

OCENA EFEKTYWNOŚCI FITOREMEDIACJI GLEB  
ZANIECZYSZCZONYCH METALAMI CIĘŻKIMI  
Z WYKORZYSTANIEM METODY EKSTRAKCJI SEKWENCYJNEJ

BARBARA GWOREK<sup>1,2</sup>, KRYSZYNA JESKE<sup>2</sup>, JOANNA KWAPISZ<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> Instytut Ochrony Środowiska, 00-548 Warszawa, ul. Krucza 5/11

<sup>2)</sup> Katedra Nauk o Środowisku Glebowym SGGW, 02-548 Warszawa, ul. Rakowiecka 26/30

Keywords: phytoremediation, contaminated soils, heavy metals, sequential extraction.

THE PHYTOREMEDIATION OF SOILS CONTAMINATED WITH HEAVY METALS  
USING SEQUENTIAL EXTRACTION METHOD

The phytoremediation effectiveness of heavy metals contaminated soils in the area of Upper Silesia was assessed on the basis of its real quantity in biomass harvest per 1 ha. The content of each heavy metal was compared with its quantity in the fraction of mobile and total value in horizon till 20 cm depth. The content of Zn uptake in carrot or parsley harvest (leaves and root) did not exceed 2.5% of its quantity in mobile fraction and 0.05% of its total content. The Cd and Pb values amount: 2.41%, 0.1% and 1.47%, 0.016%, respectively.

Streszczenie

Efektywność metody fitoremediacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi na terenie Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego oceniono na podstawie rzeczywistej ich ilości wyniesionej z plonem biomasy z obszaru 1 ha. Wartość tę dla danego metalu odniesiono do jego ilości we frakcji aktualnie mobilnej i całkowitej w warstwie gleby do głębokości 20 cm. Ilość wyniesionego Zn z plonem marchwi bądź pietruszki (nać i korzeń) nie przekraczała 2,5% jego ilości we frakcji mobilnej i 0,05% ilości całkowitej. Dla Cd oraz Pb wartości te wynoszą odpowiednio: 2,41 i 0,1% oraz 1,47 i 0,016%.

WPROWADZENIE

W fitoremediacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi wykorzystuje się te rośliny, które charakteryzuje duża akumulacja metali i wysoki przyrost biomasy oraz wysoki stopień przemieszczania metali z korzeni do części nadziemnych. Akumulacja pierwiastków w biomacie, a także ich przemieszczanie w roślinie zależy od gatunku i stadium rozwoju rośliny. Ponadto na proces akumulacji istotnie oddziałują czynniki środowiskowe takie jak wilgotność oraz ilość składników mineralnych obecnych w glebie w formie dostępnej dla roślin. W środowisku silnie zanieczyszczonym mechanizmy regulujące pobieranie składników mogą być zaburzone a akumulacja danego składnika może znacznie przewyższać potrzeby pokarmowe roślin.

Zdolność roślin do selektywnej bioakumulacji składników, a zwłaszcza metali ciężkich, są wykorzystywane w remediacji środowiska.

Jedną z form fitoremediacji jest fitoekstrakcja polegająca na pobieraniu przez rośliny np. metali z zanieczyszczonego gruntu, które następnie transportowane są z korzeni do części nadziemnych i są usuwane z określonej przestrzeni przyrodniczej wraz z plonami [4]. Metodę fitoremediacji można stosować do określania stopnia zmiany jednej formy składnika znajdującego się w środowisku na inną, np. z formy mobilnej na związaną w biomasie. Wówczas efektywność fitoekstrakcji mierzy się akumulacją składników w jednostce biomasy. Fitoekstrakcja może być również stosowana do oceny rzeczywistej ilości składników, która może być usunięta z danej przestrzeni produkcyjnej wraz z określoną biomasa. W tym przypadku efektywność metody zależy nie tylko od zdolności roślin do akumulacji składników w jednostce masy i od ilości wyprodukowanej masy, ale także od ilości składników w formie dostępnej. Rzeczywista biologiczna przyswajalność składników uwarunkowana jest przede wszystkim ich stężeniem w roztworze glebowym oraz kinetyką procesu uwalniania z fazy stałej do roztworu oraz szybkością procesów dyfuzyjnych.

Autorzy niniejszej publikacji założyli, że na podstawie określenia frakcji cynku, kadmu i ołowiu w glebach metodą ekstrakcji sekwencyjnej będzie można prognozować ich dostępność dla roślin uprawianych na glebach nimi zanieczyszczonych a pośrednio ocenić efektywność procesu fitoremediacji, a zatem przydatność tej metody do oczyszczania gleb.

## MATERIAŁ I METODYKA

Do badań wytypowano obszar o największym potencjalnym ryzyku zanieczyszczenia, to jest Górnośląski Okręg Przemysłowy (GOP). Obiekty badań zlokalizowane były w Szopienicach, Janowie, Bytomiu, Giszowcu oraz Sławkowie. Sposób użytkowania gleb był podstawowym kryterium doboru obiektów badań. Były to gleby uprawne pod warzywami. Próbkę glebowe do badań pobrano z wierzchniego poziomu z głębokości 0–20 cm z 12 obiektów. Na wszystkich obiektach badań była dostępna marchew i pietruszka oraz zamiennie seler i sałata. Materiał roślinny do analiz zebrano w fazie dojrzałości konsumpcyjnej, który po umyciu (liście i korzenie), wysuszeniu i zmieleniu poddano analizie chemicznej. W celu ogólnej charakterystyki badanego materiału glebowego w powietrznym suchym materiale wykonano następujące oznaczenia:

- skład granulometryczny – metodą areometryczną Cassagrande’a w modyfikacji Prószyńskiego,
- odczyn (pH) gleby w roztworze wodnym 1M KCl,
- zawartość węgla organicznego (C-org.) – metodą Tiuryna.

Do oznaczenia metali śladowych próbki glebowe rozcierano w moździerzu agatowym do uzyskania cząstek o średnicy <0,1 mm. W tak przygotowanych próbkach oznaczono według metody Tessier’a i in. [7] zawartość Cu, Pb i Zn w następujących frakcjach zdefiniowanych operacyjnie jako:

- Frakcja wymienna (FI) – ekstrahowana w 1,0 M MgCl<sub>2</sub>,

Frakcja ta obejmuje metale występujące w roztworze glebowym w formie jonowej albo skompleksowanej oraz metale wiązane siłami elektrostatycznego przyciągania na ujemnie naładowanych miejscach wymiany stałych cząsteczek gleby; dostępna i stosunkowo ruchliwa.

- Frakcja związana z węglanami (FII) – ekstrahowana w 1,0 M NaOAc. Frakcja ta zawiera metale strącone z węglanami, także z siarczanami i fosforanami, ulega uruchomieniu przy spadku odczynu gleb.
- Frakcja związana z tlenkami Fe i Mn (FIII) – ekstrahowana w 0,04 M NH<sub>4</sub>OH. HCl. Frakcja ta obejmuje metale zasorbowane lub strącone z tlenkami i wodorotlenkami Fe, Mn i Al, występującymi w postaci cienkich warstw lub w postaci drobnych cząsteczek na minerałach glebowych, jest stabilna i ulega uruchomieniu w warunkach redukcyjnych.
- Frakcja związana z materią organiczną (FIV) – ekstrahowana w 0,02 M HNO<sub>3</sub> i H<sub>2</sub>O oraz 3,2 M NH<sub>4</sub>OAc w 20% HNO<sub>3</sub>. Frakcja ta zawiera metale związane z substancją organiczną poprzez adsorpcję fizyczną, chemisorpcję, wytrącanie i tworzenie połączeń kompleksowych, jest stabilna i ulega uruchomieniu w warunkach redukcyjnych.
- Frakcja rezydualna (FV) – ekstrahowana w wodzie królewskiej. Jest to frakcja obejmująca metale związane w sieci krystalicznej minerałów pierwotnych i wtórnych oraz połączone z minerałami ilastymi poprzez chemisorpcję i adsorpcję fizyczną.

Zawartość Zn, Cd, i Pb w otrzymanych wyciągach oznaczono techniką atomowej spektroskopii absorpcyjnej (ASA). Popiół po spaleniu materiału roślinnego w temperaturze 480°C rozpuszczono w 20% HCl. W tak otrzymanych mineralizatach badane pierwiastki oznaczono również techniką ASA.

## WYNIKI BADAŃ

Uziarnienie wierzchnich poziomów (0–20 cm) gleb wykazuje skład granulometryczny gliny lekkiej bądź średniej pylastej i piasku gliniastego (Tab. 1). Są to gleby o niewielkim zróżnicowaniu pod względem odczynu (pH 6,0–6,7), który w dużej mierze decyduje o mobilności kationów w roztworze glebowym [2, 3, 6].

Według Salbu i in. [5] na podstawie ekstrakcji sekwencyjnej można obliczyć wskaźnik mobilności (WM) metali na podstawie następującego równania:

$$WM = \frac{FI + FII}{FI + FII + FIII + FIV + FV} \times 100$$

Obliczoną w ten sposób ilość metali wymienieni autorzy uznają za dostępną dla roślin.

Natomiast w przypadku analizowanych gleb zlokalizowanych na obszarze GOP, wydaje się, że tylko ilość cynku, kadmu i ołowiu obecnego w roztworze glebowym i łatwo wymiennego (niespecyficzenie związanego) – frakcja FI – należałoby uznać za dostępną dla roślin. Wynika to ze zróżnicowania odczynu pomiędzy badanymi glebami (pH 6,0–6,7) a odczynem środowiska, w jakim ekstrahowana jest frakcja FII. Frakcja ta jest ekstrahowana w roztworze o pH 5 i obejmuje metale związane przez węglany, siarczki i fosforany oraz część specyficzenie sorbowanych, które ulegają uruchomieniu przy spadku odczynu środowiska. Dlatego też autorzy niniejszej pracy w celu oceny efektywności metody fitoekstrakcji dla analizowanych gleb GOP przyjęli tylko frakcję FI jako aktualnie mobilną, dostępną dla roślin. Natomiast sumę frakcji FI, FII, FIII, FIV, które mogą ulec uruchomieniu wskutek zmiany warunków środowiskowych, jako frakcję potencjalnie mobilną (potencjalnie dostępną dla roślin). Ponadto, w celu obliczenia rzeczywistej ilości Zn, Cd i Pb, które mogą być usunięte z danej

przeźreni produkcyjnej wraz z określoną biomasą, przyjęto plon korzeni marchwi  $27,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  o zawartości suchej masy 12,2% oraz plon naci marchwi  $15 \text{ Mg ha}^{-1}$  o zawartości suchej masy 16%, a dla pietruszki odpowiednio  $25 \text{ Mg ha}^{-1}$  o zawartości 13% suchej masy i  $14 \text{ Mg ha}^{-1}$  o zawartości 16% suchej masy.

Z badań wynika, że frakcja cynku przyjęta za aktualnie mobilną (FI) dla analizowanych gleb stanowi 3,6% całkowitej jego zawartości (suma frakcji FI + FII + FIII + FIV + FV) w glebach Szopienic, kadm w tej frakcji stanowi 4,3%, a ołów 2,2%. Szereg ilościowy pozostałych frakcji dla wszystkich analizowanych metali układu się następująco: FIII > FIV > FII > FV. Oznacza to, że około 87% cynku, 97% kadmu i 87% ołowiu w glebach Szopienic występuje we frakcji potencjalnie mobilnej (Tab. 2, Rys. 1).

Z obliczeń wynika, że ilość cynku, jaka została wyniesiona z plonem marchwi (nać + korzeń) to  $2460,1 \text{ g ha}^{-1}$ , co stanowi tylko 0,31% cynku we frakcji przyjętej za aktualnie mobilną (FI) i 0,011% jego całkowitej zawartości (Tab. 5). Kadmu, wraz z plonem marchwi, zostało wyniesione  $31,11 \text{ g ha}^{-1}$ , co stanowi 0,42% kadmu we frakcji FI i 0,018% całkowitej jego zawartości. Dla ołowiu wartości te wynosiły odpowiednio  $364,31 \text{ g ha}^{-1}$ , 0,36% i 0,008% (Tab. 3 i 4).

Wyniki badań przedstawione w tabeli 2 i na rysunkach 1–5 można przedstawić w postaci szeregów procentowego udziału pierwiastków w formie aktualnie mobilnej, w stosunku do ich całkowitej zawartości – dla:

Zn – Sławków (3,7) > Szopienice (3,6) = Giszowiec (3,6) > Janów (1,9) > Bytom (0,9),

Cd – Janów (7,2) > Bytom (6,1) > Szopienice (4,3) > Giszowiec (4,2),

Pb – Giszowiec (3,0) > Szopienice (2,2) > Bytom (2,0) > Sławków (1,8) > Janów (0,9).

Z powyższych szeregów wynika, że spośród badanych pierwiastków ilość kadmu we frakcji FI była najwyższa, a następnie cynku i ołowiu w porównaniu do całkowitej ich zawartości. Przy czym trudno jest zauważyć zależności pomiędzy zawartością badanych metali w tej frakcji w glebach Szopienic, o najniższym pH w porównaniu do pozostałych analizowanych gleb, chociaż taką zależność przedstawiają inni autorzy [5, 6].

Efekt fitoekstrakcji mierzony ilością składnika w jednostce masy i ilością wyprodukowanej i usuniętej biomasy z określonej przestrzeni produkcyjnej dla badanych gleb (Tab. 3–5) można przedstawić następująco w  $\text{g ha}^{-1}$  dla:

Zn – Szopienice (2460,1) > Janów (1262,1) > Sławków (1166,0) > Giszowiec (848,3) > Bytom (612,6),

Cd – Szopienice (31,11) > Janów (17,44) > Giszowiec (14,44) > Sławków (9,26) > Bytom (4,46),

Pb – Szopienice (364,31) > Sławków (152,67) > Janów (109,31) > Bytom (82,70) > Giszowiec (72,73).

Procentowy udział pierwiastków wyniesionych z plonem z powierzchni 1 ha w stosunku do ich ilości we frakcji aktualnie mobilnej (FI) do głębokości 20 cm (Tab. 4) przedstawia się następująco dla:

Zn – Bytom (2,36) > Janów > (1,48) > Giszowiec (1,27) > Sławków (0,80) > Szopienice (0,31),

Cd – Giszowiec (2,16) > Janów (0,59) > Szopienice (0,39) > Bytom (0,31) > Sławków (0,27),

Pb – Janów (1,40) > Sławków (0,88) > Bytom (0,71) > Giszowiec (0,49) > Szopienice (0,36).

Natomiast wyniesienie z plonem ilości analizowanych metali w stosunku do ich całkowitej zawartości, niezależnie od miejscowości, wahało się dla cynku w granicach 0,011–0,046%, kadmu 0,018–0,100% i ołowiu 0,008–0,016%.

Tabela 1. Podstawowe właściwości gleb  
Basic soils properties

Miejscowość Place	% frakcji Ø mm % fractions Ø mm			% C org.	pH w KCl pH in KCl
	1-0,1	0,1-0,02	<0,02		
Szopienice	41	30	29	2,67	6,0
Janów	46	31	23	3,02	6,7
Bytom	21	39	40	2,67	6,6
Giszowiec	54	25	21	2,26	6,7
Sławków	71	16	13	3,13	6,6

Tabela 2. Średnia (n = 12) zawartość frakcji cynku, kadmu i ołowiu w badanych glebach  
Mean (n = 12) content of fraction zinc, cadmium and lead in examined soils

Miejscowość Place	Frakcje – Fractions					
	I	II	III	IV	V	Σ FI – V
	mg · kg <sup>-1</sup> s.m.			mg · kg <sup>-1</sup> d.m.		
	cynk – zinc					
Szopienice	259,0	1276,0	2628,0	2070,0	927,0	7160,0
Janów	28,3	119,7	687,8	551,4	72,8	1460,0
Bytom	8,6	151,8	415,7	277,5	138,4	992,0
Giszowiec	22,2	61,2	355,8	111,2	63,2	613,6
Sławków	48,8	256,2	573,4	364,8	74,6	1317,8
	kadm – cadmium					
Szopienice	2,8	14,2	29,3	16,2	1,9	64,4
Janów	0,9	3,2	4,9	2,3	1,2	12,5
Bytom	0,4	1,9	2,3	1,1	0,9	6,6
Giszowiec	0,2	1,3	1,7	0,8	0,8	4,8
Sławków	1,0	1,7	2,9	1,6	0,8	8,0
	ołów – lead					
Szopienice	34,0	348,0	524,0	442,0	192,0	1540,0
Janów	2,6	53,2	85,8	115,4	39,0	296,0
Bytom	3,9	31,6	39,2	41,2	80,1	196,0
Giszowiec	4,9	3,3	87,9	40,8	29,1	166,0
Sławków	5,8	70,1	154,7	61,3	33,4	325,3

Tabela 3. Średnia (n = 12) zawartość cynku, kadmu i ołowiu w roślinach  
Mean (n = 12) content of fraction zinc, cadmium and lead in plants

Miejscowość Place	Rośliny Plants	cynk – zinc		kadm – cadmium		ołów – lead	
		nać leaves	korzeń root	nać leaves	korzeń root	nać leaves	korzeń root
		mg · kg <sup>-1</sup> s.m.		mg · kg <sup>-1</sup> d.m.			
Szopienice	marchew – carrot	506	372	6,8	5,6	132,0	20,6
	pietruszka – parsley	612	290	7,2	4,9	166,4	16,4
	seler – celery	1410	654	14,6	8,0	43,0	13,0
	sałata – lettuce	86,6	–	3,0	–	2,6	–
Janów	marchew – carrot	298	163	4,6	2,2	19,0	19,0
	pietruszka – parsley	245	210	2,6	1,9	26,4	17,2
	sałata – lettuce	224	–	2,4	–	45,0	–
Bytom	marchew – carrot	149	76	1,3	0,4	13,5	15,0
	pietruszka – parsley	139	102	1,9	2,0	12,0	8,0
	seler – celery	198	135	1,0	2,0	12,0	8,0
Giszowiec	marchew – carrot	253,8	71,3	2,8	2,3	12,7	12,6
	pietruszka – parsley	94,0	40,2	1,2	0,9	6,9	3,4
	sałata – lettuce	122,2	–	0,7	–	23,9	–
Sławków	marchew – carrot	276,4	149,8	1,9	1,4	46,4	12,3
	pietruszka – parsley	158,0	112,6	1,1	1,0	13,4	10,9
	seler – celery	237,0	198,4	2,9	1,6	20,2	16,4

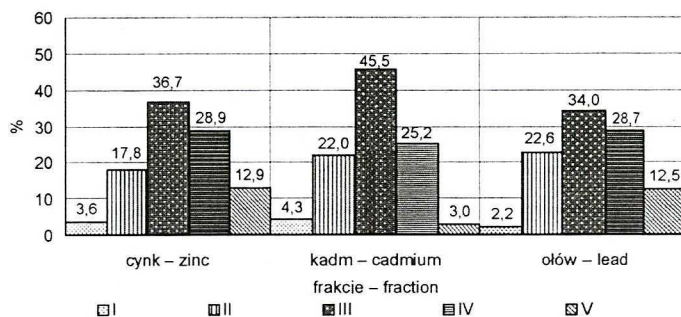
Tabela 4. Ilość Zn, Cd i Pb w analizowanych frakcjach na obszarze 1 ha do głębokości 20 cm  
Content of Zn, Cd and Pb in determined fractions on 1 ha area till 20 cm

Miejscowość Place	Frakcje – Fractions					
	I	II	III	IV	V	Σ FI - V
	kg · ha <sup>-1</sup>					
cynk – zinc						
Szopienice	777,0	3828,0	7884,0	6210,0	2781,0	21480,0
Janów	85,0	359,0	2063,0	1654,0	218,0	4380,0
Bytom	26,0	455,0	1245,0	833,0	415,0	2976,0
Giszowiec	66,6	183,6	1067,4	333,6	189,6	1840,8
Sławków	146,4	768,6	1720,2	1094,4	223,8	3953,4
kadm – cadmium						
Szopienice	8,4	42,6	87,9	48,6	5,7	193,2
Janów	2,7	9,6	14,7	6,9	3,6	37,5
Bytom	1,2	5,7	6,9	3,3	2,7	19,8
Giszowiec	0,6	3,9	5,1	2,4	2,4	14,4
Sławków	3,0	5,1	8,7	4,8	2,4	24,0
ołów – lead						
Szopienice	102,0	1044,0	1572,0	1326,0	576,0	4620,0
Janów	7,8	159,6	257,4	346,2	117,0	888,0
Bytom	11,7	94,8	117,6	123,6	240,3	588,0
Giszowiec	14,7	9,9	263,7	122,4	87,3	498,0
Sławków	17,4	210,3	464,1	183,9	100,2	975,9

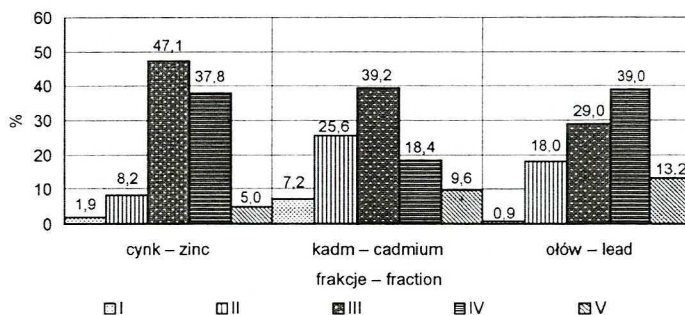
Tabela 5. Ilość Zn, Cd i Pb wyniesiona z plonem marchwi i pietruszki  
Content of Zn, Cd and Pb removed with carrot and parsley harvest

Miejscowość Place	Marchew – Carrot			% FI	% Σ FI - V	Pietruszka – Parsley			% FI	% Σ FI - V
	nać leaves	korzeń root	Σ			nać leaves	korzeń root	Σ		
	g · ha <sup>-1</sup>					g · ha <sup>-1</sup>				
cynk – zinc										
Szopienice	1212,0	1248,1	2460,1	0,31	0,011	1370,9	942,5	2313,4	0,30	0,011
Janów	715,2	546,9	1262,1	1,48	0,029	548,8	682,5	1231,3	1,45	0,028
Bytom	357,6	255,0	612,6	2,36	0,021	311,4	331,5	642,9	2,47	0,022
Giszowiec	609,1	239,2	848,3	1,27	0,046	210,6	130,7	341,3	0,51	0,018
Sławków	663,4	502,6	1166,0	0,80	0,029	353,9	366,0	719,9	0,49	0,018
kadm – cadmium										
Szopienice	16,32	18,79	31,11	0,42	0,018	16,13	15,92	32,05	0,38	0,016
Janów	10,02	7,38	17,40	0,64	0,046	5,82	6,18	12,00	0,44	0,032
Bytom	3,12	1,34	4,46	0,37	0,023	4,26	6,50	10,76	0,90	0,054
Giszowiec	6,72	7,22	14,44	2,41	0,100	2,69	2,93	5,62	0,94	0,039
Sławków	4,56	4,70	9,26	0,31	0,039	2,46	3,25	5,71	0,19	0,024
ołów – lead										
Szopienice	295,20	69,11	364,31	0,36	0,008	372,7	53,3	426,0	0,42	0,009
Janów	45,57	63,74	109,31	1,40	0,012	59,1	55,9	115,0	1,47	0,013
Bytom	32,38	50,32	82,70	0,71	0,014	26,9	26,0	52,9	0,45	0,009
Giszowiec	30,46	42,27	72,73	0,49	0,015	15,5	11,1	26,6	0,23	0,005
Sławków	111,40	41,27	152,67	0,88	0,016	30,0	35,4	65,4	0,38	0,007

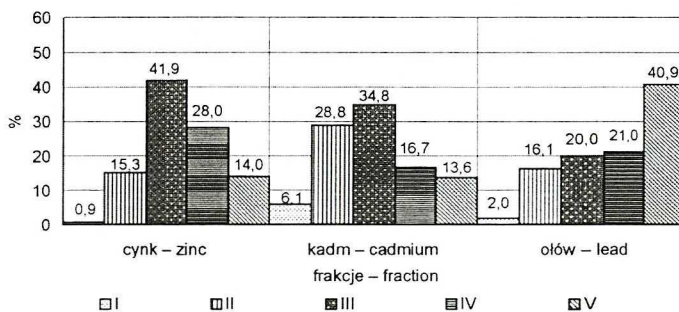
Porównując ilość analizowanych pierwiastków wyniesionych z plonem pietruszki z 1 ha, jak również udział w stosunku do ilości we frakcji aktualnie mobilnej (FI) i całkowitej, zauważa się podobne zależności jak w przypadku rozpatrywanych zależności dla marchwi.



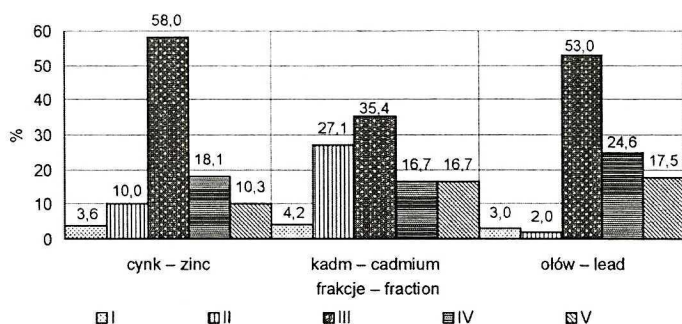
Rys. 1. Procentowy udział cynku, kadmu i ołowiu we frakcjach w stosunku do całkowitej ich zawartości w wierzchniej warstwie gleb Szopienice  
Percent share of zinc, cadmium and lead in determined fractions in relation to their total value in horizon of Szopienice soils



Rys. 2. Procentowy udział cynku, kadmu i ołowiu we frakcjach w stosunku do całkowitej ich zawartości w wierzchniej warstwie gleb Janowa  
Percent share of zinc, cadmium and lead in determined fractions in relation to their total value in horizon of Janów soils

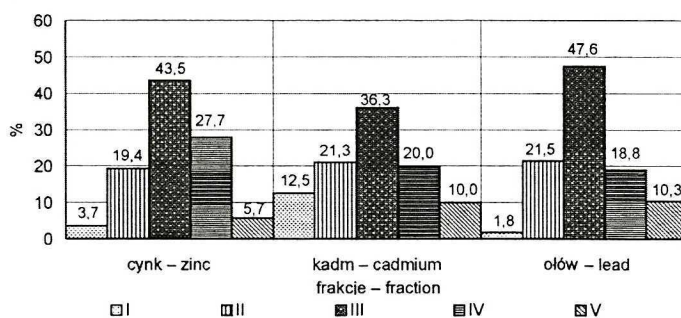


Rys. 3. Procentowy udział cynku, kadmu i ołowiu we frakcjach w stosunku do całkowitej ich zawartości w wierzchniej warstwie gleb Bytomia  
Percent share of zinc, cadmium and lead in determined fractions in relation to their total value in horizon of Bytom soils



Rys. 4. Procentowy udział cynku, kadmu i ołowiu we frakcjach w stosunku do całkowitej ich zawartości w wierzchniej warstwie gleb Giszowca

Percent share of zinc, cadmium and lead in determined fractions in relation to their total value in horizon of Giszowiec soils



Rys. 5. Procentowy udział cynku, kadmu i ołowiu we frakcjach w stosunku do całkowitej ich zawartości w wierzchniej warstwie gleb Sławkowa

Percent share of zinc, cadmium and lead in determined fractions in relation to their total value in horizon of Sławków soils

## PODSUMOWANIE

Efektywność metody fitoremediacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi zlokalizowanych na obszarze GOP mierzona rzeczywistą ilością cynku, kadmu i ołowiu, które zostały wyniesione z danej przestrzeni produkcyjnej z określoną biomasa – plon korzeni i naci marchwi oraz pietruszki – była następująca dla:

Zn – 2460,1–341,3 g ha<sup>-1</sup>, Cd – 32,05–4,46 g ha<sup>-1</sup>, Pb – 426,0–26,6 g ha<sup>-1</sup>.

Odnosząc powyższe wartości do ilości pierwiastków we frakcji aktualnie mobilnej (FI) to stanowiły one zaledwie dla: Zn 2,47–0,30%, Cd 2,41–0,19% i Pb 1,47–0,23%, a do ich całkowitej zawartości Zn 0,046–0,011%, Cd 0,100–0,016% i Pb 0,016–0,005%.

Oznacza to, że fitoekstrakcja wymienionych metali z badanych gleb może trwać setki lat. Niemniej jednak należy zdawać sobie sprawę, że szata roślinna ma ogromne znaczenie w remediacji gruntów, ponieważ inicjuje procesy biologiczne, przeciwdziała erozji, a także stanowi barierę ochronną dla przemieszczania się zanieczyszczeń do wód i do obszarów przyległych. Ponadto może być doskonałym uzupełnieniem dla innych metod oczyszczania gleb.



## LITERATURA

- [1] Alloway B.J.: *Heavy metals in soils*, John Wiley and Sons, New York 1990.
- [2] Karczewska A.: *Metal species distribution in top- and sub-soil in area affected by copper smelter emissions*, *Applied Geochemistry*, **11**, 35–42 (1996).
- [3] Kwapisz J.: *Frakcje cynku, miedzi i ołowiu w glebach o zróżnicowanej zawartości metali ciężkich*, Praca doktorska, SGGW, Warszawa 2000.
- [4] Porębska G., B. Gworek: *Ocena przydatności roślin w remediacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi*, *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, **17**, 81–87 (1999).
- [5] Salbu B., T. Krekling, D.H. Oughton: *Characterisation of radioactive particles in the environment*, *Analyst*, **123**, 843–849 (1998).
- [6] Sposito G., L.J. Lund, A.C. Chang: *Trace metal chemistry in air-zone filed soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in soil phases*, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46**, 260–264 (1982).
- [7] Tessier A., P.G.C. Campbell, M. Bisson: *Sequential extraction procedure for the speciation of particular trace metals*, *Anal. Chem.*, **51**, 844–850 (1979).

Wpłynęło: 24 lutego 2003, zaakceptowano do druku: 1 lipca 2003.