

Jolanta Latosińska\*, Jarosław Gawdzik\*

**MOBILNOŚĆ METALI CIĘŻKICH W KOMUNALNYCH OSADACH  
ŚCIEKOWYCH Z PRZYKŁADOWYCH OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW  
POLSKI CENTRALNEJ**

**MOBILITY OF HEAVY METALS IN MUNICIPAL SEWAGE SLUDGE  
FROM DIFFERENT SEWAGE TREATMENT PLANTS FROM CENTRAL  
POLAND**

**Słowa kluczowe:** osady ściekowe, metale ciężkie, ekstrakcja sekwencyjna, specjacja metali.

**Key words:** sewage sludge, heavy metal, sequential extraction, metal speciation.

**Streszczenie**

*W pracy przedstawiono wyniki badań mobilności metali ciężkich. Zastosowano metodę proponowaną przez Community Bureau of Reference (BCR). Badano osady z pięciu komunalnych oczyszczalni ścieków Polski centralnej, różniących się przepustowością i sposobem stabilizacji osadów ściekowych. Wykazano, że metale ciężkie występowały głównie we frakcjach niemobilnych osadów nie mając istotnego znaczenia w aspekcie toksykologicznym. Nie wykazano wyraźnego wpływu przepustowości oczyszczalni ścieków na formy występowania metali ciężkich we frakcjach BCR. Wysunięto hipotezę, że formy miedzi w osadach ściekowych są cechą charakterystyczną tego pierwiastka. Udział procentowy cynku, ołowiu, kadmu, niklu, chromu we frakcjach BCR uzyskanych metodą ekstrakcji osadów ściekowych nie zależał istotnie od sposobu stabilizacji osadów.*

---

\* Dr inż. Jolanta Latosińska, dr inż. Jarosław Gawdzik – Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Inżynierii i Ochrony Środowiska, Zakład Gospodarki Odpadami, Politechnika Świętokrzyska, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce; tel.: 41 342 45 71; e-mail: jlatosin@tu.kielce.pl; tel.: 41 342 45 71; e-mail: jgawdzik@tu.kielce.pl

## Summary

*The article presents the results of heavy metal mobility research. The methodology used in the research was suggested by the Community Bureau of Reference (BCR). The examined sludge was supplied by five municipal sewage treatment plants of different capacity and methods of sewage sludge stabilization. It was proved that heavy metals were present mainly in immobile sludge fractions without any significance for a toxicological aspect. The capacity of sewage treatment plants did not demonstrate an explicit influence on the forms of heavy metals present in BCR fractions. A hypothesis was formulated that copper forms in sewage sludge are the characteristic feature of this chemical element. The percentage contribution of zinc, lead, cadmium, nickel and chromium in BCR fractions obtained using the method of sewage sludge extraction did not depend significantly on the method of sludge stabilization.*

## 1. WPROWADZENIE

W Polsce, podobnie jak w pozostałych krajach Unii Europejskiej, ilość powstających komunalnych osadów ściekowych zwiększa się [Fytli i in. 2008; Eurostat 2011]. Jedną z przyczyn tej sytuacji jest zaostrzenie wymogów jakości ścieków odprowadzanych do odbiorników wodnych [Council Directive 1991].

Zawartość substancji organicznych, nutrientów (N, P, K) i mikroelementów predysponuje osady ściekowe do przyrodniczego wykorzystania [Rogers 1996; Wang 1997]. Poza pożądanymi składnikami, istotnymi ze względu na rolnicze wykorzystanie, osady ściekowe zawierają substancje toksyczne, między innymi metale ciężkie. Metale ciężkie w ilościach śladowych są niezbędne do życia roślin i zwierząt, ale w większych stężeniach są toksyczne, rakotwórcze oraz biokumulują się w organizmach żywych [Krogmann i in. 1999].

Obecność metali ciężkich w osadach ściekowych, a zwłaszcza ich duże koncentracje, są wynikiem udziału w tych osadach ścieków przemysłowych (np.: garbarskich, lakierniczych i hutniczych) w ogólnej masie ścieków miejskich [Weiner, Matthews 2003]. Ponadto metale ciężkie pochodzą ze ścieków bytowych, spływów powierzchniowych oraz występują w ściekach w następstwie korozji przewodów kanalizacyjnych [Werther, Ogada 1999]. W osadach ściekowych metale ciężkie występują w postaci rozpuszczonej, wytrąconej, współstrąconej z tlenkami metali, zaadsorbowane lub zasocjowane na cząstkach resztek biologicznych. Mogą mieć formę tlenków, wodorotlenków, siarczków, siarczanów, fosforanów, krzemianów, organicznych połączeń w postaci kompleksów huminowych oraz związków z cukrami złożonymi [De la Guardia, Morales-Rubio 1996].

Znane chemiczne metody usuwania metali ciężkich z osadów ściekowych nie znalazły zastosowania ze względu na wysokie koszty, trudności operacyjne i niską efektywność

[Ryu i in. 2003]. Metody mikrobiologiczne prowadzące do usunięcia metali ciężkich z osadu ściekowego i przejścia do odcieku są natomiast w fazie badań [Xiang i in. 2000].

Limity metali ciężkich w aspekcie zastosowania przyrodniczego osadów ściekowych reguluje w Polsce rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 lipca 2010 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych, zgodne z Council Directive of 12 June 1986 [1986] (tab. 1). Obowiązujące przepisy, podobnie jak projektowane zmiany od roku 2015 i 2025 [ENV/E.3/LM] (tab.1.), dotyczą sumarycznej zawartości ołowiu, kadmu, rtęci, niklu, cynku, miedzi i chromu. Uogólnienie to nie służy pozyskaniu informacji o potencjalnym zagrożeniu środowiska gruntowo-wodnego emisją metali ciężkich, ponieważ biodostępność i toksyczność metali ciężkich zależy od ich formy występowania (tab. 2.).

**Tabela 1.** Dopuszczalne udziały metali ciężkich w komunalnych osadach ściekowych przeznaczonych do stosowania przyrodniczego według obowiązujących normatywów i planowanych zmian

**Table 1.** Admissible fractions for heavy metals in municipal sewage sludge designed for environmental use in accordance with current standards and planned changes

Metal	Dopuszczalne zawartości metali ciężkich w osadach ściekowych przeznaczonych do stosowania, mg/kg s.m.						
	w nawozach organiczny wg Rozp. Min. Rol. i Rozw. Wsi (Dz. U. Nr 119, poz. 765, 2008)	w rolnictwie			według rozp. Min. Środ. (Dz. U. Nr 137, poz. 924, 2010)		
		według 1986/278/EEC – obowiązujące	według NV/E.3/LM – proponowane zmiany		w rolnictwie oraz do rekultywacji gruntów na cele rolne	do rekultywacji terenów na cele nierolne	przy dostosowaniu gruntów do określonych potrzeb*
			2015 r.	2025 r.			
Pb	140	750–1200	500	200	750	1000	1500
Cd	5	20–40	5	2	20	25	50
Hg	2	16–25	5	2	16	20	25
Ni	60	300–400	200	100	300	400	500
Zn	nienormowane	2500–4000	2000	1500	2500	3500	5000
Cu	nienormowane	1000–1750	800	600	1000	1200	2000
Cr	100	–	800	600	500	1000	2500

\* Wynikających z planów gospodarki odpadami, planów zagospodarowania przestrzennego lub decyzji o warunkach i zagospodarowaniu terenu, do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu, do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i produkcji pasz.

**Tabela 2.** Schemat ekstrakcji sekwencyjnej używanej do rozdzielania próbek osadów [Chen i in. 2008]

**Table 2.** Sequential extraction schema used for the separation of sediment samples [Chen et al. 2008]

Frakcja/forma występowania	Wersja rozszerzona [Kersten & Forstner, 1986]	Wersja EC/BCR
Jony wymienne	1 mol/l $\text{CH}_3\text{COONH}_4$	Do 0.5 g osadu należy dodać 20ml $\text{CH}_3\text{COOH}$ 0,11 mol/l. Wyrząsać 16h
Metale związane z węglanami	1 mol/l $\text{CH}_3\text{COONa}$ , pH=5 w/ $\text{CH}_3\text{COOH}$	
Frakcje łatwo redukowalne (np. tlenki Mn)	0,01 mol/l $\text{NH}_2\text{OH HCl}$ w/ 0,01 mol/l $\text{HNO}_3$	Do pozostałości z powyższego należy dodać: 20ml $\text{NH}_2\text{OH HCl}$ o stęż. 0,1 mol/l $\text{HNO}_3$ (pH =2) Wyrząsać 16h
Frakcje średnio redukowalne (np. tlenki Fe)	0,1 mol/l buforu szczawio- wego pH=3	
Siarczki/ Frakcja organiczna	30% $\text{H}_2\text{O}_2$ pH=2/ 0,02 mol/l $\text{HNO}_3$ ekstrakcja za pomocą 1 mol/l $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ , 6% $\text{HNO}_3$	10 ml $\text{H}_2\text{O}_2$ 8,8 mol/l (x2); 50ml $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ o stęż. 1 mol/l Wyrząsać 16h
Frakcja rezydualna	gorące, stężone $\text{HNO}_3$	$\text{HNO}_3$ + HCl

Stosowane techniki analityczne umożliwiają określenie stężenia form mobilnych metali ciężkich [Dahlin i in. 2002]. Do badania osadów ściekowych powszechnie stosowana jest następująca procedura **Community Bureau of Reference (BCR)** [Alvarez i in. 2002; Pitt i in. 1999]:

- 1) **Etap I:** ekstrakcja  $\text{CH}_3\text{COOH}$  – mająca na celu zidentyfikowanie i pomiar zawartości metali przyswajalnych i związanych z węglanami (frakcja I);
- 2) **Etap II:** ekstrakcja  $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$  – w celu zidentyfikowania i pomiaru zawartości metali związanych z amorficznymi tlenkami żelaza i manganu (frakcja II);
- 3) **Etap III:** ekstrakcja  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{CH}_3\text{COONH}_4$  – w celu zidentyfikowania i pomiaru zawartości frakcji metaloorganicznej i siarczkowej (frakcja III);
- 4) **Etap IV:** mineralizacja frakcji rezydualnej mieszaniną stężonych kwasów (HCl,  $\text{HNO}_3$ ) – w celu zidentyfikowania i pomiaru zawartości metali związanych z krzemianami (frakcja IV).

## 2. CEL, MATERIAŁY I METODY BADAŃ

Celem przeprowadzonych badań była ocena mobilności metali ciężkich w osadach ściekowych z wybranych oczyszczalni ścieków, różniących się przepustowością i sposobem stabilizacji osadów ściekowych.

**Przygotowanie próbek.** Do badań wykorzystano komunalne osady ściekowe pobrane zgodnie z PN-EN ISO 5667-13:2004 z pięciu komunalnych oczyszczalni ścieków zlokalizowanych w Polsce Centralnej (tab. 3).

**Tabela 3.** Osady ściekowe pobrane z oczyszczalni ścieków komunalnych

**Table 3.** Municipal sludge collected from municipal wastewater treatment plants

Oznaczenie próby	Nazwa miejscowości	Typ oczyszczalni ścieków	Równoważna liczba mieszkańców, RLM	Sposób stabilizacji osadów	Sposób wykorzystania osadów
S1	Kostomłoty-Laskowa	mechaniczno-biologiczna SBR	3000	tlenowa mezofilna stabilizacja osadów	rekultywacja gruntów
S2	Strawczyn	mechaniczno-biologiczna	6800	tlenowa mezofilna stabilizacja osadów	rekultywacja gruntów bezglebowych
S3	Busko-Sieśląwice	mechaniczno-biologiczna	30 500	tlenowa stabilizacja osadów	rekultywacja gruntów
S4	Skarżysko-Kamienna	mechaniczno-biologiczna	50 000	fermentacja w WKFz	warstwy izolacyjne na składowisku
S5	Sitkówka-Nowiny	mechaniczno-biologiczna	275 000	fermentacja w WKFz	rekultywacja gruntów

**Ekstrakcja sekwencyjna.** Badania przeprowadzono według czterostopniowej ekstrakcji sekwencyjnej BCR [Alvarez i in. 2002; Pitt i in. 1999], wprowadzając zmianę w sposobie mineralizacji frakcji rezydualnej tj. zastosowano mineralizację z udziałem wody królewskiej [EN ISO 15587:2002.]. Kolejność wykonywania ekstrakcji sekwencyjnej przedstawiono na rysunku 1.

Zawartość metali ciężkich w uzyskanych ekstraktach oznaczono zgodnie z ISO 9001:2000 na spektrofotometrze absorpcji atomowej Perkin-Elmer 3100 FAAS-BG (impact bead). Każde oznaczenie powtórzono czterokrotnie.

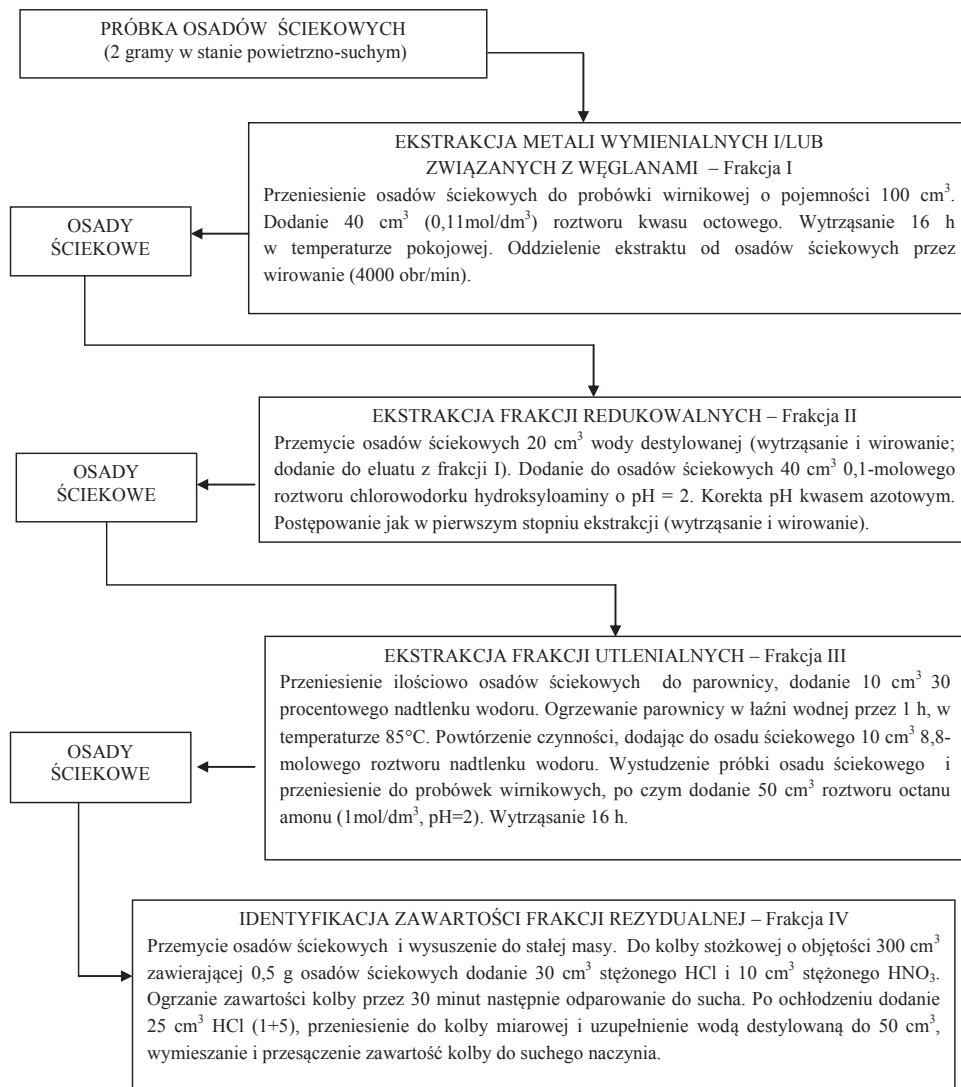
### 3. DYSKUSJA WYNIKÓW BADAŃ

Całkowite stężenie metali ciężkich w badanych osadach ściekowych przedstawiono w tabeli 4.

**Tabela 4.** Sumaryczna zawartość frakcji metali ciężkich (I+II+III+IV) w badanych osadach ściekowych

**Table 4.** Total (I+II+III+IV) concentration of heavy metals in sewage sludge

Próbka	Metale ciężkie, mg/kg s.m.					
	Cu	Ni	Cr	Pb	Cd	Zn
S1	9,30	5,72	28,35	275,20	7,32	596,02
S2	79,44	4,78	28,94	67,95	9,48	1246,00
S3	78,83	1,31	35,24	322,40	16,71	840,70
S4	21,80	28,50	2759,81	31,26	12,13	5351,14
S5	83,48	51,85	238,50	67,74	5,61	1315,00



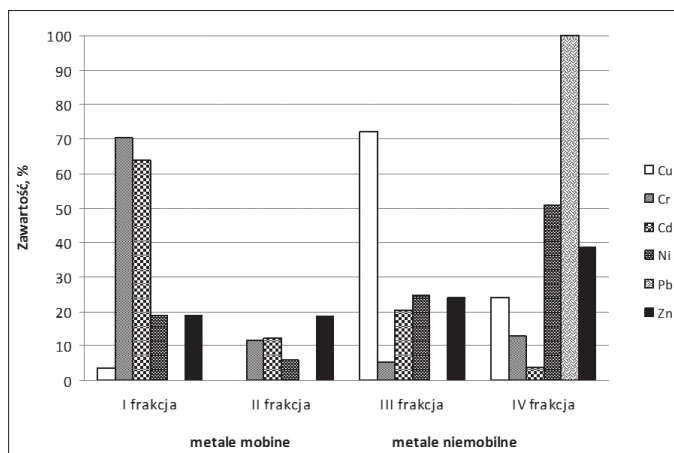
**Rys. 1.** Schemat zastosowanej ekstrakcji sekwencyjnej osadów ściekowych

**Fig. 1.** Used scheme of the sequential extraction of sewage sludge

Poziomy metali ciężkich w osadach ściekowych S1-S3 i S5 nie przekroczyły dopuszczalnych limitów obowiązujących w Polsce w odniesieniu do osadów przeznaczonych do wykorzystania przyrodniczego, w tym rolniczego (tab. 1 i 4). Osadów ściekowych S4 nie można stosować w rolnictwie z powodu przekroczonych dopuszczalnych ilości chromu i cynku.

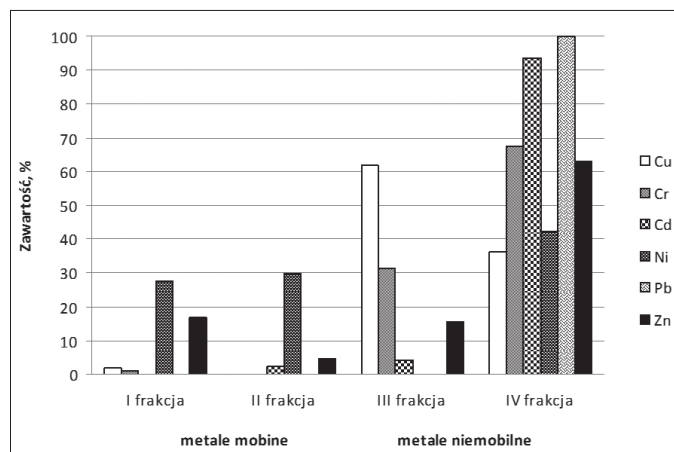
Wprowadzenie proponowanych zmian limitów metali ciężkich (tab.1.) wykluczy wykorzystanie rolnicze osadów ściekowych S1, S2, S3, S4 i S5. Osady ściekowe w tym wypadku zawierają ponadnormatywną ilość kadmu (S1, S2, S3, S4 i S5) oraz cynku (S2 i S3).

Przeprowadzona analiza sekwencyjna wykazała, że w osadach ściekowych są obecne różne formy metali ciężkich. Uzyskane wyniki badań specjacji metali ciężkich w osadach ściekowych przedstawiono na rysunkach 2 – 6 oraz w tabeli 5.



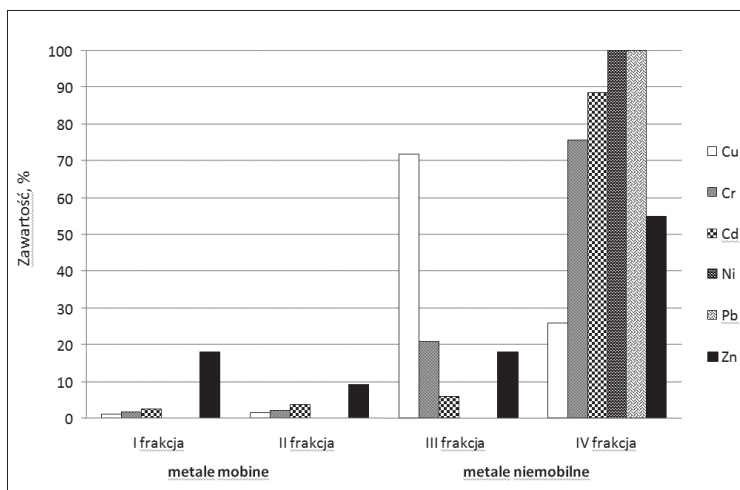
**Rys. 2.** Mobilność metali ciężkich w osadach ściekowych z OŚ Kostomłoty-Laskowa (S1)

**Fig. 2.** Speciation of heavy metals in sewage sludge from wastewater treatment plant in Kostomłoty-Laskowa (S1)



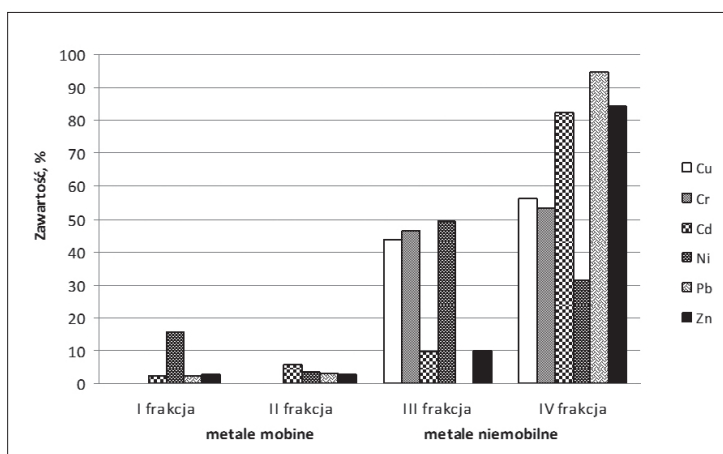
**Rys. 3.** Mobilność metali ciężkich w osadach ściekowych z OŚ Strawczyn (S2)

**Fig. 3.** Speciation of heavy metals in sewage sludge from wastewater treatment plant in Strawczyn (S2)



**Rys. 4.** Mobilność metali ciężkich w osadach ściekowych z OŚ Busko-Siesławice (S3)

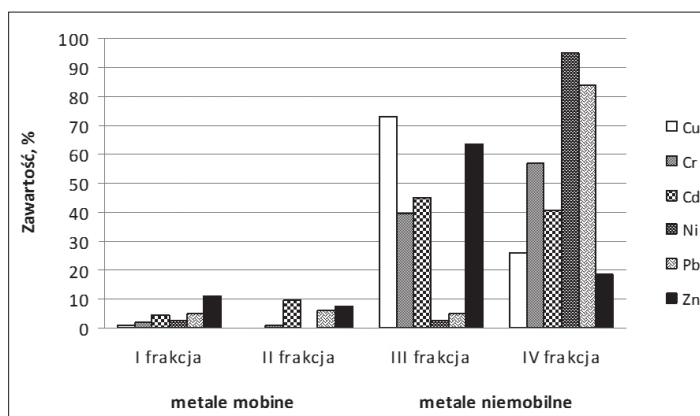
**Fig. 4.** Speciation of heavy metals in sewage sludge from wastewater treatment plant in Busko-Siesławice (S3)



**Rys. 5.** Mobilność metali ciężkich w osadach ściekowych z OŚ Skarżysko-Kamienna (S4)

**Fig. 5.** Speciation of heavy metals in sewage sludge from wastewater treatment plant in Skarżysko-Kamienna (S4)





**Rys. 6.** Mobilność metali ciężkich w osadach ściekowych z OŚ Sitkówka-Nowiny (S5)

**Fig. 6.** Speciation of heavy metals in sewage sludge from wastewater treatment plant in Sitkówka-Nowiny (S5)

**Tabela 5.** Wyniki analizy statystycznej dla frakcji metali ciężkich w badanych osadach ściekowych

**Table 5.** Statistical results of each fraction of heavy metals in samples of sewage sludge

Mobilność	Metal ciężki, mg/kg s.m.					
	Cu	Cr	Cd	Ni	Pb	Zn
<b>Kostomłoty-Laskowa (S1)</b>						
Frakcja I	0,33±0,03	19,98±0,98	4,67±0,37	1,08±0,11	0,00±0,01	111,47±9,31
Frakcja II	0,00±0,01	3,22±0,15	0,89±0,04	0,33±0,05	0,00±0,01	109,72±9,12
Frakcja III	6,72±0,55	1,48±0,09	1,49±0,09	1,41±0,18	0,00±0,01	143,36±9,59
Frakcja IV	2,25±0,12	3,67±0,44	0,27±0,03	2,9±0,19	275,15±9,45	231,47±7,14
<b>Strawczyn (S2)</b>						
Frakcja I	1,51±0,12	0,32±0,12	0,00±0,10	1,34±0,22	0,00±0,20	211,12±2,00
Frakcja II	0,00±0,10	0,00±0,10	0,23±0,14	1,43±0,23	0,00±0,20	56,31±0,41
Frakcja III	49,22±0,21	9,11±0,14	0,41±0,13	0,00±0,10	0,11±0,21	195,22±1,81
Frakcja IV	28,71±0,13	19,51±0,21	8,84±0,21	2,01±0,24	67,84±0,92	783,33±5,24
<b>Busko-Siesławice (S3)</b>						
Frakcja I	0,7±0,29	0,63±0,25	0,38±0,09	0,00±0,01	0,00±0,01	152,60±0,67
Frakcja II	1,0±0,07	0,69±0,04	0,64±0,08	0,0±0,01	0,35±0,23	75,79±2,55
Frakcja III	57,4±1,05	7,28±0,73	0,94±0,11	0,00±0,01	0,00±0,01	151,47±1,52
Frakcja IV	20,73±0,73	26,64±0,72	14,75±0,82	1,31±0,28	322,05±9,43	460,79±1,32
<b>Skarżysko-Kamienna (S4)</b>						
Frakcja I	0,00±0,01	4,99±0,42	0,3±0,08	4,50±0,11	0,70±0,22	152,87±0,73
Frakcja II	0,00±0,01	2,32±0,11	0,7±0,18	0,99±0,08	0,96±0,23	144,52±0,22
Frakcja III	9,49±2,66	1283,75±11,92	1,14±0,25	14,08±0,27	0,00±0,01	537,50±23,58
Frakcja IV	12,31±1,90	1468,75±46,82	9,99±1,72	8,93±0,08	29,6±7,83	4516,25±90,92
<b>Sitkówka-Nowiny (S5)</b>						
Frakcja I	0,79±0,11	5,32±0,61	0,26±0,07	1,31±0,17	3,55±0,12	144,05±15,97
Frakcja II	0,00±0,01	2,83±0,38	0,54±0,07	0,00±0,01	4,00±0,36	98,29±10,33
Frakcja III	60,93±1,45	93,84±1,73	2,53±0,05	1,35±0,32	3,40±0,18	832,56±24,55
Frakcja IV	21,74±0,62	136,51±9,50	2,27±0,15	49,19±5,11	56,79±3,67	240,47±24,36

**Objaśnienie:** ± odchylenie standardowe.

Właściwości nawozowe badanych osadów ściekowych przedstawiono w tabeli 6.

**Tabela 6.** Właściwości nawozowe badanych osadów ściekowych (S1–S5)

**Table 6.** Agronomic parameters of municipal sludge (S1–S5)

Próbka	pH	Całkowity N, %	Całkowity P, %	Całkowity K, %	OWO, %
S1	6,5	1,1	3,6	0,33	39,7
S2	6,6	1,6	3,1	0,42	36,9
S3	6,8	1,7	5,7	0,44	32,7
S4	6,9	1,8	1,7	0,10	30,6
S5	6,9	1,9	2,4	0,75	23,7

**Miedź.** Wszystkie badane osady ściekowe charakteryzowała bardzo mała zawartość frakcji mobilnych miedzi (frakcje I–II) w porównaniu z frakcjami niemobilnymi (frakcje III–IV), tj. poniżej 5% (rys. 1–5). Miedź związana z materią organiczną (FIII) w osadach ściekowych wystąpiła w ilości od 40 do 72%. Frakcje (FIII) miedzi są czasowo niemobilne, ponieważ zachowanie miedzi jest uzależnione od przebiegającej mineralizacji w gruncie. Frakcja niemobilna (FIV) miedzi stanowiła od 22 do 55% ogólnej ilości miedzi. Podobny udział poszczególnych frakcji miedzi w osadach ściekowych uzyskał [Chen i in. 2008]. Nasuwa się wniosek, że formy miedzi w osadach ściekowych są cechą charakterystyczną tego pierwiastka.

**Nikiel.** Analizowane próbki cechowało zróżnicowane stężenie niklu (1,31 – 51,85 mg/kg s.m.). Przeważającą frakcją niklu była frakcja niemobilna (FIV), która stanowiła od 95 do 100%, i frakcja czasowo niemobilna (FIII) stanowiąca 49%. Wyjątkiem są osady ściekowe pochodzące z oczyszczalni ścieków Strawczyn, dla których sumaryczna mobilność niklu (FI + FII) przekracza 57%.

**Chrom.** Stężenie chromu w badanych osadach było bardzo zróżnicowane (28,35 – 2759,81 mg/kg s.m.). W osadach S2, S3, S4 i S5 przeważała frakcja FIV, a w osadach S1 – frakcja FI, tj. chrom mobilny. W osadach S4 nie odnotowano frakcji FI i FII.

**Ołów.** Ołów w osadach S1 wystąpił wyłącznie w formie frakcji niemobilnej FIV. W osadach S2 i S3 udział ołowiu we frakcji FIV był również bardzo duży – 99,9%. Należy podkreślić, że zawartość 0,1% Pb w S2 związana była jedynie z frakcją FIII. Według [Chen i in. 2008] wysoka immobilizacja ołowiu w osadach ściekowych wynika z występowania ołowiu w osadach w formie nierozpuszczalnych soli. Ponadto czynnikiem limitującym bioaktywność ołowiu w osadach ściekowych jest glebowa substancja organiczna [Strawn, Sparks 2000]. W osadach S2, S4, S5 duży udział miała także frakcja rezydualna (FIV) chromu – od 67,5 do 95,6%.

**Kadm.** Stężenie całkowite kadmu we wszystkich osadach ściekowych było na podobnym poziomie. Frakcja niemobilna (FIV) kadmu dominowała w osadach S2, S3, S4 (88%

– 93,6%). Najwięcej niemobilnej czasowo (FIII) frakcji kadmu zawierał osad S5. Osady S1 natomiast cechowała dominacja frakcji kadmu przyswajalnych i związanych z węglanami (FI) – 63,8%. Odmienny udział frakcji kadmu wystąpił w osadach S5, gdzie przeważały frakcje niemobilne FIII i FIV.

**Cynk.** Zawartość cynku w badanych osadach ściekowych cechowało największe zróżnicowanie (596,02 – 5351,14 mg/kg s.m.). W osadzie S1, S2, S3 i S4 największy udział miała frakcja niemobilna FIV (38,8; 63%; 54%; 84%). Frakcja niemobilna czasowo (FIII) stanowiła największy udział procentowy w osadzie S5 (63%).

#### 4. WNIOSKI

1. Wartość sumaryczna zawartości pierwiastka w osadzie nie jest jednoznaczna z możliwością uwolnienia tego pierwiastka do środowiska glebowo-wodnego. Bardzo ważna bowiem jest jego forma występowania. Zastosowanie analizy specjacyjnej metali ciężkich pozwoliło na procentowe określenie zawartości form rozpuszczalnych w wodzie, w stosunku do sumarycznej zawartości. Informacja ta jest pomocna przy ocenie zdolności migracji metali z osadów ściekowych do środowiska gruntowo-wodnego.
2. Dla badanych metali procentowy udział poszczególnych frakcji metali ciężkich w osadach ściekowych nie zależał wyraźnie od sposobu stabilizacji osadów.
3. Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że udział frakcji mobilnych (frakcja I i II) metali ciężkich w osadach ściekowych jest niewielki. Wyjątkiem jest duża mobilność chromu i kadmu w osadach ściekowych z oczyszczalni ścieków w miejscowości Kostomłoty-Laskowa (S1) oraz niklu dla oczyszczalni ścieków w Strawczyniu.
4. Potwierdzono, że sumaryczna zawartość metali ciężkich w osadzie ściekowym nie jest jednoznaczna z możliwością ich uwolnienia do środowiska gruntowo-wodnego. Bardzo ważna jest forma ich występowania, co wykazano przez analizę mobilności.
5. Uwzględnienie frakcji metali ciężkich w normatywach regulujących przyrodnicze wykorzystanie osadów ściekowych pozwoliłoby na wykorzystanie badanych osadów ściekowych z oczyszczalni w Skarżysku-Kamiennej na cele nierolne. Wykorzystane zostałyby zatem właściwości nawozowe osadów ściekowych.

#### PIŚMIENNICTWO

- 'ALVAREZ E.A., MOCHÓN M.C., JIMÉNZE SÁNCHEZ J.C., RODRÍGUEZ M.T. 2002. Heavy metal extractable forms in sludge from wastewater treatment plants. *Chemosphere* 47: 765–775.
- CHEN M., LI X., YANG Q., ZENG G., ZHANG Y., LIAO D., LIU J., HU J., GUO L. 2008. Total concentration and speciation of heavy metals in sewage sludge from Changsha,

Zhuzhou and Xiangtan in middle – south region of China. *Journal of Hazardous Materials*. 160: 324–329.

**Council Directive of 21 March 1991 concerning urban wastewater treatment, 91/271/EEC.**

**Council Directive of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture, 86/278/EEC.**

DAHLIN C.L., WILLIAMSON C.A., COLLINS W.K., DAHLIN D.C. 2002. Sequential extraction versus comprehensive characterization of heavy metal species in brownfield soils. *Environmental Forensics* 3: 191–201.

DE LA GUARDIA M., MORALES-RUBIO A. 1996. Modern strategies for the rapid determination of metals in sewage sludge. *Trends in Analytical Chemistry* 15, 8:311–318.

**Eurostat 2011 <http://ec.europa.eu/eurostat>.**

FYTILI D., ZABANIOTOU A. 2008. Utilization of sewage sludge in UE application of old and new methods – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12: 116–140.

KROGMANN U., BOYLES L.S., BAMKA W.J., CHAIPRAPAT S., MARTEL C.J. 1999. Bio-solids and sludge management. *Water Environ. Res.* 71, 5: 692–714.

PITT R., CLARK S., FIELD R. 1999. Groundwater contamination potential from stormwater infiltration practices. *Urban Water* 1: 217–236.

ROGERS H.R. 1996. Sources, behaviour and fate of organic contaminants during sewage treatment and in sewage sludge. *The Science of the Total Environment* 185: 3–26.

**Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 roku w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu.**

Dz. U. Nr 119, poz. 765.

**Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 lipca 2010 roku w sprawie komunalnych osadów ściekowych.** Dz. U. 2010, Nr 137, poz. 924.

RYU H.W., MOON H.S., LEE E.Y., CHO K.S., CHOI H. 2003. Leaching characteristics of heavy metals from sewage sludge by *Acidithiobacillus thiooxidans* MET. *Journal of Environmental Quality* 32: 751–759.

STRAWN D.G., SPARKS D.L. 2000. Effects of soil organic matter on the kinetics and mechanisms of Pb (II) sorption and desorption in soil. *Soil Sci. Am. J.* 64: 144–156.

**The quality of water-Collection of samples-Part 13: Procedure guidelines concerning the collection of sludge samples from sewage treatment plants and water purification plants.** PN-EN ISO 5667-13: 2004.

WANG M.J. 1997. Land application of sewage sludge in China. *The Science of the Total Environment* 197: 149–160.

**Water quality. Digestion for the determination of selected elements in water. Part 1: Aqua regia digestion.** EN ISO 15587:2002.

WEINER R.F., MATTHEWS R.A. 2003. *Environmental Engineering*. Elsevier Science. Burlington.

WERTHER J., OGADA T. 1999. Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science* 25: 55–116.

**Working document on sludge. 3<sup>rd</sup> Draft.** EC DG XI, ENV/E.3/LM, 2000.

XIANG L., CHAN L.C., WONG J.W.C. 2000. Removal of heavy metals from anaerobically digested sewage sludge by isolated indigenous iron-oxidizing bacteria. *Chemosphere* 41: 283–287.