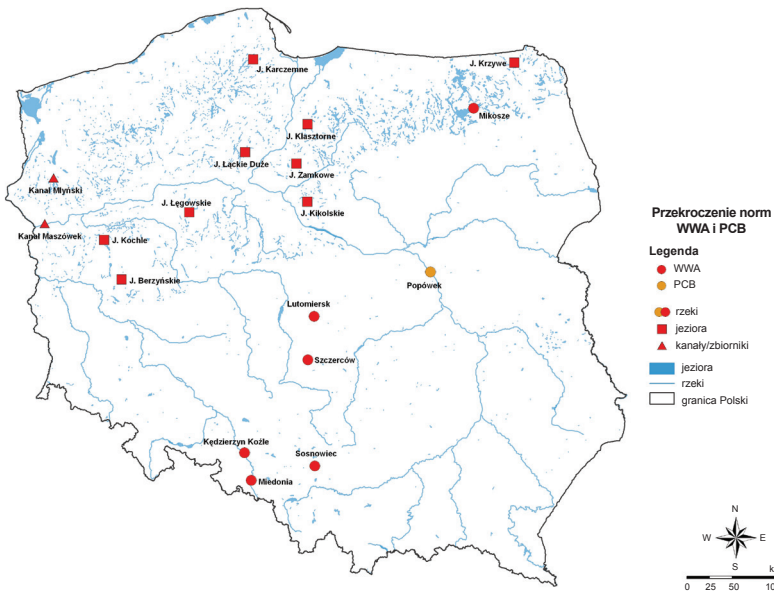
Na rysunku 2 przedstawiono przestrzenną lokalizację miejsc, w których w roku 2012 stwierdzono, co najmniej mierne zanieczyszczenie osadów dennych najbardziej toksycznymi pierwiastkami, tzn. Cd, Pb, Hg i As. Na rysunku 1 uwzględniono osady jeziorne, rzeczne oraz osady pobrane z kanałów i sztucznych zbiorników.

Zakres krajowych badań monitoringowych jakości osadów dennych uwzględnia również różne grupy zanieczyszczeń organicznych, w tym WWA, PCB oraz chloroorganiczne pestycydy m.in. heksachlorobenzen, heksachlorocykloheksany (HCH) oraz DDT. Na szesnaście badanych jezior, w osadach dennych dziewięciu z nich stwierdzono przekroczenia określonej w Rozporządzeniu z 2002 r. dopuszczalnej zawartości benzo(a)pirenu lub/i Σ WWA. Największe stężenie B(a)P ($2160 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) i sumy WWA ($24\,871 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) zostało oznaczone w osadach jeziora Łackie Duże. W przypadku PCB nie stwierdzono przekroczeń wartości dopuszczalnej ($300 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) podanej w Rozporządzeniu (28). Zawartość sumy izomerów heksachlorocykloheksanu nie przekraczała wartości $11,8 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, a sumy DDT $157,6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Rysunek 3 przedstawia lokalizację jezior, których osady były w 2012 r. zanieczyszczone WWA oraz PCB.



Rys. 2. Przestrzenne rozmieszczenie miejsc pobrania próbek osadów dennych, w których stwierdzono zanieczyszczenie pierwiastkami śladowymi wg kryteriów geochemicznych

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GIOŚ (14)



Rys. 3. Przestrzenne rozmieszczenie miejsc pobrania próbek osadów dennych, w których stwierdzono zanieczyszczenie trwałymi zanieczyszczeniami organicznymi na podstawie liczb granicznych z Rozporządzenia z 2002 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GIOŚ (14)

Zanieczyszczenia osadów dennych rzek

Kazimierowicz Z. i Kazimierowicz J. (18) prowadzili badania zawartości metali śladowych w zlewni rzeki Biebrzy i jej dopływów tj. Biebrza-Lipsk, Biebrza-Sztabin i Biebrza-Doliskowo, w dużej mierze reprezentującej obszary naturalne. Osady denne były dość zróżnicowane pod względem zawartości pierwiastków śladowych. Poziom pierwiastków w osadach nie naruszał ekosystemu badanej rzeki. Największe zawartości niklu ($22,9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) oraz miedzi ($8,8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) w osadach dennych zaobserwowano w pobliżu miejsca pomiarowego zlokalizowanego na odcinku dopływu Biebrza-Lipsk. Autorzy sugerują, iż powodem takiego stanu było niedalekie położenie oczyszczalni ścieków komunalnych w Lipsku, a także spływy wód z pobliskich gruntów rolnych oraz gospodarstw. Dopływ Biebrza-Sztabin charakteryzował się najwyższą zawartością chromu ($15,6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) oraz cynku ($246,3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$), natomiast Biebrza-Dolistowo kobaltu ($7,9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$). Przyczyną tego faktu mogła być pobliska oczyszczalnia ścieków. Stężenie kadmu było podwyższone w punktach pomiarowych Biebrza-Ostrowa i Kamienna-Kamienna Stara: i wynosiło odpowiednio $1,1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ oraz $0,8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$, co autorzy również wiążą z zanieczyszczeniami antropogenicznymi. Głównymi przyczynami przedostawania się pierwiastków do zlewni rzeki Biebrzy oraz jej dopływów są umiejscowione w pobliżu oczyszczalni ścieków, spływy z obszarów rolnych, mineralizacja nienaturalnie osuszanych torfowisk. Wg kryteriów geochemicznych zawartości Cu, Cr, Co i Ni kwalifikowały osady do I klasy czystości (niezanieczyszczone), natomiast w przypadku Cd i Zn ich zawartości mieściły się w zakresie klasy II (miernie zanieczyszczone) (6, 7).

Wojtkowska i Bogacki (36) przeprowadzili badania, których celem było określenie udziału form metali takich jak Zn, Cu, Pb oraz Cd w poszczególnych frakcjach osadów dennych rzeki Utraty, będącej dopływem Bzury, w pobliżu składowiska odpadów. Analizowane osady były zanieczyszczone pierwiastkami śladowymi, głównie miedzią oraz kadmem. Kadm dodatkowo odznaczał się dużą mobilnością. Z frakcjami mobilnymi powiązane były cynk i ołów, co wskazuje na możliwość ich wtórnego uruchamiania. Z kolei najmniejszą ruchliwością wyróżniała się miedź, występująca w dość dużych ilościach w połączeniach z frakcją organiczną.

Szczególne zainteresowanie wzbudza jakość osadów dennych rzek obszarów przemysłowych i poprzemysłowych. W ostatnich latach prowadzono badania nad zanieczyszczeniem wybranymi metalami i metaloidami osadów dennych rzeki Stoły w obszarze miejsko-przemysłowym Tarnowskich Gór (województwo śląskie) (28). Na obszarze tym działalność górnicza i hutnicza cynku, ołowiu i srebra była prowadzona od kilku stuleci. Autorzy stwierdzili, iż zmienność zawartości pierwiastków oraz frakcji iłowo-pyłowej osadów, kumulującej zwykle metale na trasie przepływu wody jest znaczna i zależy od charakteru pierwiastka, a także odcinka rzeki, z którego pobrano próbkę do analiz. Największe zawartości bezwzględne stwierdzono

dla takich pierwiastków jak: ołów, cynk oraz bor. Zwiększenie zawartości metali w osadach szczególnie zanotowano na odcinku rzeki znajdującym się w obszarze oddziaływania Zakładów Chemicznych. Wykorzystując wskaźnik zanieczyszczenia oraz współczynnik geoakumulacji, wykazano bardzo silne oraz silne zanieczyszczenie osadów Pb, Zn, Hg oraz Cd.

Barbusiński i Nocoń (2) oraz Nocoń (22) w latach 2004-2006 prowadzili badania na temat zawartości związków metali w osadach dennych Kłodnicy, prawobrzeżnego dopływu Odry, który ma źródła w granicach Katowic i płynie przez województwa śląskie i opolskie. Wg badań kadm stanowi główne zanieczyszczenie osadów dennych Kłodnicy, dlatego należy kontrolować poziom jego zawartości oraz źródła dopływu. Górnictwo węgla kamiennego również ma wpływ na stan chemiczny wód obszaru katowickiego, gdyż obecność żelaza czy manganu w osadach dennych Kłodnicy jest istotnie większa poniżej punktu pomiarowego odprowadzanych ścieków kopalnianych. Ponadto zanieczyszczenie rzeki Kłodnicy pierwiastkami takimi jak cynk czy ołów zmniejszyło się w 2006 roku w porównaniu do wyników analiz przeprowadzonych w roku 2004, a pozostawało na podobnym poziomie dla chromu, niklu i miedzi (2).

W późniejszych badaniach Nocoń (23) prowadził badania dotyczące zawartości pierwiastków śladowych w osadach dennych wybranych dopływów Kłodnicy tj. rzeki Bytomki, Czarniawki oraz Potoku Toszeckiego. Obszar badań mieści się w centralno-zachodniej części Katowic. Osady denne rzeki Bytomki według stosowanych wówczas klasyfikacji (26) były zanieczyszczone cynkiem, ołowiem oraz kadmem, natomiast osady denne rzeki Czarniawki były w nielicznych przypadkach zanieczyszczone. Autorzy sugerują, iż podwyższone zawartości pierwiastków śladowych w osadach dennych górnego odcinka Bytomki są konsekwencją dawniej istniejącego przemysłu wydobywczego. Z kolei osady denne pobrane na odcinku Potoku Toszeckiego nie były zanieczyszczone pierwiastkami śladowymi, a ich zawartość była porównywalna do naturalnej koncentracji pierwiastków w tym obszarze.

Z krajowych badań monitoringowych, koordynowanych przez GIOŚ, przeprowadzonych w 2012 roku, wynika, iż 42,91% osadów rzecznych nie jest zanieczyszczona pierwiastkami śladowymi, natomiast 46,91% charakteryzuje niewielkie zanieczyszczenie (rys. 4). Udział osadów rzecznych zanieczyszczonych poszczególnymi pierwiastkami śladowymi przedstawia tabela 5 (14).

Rozpatrując poszczególne pierwiastki należy zwrócić uwagę, że najwięcej, tzn. około 45% próbek osadów było zanieczyszczonych niklem, przy czym większość próbek mieściła się w zakresie miernego zanieczyszczenia (tab. 5). Stosunkowo nieznaczny odsetek próbek był zanieczyszczony arsenem (5%), nieco większy kadmem i ołowiem (ok. 10%). Niepokojący jest znaczny udział osadów o podwyższonej zawartości rtęci (20%).



Rys. 4. Procentowy udział osadów rzek w danej klasie zanieczyszczenia pierwiastkami śladowymi według kryteriów geochemicznych na podstawie krajowego monitoringu

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GIOŚ (14)

Tabela 5

Udział (%) klas zanieczyszczenia osadów rzecznych pierwiastkami śladowymi na podstawie badań monitoringowych w 2012 r. (14)

Pierwiastek	Niezanieczyszczone	Miernie zanieczyszczone	Zanieczyszczone	Silnie zanieczyszczone
Srebro (Ag)	96,73	1,82	0,73	0,73
Arsen (As)	95,27	4,00	0,36	0,36
Bar (Ba)	74,55	23,64	1,82	0
Kadm (Cd)	89,45	8,73	1,09	0,73
Kobalt (Co)	96,73	3,27	0	0
Chrom (Cr)	84,36	13,82	1,82	0
Miedź (Cu)	82,91	16,00	1,09	0
Rtęć (Hg)	80,36	14,55	3,27	1,82
Nikiel (Ni)	55,27	42,18	2,17	0,36
Ołów (Pb)	90,55	7,64	1,45	0,36
Cynk (Zn)	89,09	8,36	1,45	1,09

Przeprowadzone analizy pozwalają stwierdzić, iż zawartość potencjalnie szkodliwych pierwiastków w osadach rzecznych jest zazwyczaj większa niż w przypadku osadów dennych jezior. Obserwacja ta wynika z faktu, że obiekty przemysłowe i aglomeracje miejskie znacznie rzadziej występują na terenie Pojezierzy (14), natomiast częściej są zlokalizowane w regionach południowych, gdzie położone są również górne części biegu głównych rzek kraju. Liczba przypadków przekroczeń zawartości granicznych jest również większa w przypadku osadów rzek niż osadów jeziornych, zarówno dla pierwiastków śladowych, jak i TZO (tab. 6).

Pomiary monitoringowe TZO w osadach dennych rzek wykazują przekroczenia zawartości benzo(a)pirenu i sumy WWA oraz podwyższone zawartości sumy PCB i sumy DDT. Największe stężenia benzo(a)pirenu oraz sumy WWA stwierdzono w osadach rzeki Orzyszy, odpowiednio $3080 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ i $31649 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; Σ PCB ($487,6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) w osadach rzeki Proсны, a Σ DDT ($15\,321 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) w próbkach pobranych z osadów dennych na Wiśle. Przekroczenie dopuszczalnych zawartości TZO w stosunku do kryteriów podanych w Rozporządzeniu z 2002 r. (26) wystąpiło głównie na obszarze południowej Polski, w rejonach górnej i środkowej Odry oraz górnej i częściowo środkowej Wisły. Wysokie stężenia benzo(a)pirenu i polichlorowanych bifenyli w osadach rzek z tych rejonów są wynikiem odprowadzania do rzek dużych ładunków zanieczyszczeń z przemysłu i transportu oraz ścieków z dużych aglomeracji miejskich. Pomimo zakazu stosowania DDT, który obowiązuje w rolnictwie od ponad 40 lat, ciągle spotyka się wysokie stężenia tego insektycydu w środowisku. Wysokie zawartości DDT w osadach rzek mogą wynikać także z wymywania tych związków ze składowisk odpadów.

Tabela 6

Liczba przypadków przekroczeń zawartości dopuszczalnych w 2012 r. według Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 16 kwietnia 2002 r. w zależności od typu osadu

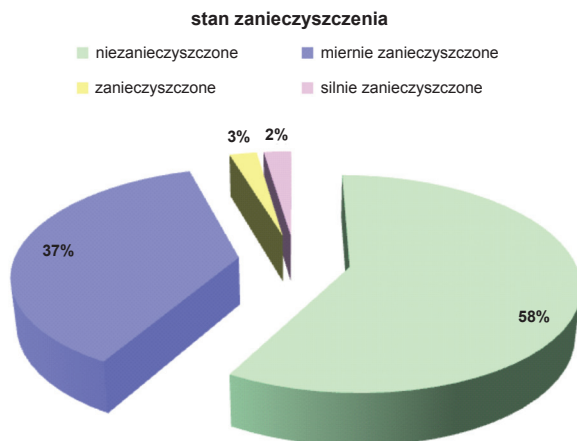
Rodzaj zanieczyszczenia	Osady jezior	Osady rzeczne	Osady kanałów i zbiorników zaporowych
Arsen (As)	2	2	0
Kadm (Cd)	0	4	1
Chrom (Cr)	1	3	0
Miedź (Cu)	1	2	0
Rtęć (Hg)	0	5	0
Nikiel (Ni)	0	0	0
Ołów (Pb)	1	5	2
Cynk (Zn)	1	3	1
Benzo(a)piren	5	8	2
Σ 7 PCB	1	1	0

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GIOS (14)

Zanieczyszczenia osadów dennych kanałów rzecznych i zbiorników zaporowych

Badania monitoringowe prowadzone w naszym kraju obejmują również osady kanałów rzecznych i zbiorników zaporowych. Osady do analiz są pobierane z 20 zbiorników zaporowych oraz 12 kanałów rzecznych. Najbardziej aktualne dane z 2013 wskazują, iż 58,14% osadów nie jest zanieczyszczonych pierwiastkami śladowymi, natomiast 37,21% wykazuje zanieczyszczenie w stopniu miernym (rys. 5).

Szczegółowe dane dotyczące zanieczyszczenia osadów dennych kanałów i zbiorników zaporowych poszczególnymi pierwiastkami przedstawia tabela 7 (14). Najwięcej próbek osadów kanałów i zbiorników o podwyższonej zawartości wystąpiło dla baru (30%), miedzi (25%) i chromu (16%). Silne zanieczyszczenie notowano jedynie w pojedynczych przypadkach dla kadmu, ołowiu i cynku. Najbardziej zanieczyszczone osady tymi pierwiastkami pochodziły z kanału Matylda koło Chrzanowa, który w przeszłości służył do odprowadzania wód kopalnianych z kopalni rud Zn-Pb „Matylda” (1). Pomimo, że kopalnia została zamknięta w 1972 r., wody niewielkiego kanału nadal odprowadzają zanieczyszczenia związane z działalnością przemysłową. Osady denne kanału zawierają ekstremalnie wysokie zawartości ołowiu (sięgające ponad 1,7% s.m.), kadmu (do 404 mg·kg⁻¹ s.m.) i cynku (do 4,7% s.m.). Stosunkowo małe zawartości powyższych metali w wodzie i roślinach sugerują, że bardzo duże ich stężenia w osadach dennych mają mniejszy wpływ toksyczny na makrofity niż wskazują to kryteria ekotoksykologiczne (1). Ekstremalnie zawartości kadmu i ołowiu powodują natomiast trudności z określeniem bezpiecznych sposobów postępowania z osadami tego kanału.



Rys. 5. Procentowy udział osadów dennych kanałów i zbiorników zaporowych w klasach zanieczyszczenia pierwiastkami śladowymi, zgodnie z kryteriami geochemicznymi
 Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GIOŚ (14)

Badania osadów pochodzących z kanałów rzecznych i zbiorników zaporowych na obecność w nich trwałych zanieczyszczeń organicznych wykazały, iż WWA stanowią główną grupę substancji szkodliwych (14). Jedynie w osadach dennych kanałów Maszówek i Młyński stwierdzono przekroczenia dopuszczalnych zawartości dla benzo(a)pirenu (2790 μg·kg⁻¹ i 1168 μg·kg⁻¹) oraz sumy WWA (30822 μg·kg⁻¹ i 11869 μg·kg⁻¹). Nie stwierdzono natomiast przekroczeń zawartości Σ7PCB, Σ3HCH, heksachlorobenzenu oraz sumy DDT.

Tabela 7

Procentowy udział osadów dennych kanałów rzecznych i zbiorników zaporowych zanieczyszczonych pierwiastkami śladowymi

Pierwiastek	Niezanieczyszczone	Miernie zanieczyszczone	Zanieczyszczone	Silnie zanieczyszczone
Srebro (Ag)	97,67	2,33	0	0
Arsen (As)	95,35	4,65	0	0
Bar (Ba)	69,77	27,91	2,33	0
Kadm (Cd)	97,67	0	0	2,33
Kobalt (Co)	95,35	4,65	0	0
Chrom (Cr)	83,72	16,28	0	0
Miedź (Cu)	76,74	23,26	0	0
Rtęć (Hg)	86,05	13,95	0	0
Nikiel (Ni)	86,05	13,95	0	0
Ołów (Pb)	95,35	2,33	0	2,33
Cynk (Zn)	95,35	2,33	0	2,33

Źródło: opracowanie własne na podstawie badań monitoringowych (14)

H a z i a k i i n . (16) przeprowadzili badania, które dotyczyły oceny przestrzennej zawartości cynku w osadach dennych zbiornika Czorsztyńskiego. Średnie zawartości cynku minimalnie przekraczały naturalny poziom tego pierwiastka dla analizowanego obszaru. Ponadto osady denne Zbiornika Czorsztyńskiego charakteryzowały się znacznym przestrzennym zróżnicowaniem zawartości tego metalu (36-118 mg·kg⁻¹ s.m.). Zaobserwowano również korelacje pomiędzy zawartością Zn w osadach dennych a substancją organiczną, frakcją ilastą, a także zawartościami żelaza, niklu i miedzi. Największe zawartości Zn zmierzono w punktach pomiarowych niedaleko zapory oraz w pobliżu dawnego koryta Dunajca. Na terenie zbiornika stężenie cynku nie przekraczało wartości progowych tzw. LEL (ang. *Lowest Effect Level*) – określających poziom zanieczyszczenia osadów, gdzie negatywny wpływ na organizmy bentosowe zaczyna być zauważalny.

Z kolei B ą k i i n . (4) zanotowali duże przestrzenne zróżnicowanie zawartości pierwiastków w osadach dennych zbiornika Suchedniów. Największe zawartości takich pierwiastków jak: Cr, Zn, Cu, Cd zanotowano w pobliżu zapory czołowej, natomiast w górnych partiach akwenu stwierdzono wysokie zawartości Pb, Cd, Ni. W badaniach tych do oszacowania stanu zanieczyszczenia osadów wykorzystano takie parametry jak indeks geoakumulacji, współczynnik zanieczyszczenia, stopień zanieczyszczenia, klasy czystości osadów oraz odnoszono się do Rozporządzenia Ministra Środowiska dotyczącego oceny stanu chemicznego wód podziemnych. Z klasyfikacji tej wynikało, iż osady denne były rozmaicie zanieczyszczone pierwiastkami śladowymi, od poziomu umiarkowanego aż do określonego jako silne zanieczyszczenie. Stosując nieco inne podejście do oceny, a mianowicie charakterystykę porównawczą pomiędzy

zawartością pierwiastka a jego tłem geochemicznym, autorzy stwierdzili, że brak było przekroczeń dla Cr, Cu, Ni, Zn, natomiast wzbogacenie zaobserwowano dla Pb i Cd.

Dąbrowska (9) prowadziła badania na temat poziomu oraz frakcji metali ciężkich w osadach dennych zbiornika Kozłowa Góra. Z analiz tych wynika, iż największe zawartości zanotowano dla cynku uznając osad jako zanieczyszczony wg klasyfikacji geochemicznej. Wartość PEL (*Probable Effect Level*), określająca zawartość pierwiastka, powyżej której toksyczny wpływ na organizm jest prawdopodobny, została przekroczona w odniesieniu do kadmu ($PEL = 3,5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) w dwóch punktach pomiarowych, cynku ($PEL = 315 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) w jednej lokalizacji oraz ołowiu ($PEL = 91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) w wszystkich miejscach pobrania materiału do badań. Cechą charakterystyczną tych osadów był niewielki udział frakcji wymiennej pierwiastków w ich całkowitej zawartości. Frakcje związków w zasadzie nierozpuszczalnych zawierały najwięcej cynku oraz chromu. We frakcji organiczno-siarczkowej w największym stopniu była obecna miedź, a nikiel oraz ołów występował w znacznym stopniu w połączeniu z węglanami. W zależności od miejsca pobrania próbek, kadm występował w przeważającej ilości we frakcji uwodnionych tlenków żelaza oraz manganu bądź we frakcji węglanowej (9).

Badania Senze i in. (29) dotyczyły z kolei akumulacji miedzi, niklu, kadmu, ołowiu i cynku w osadach dennych zbiornika Owiesno, położonego na terenie województwa dolnośląskiego, w zależności od pory roku. Przeprowadzone analizy wykazały, że osady denne z okresu wiosennego, letniego i jesiennego zaliczyć można do I i II klasy czystości według klasyfikacji opartej na kryteriach geochemicznych, natomiast w okresie zimowym nastąpiło podwyższenie zawartości badanych pierwiastków śladowych. Zanotowano wysokie współczynniki akumulacji metali w osadzie, określane poprzez stosunek zawartości pierwiastka w osadzie do jego stężenia w wodzie. Stan ten obserwowano szczególnie w okresie zimowym, pomimo, że stężenia pierwiastków w wodzie z reguły pozostawały w granicach określonych dla wód niezanieczyszczonych. Odczyn osadów dennych, decydujący o mobilności pierwiastków, wahał się znacznie w czterech okresach roku, od 4,05 w okresie letnim do 7,23 w okresie wiosennym.

Gierszewski (15) badał czynniki wpływające na zmienność akumulacji pierwiastków śladowych w osadach zbiornika wrocławskiego. Koncentracja przeanalizowanych pierwiastków śladowych była większa od poziomu tła geochemicznego (szczególnie kadmu, cynku, ołowiu oraz arsenu) a zawartość pierwiastków była w największym stopniu skorelowana z zawartością materii organicznej oraz uwodnionych tlenków żelaza w osadzie.

Sztuczny zbiornik Włocławek był również obiektem badań Urbaniak i in. (35). W badaniach porównano zawartości polichlorowanych dibenzodioskyn (PCDD) i polichlorowanych dibenzofuranów (PCDF) w osadach dennych 3 sztucznych zbiorników wodnych: Włocławek na Wiśle, Jeziorsko na Warcie i Sulejów na Pilicy. Zbiorniki te reprezentowały, odpowiednio, zlewnie o typie przemysłowo-miejsko-rolniczym, miejsko-rolniczym i rolniczym. Zawartości dioksyn i ich pochodnych w osadach

dennych są niezmiernie rzadko badane z uwagi na duży koszt badań oraz ograniczoną dostępność wyspecjalizowanego sprzętu analitycznego. Analizy wykazały znacznie niższe zawartości PCDD/PCDF w osadach zbiornika Sulejów niż w osadach pozostałych zbiorników (suma PCDD /PCDF wynosiła 176-224 ng·kg⁻¹ w zbiorniku Sulejów oraz 269-518 ng·kg⁻¹ i 515-765 ng·kg⁻¹, odpowiednio w zbiornikach Jeziorsko i Włocławek), wskazując, że w zlewniach o charakterze miejskim i przemysłowym można spodziewać się wystąpienia większego zagrożenia środowiskowego ze strony TZO zawartych w osadach dennych. Z kolei analizy próbek wodnych w strefie wlotowej do zbiornika i po wyjściu ze zbiornika wskazują na znaczną redukcję PCDD/PCDF w wodach w wyniku akumulacji w osadach dennych oraz biologicznych przemian tych związków w obrębie zbiornika. Fakt ten sugeruje mniejsze ryzyko zanieczyszczenia tymi związkami obszarów nadmorskich oraz pozytywną rolę zbiorników dla jakości wód rzecznych. Z drugiej strony zjawiska znacznej akumulacji TZO w osadach dennych powodują, że sposoby zagospodarowania tych osadów są problemem bardziej złożonym i wymagają szczegółowych badań.

Zagospodarowanie osadów dennych

Badania nad zagospodarowaniem przyrodniczym osadów dennych są nieliczne. Gałka i Wiątkowski (12) określili obciążenia zanieczyszczeniami osadów w niewielkich zbiornikach wodnych umiejscowionych przy zlewniach rolniczych, które w tym przypadku były reprezentowane przez zbiornik Psurów. Analizy wykazały, iż przebadane osady denne są potencjalnie niezanieczyszczone, a zawartości pierwiastków podobne do ich naturalnej koncentracji. W związku z tym Autorzy stwierdzili, że istnieje możliwość rolniczego wykorzystania tych osadów bez szkody dla ekosystemu glebowego.

Badania nad możliwością wykorzystania osadów dennych do odnowy parku umiejscowionego we Wrocławiu-Pawłowicach prowadził Gałka (13). Przeprowadzone analizy dotyczyły zawartości pierwiastków śladowych i WWA w osadach dennych pochodzących ze stawów i rowów znajdujących się w parku. Zawartości zanieczyszczeń w osadach dennych nie przekraczały norm zawartych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 16 kwietnia 2002 r. (Dz. Ustaw z 2002 r. Nr 55 poz. 498) oraz Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w (Dz. Ustaw z 2002 r. Nr 165 poz. 1359) (28, 29). Zawartość jednego z WWA - indeno(1,2,3-c,d)piranu, osiągała 90% wartości dozwolonej, natomiast stężenia pozostałych WWA występowały na poziomie 5 - 45% ówczesnego dopuszczalnego poziomu. Autor przeprowadził dodatkowe testy wykorzystania osadów dennych do celów rekultywacyjnych. Obszar poddany działaniom stanowił teren parku, oraz wyrobisko dawnej piaskowni. Zdaniem Gałki (13), wykorzystanie urobku z oczyszczania stawów do odnowy terenu parku jest alternatywą dla traktowania osadów dennych jako odpadów. Poza tym osady zawierają potrzebne roślinom makroskładniki oraz materię organiczną (13).

Baran i in. (3) prowadzili badania na temat wpływu osadu dennego pochodzącego ze zbiornika Besko na plonowanie i zawartość makroelementów w biomacie kukurydzy. Jak wynika z przeprowadzonych badań, osad denny zaaplikowany do gleby lekkiej wpłynął pozytywnie na plon kukurydzy, jednakże dotyczyło to wyłącznie dawki odpowiadającej 5% masy gleby. Większe dawki osadu dodawanego do gleby wpływały niekorzystnie na plon i jak można sądzić mogą być jedynie rozpatrywane w celach rekultywacyjnych, gdzie osad jest potencjalnie wprowadzany do podłoża bezglebowego jako element strukturotwórczy i glebotwórczy, a następnie wysiewane są odporne rośliny rekultywacyjne (trawy).

Podsumowanie

Z uwagi na fakt, że osady denne usuwane są jedynie w przypadkach nadmiernego wypłykania się jezior, zbiorników lub w razie potrzeby udrożnienia rzek, problem bezpiecznego zagospodarowania osadów jest niedoceniony. W związku z tym badania nad sposobami zagospodarowania osadów dennych są nieliczne oraz brak jest dedykowanych temu zagadnieniu regulacji prawnych. Jedynie Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 maja 2015 r. w sprawie odzysku odpadów poza instalacjami i urządzeniami (27) wymienia metodę odzysku R5 jako potencjalny sposób zagospodarowania osadów dennych, np. do budowy i utrzymania obiektów hydrotechnicznych, takich jak sztuczne wyspy, nabrzeża, wały, zabezpieczenia brzegu i inne, lub utwardzania powierzchni – pod warunkiem, że urobek nie jest zanieczyszczony.

Dostępne badania naukowe wskazują na dużą zmienność zawartości pierwiastków śladowych w osadach jezior, również zmienność przestrzenną i sezonową w obrębie tego samego obiektu. W przypadku rzek, jakość osadów dennych w dużej mierze zależy od wielkości koryta rzeki, terenu przez jaki przepływa oraz charakteru zlewni.

Najbardziej obszernych danych dotyczących zawartości zanieczyszczeń w osadach dennych dostarcza krajowy monitoring jakości osadów dennych, realizowany przez PIG-PIB, a koordynowany przez GIOŚ. Monitoring ten stanowi element Państwowego Monitoringu Środowiska. Z analiz na poziomie kraju wynika, iż osady jezior są z reguły bardziej zanieczyszczone WWA oraz PCB niż osady rzeczne. Jednak najwyższe zawartości TZO obserwowane w osadach rzecznych są wyższe niż maksymalne wartości zmierzone w osadach pochodzących z jezior. W przypadku pierwiastków śladowych więcej przypadków zanieczyszczonych osadów stwierdza się w rzekach niż w jeziorach.

Potencjalnie osady denne mogą być zagospodarowywane w rekultywacji gleb, jednak takie wykorzystanie osadów może odbywać się jedynie w bezpieczny środowiskowo sposób. Niezbędne są zatem obszerne badania nad biodostępnością zanieczyszczeń, również tych rzadziej oznaczanych, w celu rozpoznania zagrożenia środowiskowego, oraz metodami uzdatniania osadów przed ich utylizacją.

Literatura

1. Aleksander-Kwaterczak U., Ciszewski D., Szarek-Gwiazda E., Kwandrans J., Wilk-Woźniak E., Waloszek A.: Wpływ historycznej działalności kopalni rud Zn-Pb w Chrzanowie na stan środowiska wodnego doliny Matyldy. *Górnictwo i Geologia*, 2010, **4**: 21-30.
2. Barbusiński K., Nocoń W.: Zawartość związków metali ciężkich w osadach dennych Kłodnicy. *Ochrona Środowiska*, 2011, **33(1)**: 13-17.
3. Baran A., Jasiewicz Cz., Tarnawski M.: Wpływ osadów dennych pobranych ze zbiornika Besko na plon i zawartość makroelementów w biomacie kukurydzy. *Proceedings of EC Opole 2013*, **7(1)**: 193-198.
4. Bąk Ł., Górski J., Rabajczyk A., Szwed M.: Zawartość związków metali ciężkich w osadach dennych zbiornika Suchedniów. *Proceedings of ECOpole 2013*, **7(1)**: 287-294.
5. Bielak S.: Zanieczyszczenia antropogeniczne w osadach dennych rzek Biebrzańskiego Parku Narodowego. *Ekoprofit*, 2006, **1**: 73-81.
6. Bojowska I., Sokołowska G.: Geochemiczne klasy czystości osadów wodnych. *Przegląd Geologiczny*, 1998, **46(1)**: 49-54.
7. Bojowska I.: Kryteria oceny zanieczyszczenia osadów wodnych. *Przegląd Ekologiczny* 2001, **49(3)**: 213-218.
8. Cieśliewicz J.: Zróżnicowanie właściwości fizykochemicznych osadów dennych pięciu jezior Pojezierza Iławskiego. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 2011, **50**: 156-169.
9. Dąbrowska L.: Specjacja metali ciężkich w osadach dennych zbiornika Kozłowa Góra. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 2011, **49**: 354-364.
10. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/105/WE z dnia 16 grudnia 2008 r. w sprawie środowiskowych norm jakości w dziedzinie polityki wodnej, zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy Rady 82/176/EWG, 83/513/EWG, 84/156/EWG, 84/491/EWG i 86/280/EWG oraz zmieniająca dyrektywę 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady (Dz.U.UE L z dnia 24 grudnia 2008 r.).
11. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2000/60/WE z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej (Dz.U.UE L z dnia 22 grudnia 2000 r.).
12. Gałka B., Wiątkowski M.: Metale ciężkie w wodzie i osadach dennych małego zbiornika wodnego Psurów. *Ochrona środowiska i Zasobów Naturalnych*, 2010, **42**: 235-232.
13. Gałka B.: Ocena stopnia zanieczyszczenia i możliwość zagospodarowania osadów dennych z małych obiektów wodnych w parku we Wrocławiu-Pawłowicach. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 2010, **42**: 233-239.
14. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, 2012.
<http://ekoinfonet.gios.gov.pl/osady/mapa/Programy/2012.pdf>
15. Gierszewski P.: Koncentracja metali ciężkich w osadach zbiornika wrocławskiego jako wskaźnik hydrodynamicznych warunków depozycji. *Landform Analysis*, 2008, **9**: 79-82.
16. Haziak T., Czaplicka-Kotas A., Ślusarczyk Z., Szalińska E.: Przestrzenne zmiany stężeń cynku w osadach dennych Zbiornika Czortyńskiego. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2013, **1**: 57-68.
17. Ibragimow A., Głosińska G., Siepak M., Walna B.: Heavy metals in sediments of the Odra River Floyd-plains – introductory research. *Quaestiones Geographicae*, 2010, **29(1)**: 37-47.

18. Kazimierowicz Z., Kazimierowicz J.: Badania zawartości metali ciężkich w zlewni rzeki Biebrzy i jej trzech dopływów. *Inżynieria Ekologiczna*, 2014, **40**: 25-32.
19. MacDonald D., Ingersoll C., Berger T.: Development and evaluation of consensus-based sediment development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, **39**: 20-31.
20. Mioduszewski W., Ślesicka A., Okruszko T.: Wybrane problemy gospodarowania wodą w Dolinie Biebrzy. W: *Kotlina Biebrzańska i Biebrzański Park Narodowy. Aktualny stan, walory, zagrożenia i potrzeby czynnej ochrony środowiska*. Białystok: Wydaw. WEŚ, 2004, 214-264.
21. Mucha A.P., Vasconcelos M.T.S.D., Bordalo A.A.: Macro benthic community In the Douro Estuary: relations with heavy metals and natural sediment characteristic. *Environmental Pollution*, 2003, **121**: 169-180.
22. Nocoń W.: Zawartość metali ciężkich w osadach dennych rzeki Kłodnicy. *Journal of Elementology*, 2006, **11(4)**: 457-466.
23. Nocoń W.: Metale ciężkie w osadach dennych wybranych dopływów rzeki Kłodnicy. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2009, **12(1)**: 65-76.
24. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 15 listopada 2011 r. w sprawie form i sposobu prowadzenia monitoringu jednolitych części wód powierzchniowych i podziemnych (Dz. U. z 2011 r. Nr 258 poz. 1550).
25. Rozporządzenie Ministra środowiska z dnia 20 sierpnia 2008 r. w sprawie klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych. (Dz. U. 2008r. Nr 162 poz. 1008).
26. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 16 kwietnia 2002 r. w sprawie rodzajów oraz stężeń substancji, które powodują, że urobek jest zanieczyszczony (Dz. U. z 2002 Nr 55 poz. 498).
27. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 maja 2015 r. w sprawie odzysku odpadów poza instalacjami i urządzeniami (Dz. U. z 2002 r. Nr 165 poz. 1359).
28. Rubin H., Rubin K., Siodłak A., Skuz a P.: Ocena zanieczyszczenia wybranymi metalami i metaloidami osadów dennych rzeki Stoły na terenie miejsko-przemysłowym Tarnowskich Gór. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 2011, **445**: 615-624.
29. Senze M., Kowalska-Góralaska M., Zięba M.: Bioakumulacja miedzi, niklu, kadmu, ołowiu i cynku w osadach dennych zbiornika Owiesno (województwo dolnośląskie). *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Biologia i Hodowla Zwierząt*, 2010, **577**: 125-133.
30. Sidoruk M., Potasznik A.: Ocena stanu zanieczyszczenia ołowiem, cynkiem i chromem osadów dennych jeziora Sunia. *Proceedings of ECOpole 2013*, **7(2)**: 713-720.
31. Sojka M., Siepak M., Gnojska E.: Ocena zawartości metali ciężkich w osadach dennych wstępnej części zbiornika retencyjnego Stare Miasto na rzece Powie. *Ochrona środowiska*, 2013, **15**: 1916-1928.
32. Szafrań K.: Metale ciężkie w osadach dennych trzech płytkich jezior Łęczyńsko-Włodawskich. *Acta Agrophysica*, 2003, **1(2)**: 329-337.
33. Szalińska E., Koperczak A., Czaplicka-Kotas A.: Badania zawartości metali ciężkich w osadach dennych dopływów Jeziora Goczałkowickiego. *Ochrona Środowiska*, 2010, **32(1)**: 21-25.
34. Trojanowski J., Antonowicz J.: Właściwości chemiczne osadów dennych jeziora Dołgie Wielkie. *Śląskie prace biologiczne*, 2005, **2**: 122-133.

-
35. Urbaniak M., Kiedrzyńska E., Zieliński M., Tołoczko W., Zalewski M.: Spatial distribution and reduction of PCDD/PCDF toxic equivalents along three shallow lowland reservoirs. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2014, **21**: 4441-4452.
 36. Wojtkowska M., Bogacki J.: Wykorzystanie analizy specyacyjnej w monitoringu metali ciężkich w osadach dennych na przykładzie rzeki Utraty. *Ochrona Środowiska*, 2012, **4(34)**: 44-46.
-

Adres do korespondencji:

*mgr inż. Sylwia Siebielec
Zakład Mikrobiologii Rolniczej
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. (81) 47 86 952
email: sstaniak@iung.pulawy.pl*

