

Katedra Chemii Rolnej i Środowiskowej,
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie,
Al. Mickiewicza 21, 31-120 Kraków,
e-mail: rrantonk@cyf-kr.edu.pl

JACEK ANTONKIEWICZ, BARBARA WIŚNIEWSKA-KIELIAN

Wpływ odpadów paleniskowych i komunalnych osadów ściekowych na pobieranie Ca, Mg, K, Na i P przez mieszankę traw

Effect of furnace waste and municipal sewage sludge on the Ca, Mg, K, Na
and P uptake by a mixture of grasses

Streszczenie. Do biologicznego zagospodarowania skały popiołowej zaleca się wykorzystywanie komunalnych osadów ściekowych, które są zasobne w materię organiczną oraz makroelementy i mikroelementy niezbędne dla roślin. Celem przeprowadzonych badań było poznanie wpływu wzrastających dodatków komunalnych osadów ściekowych na wielkość plonu oraz pobieranie K, Ca, Mg, Na i P przez mieszankę traw wykorzystywaną do biologicznego zagospodarowania składowiska odpadów paleniskowych. Schemat doświadczenia obejmował 5 obiektów, różniących się dawką komunalnych osadów ściekowych stosowanych na 1 hektar: I. obiekt kontrolny; II. 25 Mg s.m.; III. 50 Mg s.m.; IV. 75 Mg s.m.; V. 100 Mg s.m. Zastosowany osad ściekowy spowodował zwiększenie plonu mieszanki traw. Zawartość K, Ca, Mg, Na i P w mieszance zależała istotnie od dawki osadu ściekowego. Wzrastające dawki osadu ściekowego powodowały istotne zwiększenie zawartości tych makroskładników w biomase mieszanki. Stwierdzono, że wzrastające dawki osadu ściekowego w jeszcze większym stopniu różnicowały pobieranie makroskładników przez mieszankę traw, powodując zwiększenie ich ilości odprowadzanej z plonem. Zawartość badanych pierwiastków w tej mieszance oceniono pod względem wartości paszowej. Stwierdzono, że zawartość tych pierwiastków w mieszance traw uprawianej wyłącznie na popiele mieściła się poniżej wartości optymalnych, natomiast po zastosowaniu największej dawki osadu ściekowego zawartości makroskładników w roślinach osiągnęły wartości optymalne.

Słowa kluczowe: popioły paleniskowe, komunalne osady ściekowe, mieszanka traw, plon, zawartość, K, Ca, Mg, Na, P, pobranie, stosunki ilościowe

WSTĘP

Mieszanki popiołowo-żużłowe stanowią około 8,6% całkowitej ilości wytwarzanych odpadów przemysłowych w Polsce. W 2012 r. ogólna ilość tych mieszanek zdeponowanych na składowiskach wynosiła ponad 9 mln Mg [Ochrona Środowiska 2013], co może stanowić duże zagrożenie dla środowiska. Składowanie odpadów paleniskowych bez okrywy roślinnej może prowadzić do erozji oraz stanowić źródło zapylenia powietrza i zagrożenia dla jakości gleb, wód powierzchniowych i podziemnych [Dellantonio i in. 2008]. W związku z tym powinno się prowadzić zintegrowane działania w kierunku przyrodniczego zagospodarowania tych odpadów, m.in. poprzez rekultywację składowisk odpadów paleniskowych [Goswami i Mahanta 2007]. Popioły paleniskowe oprócz szeregu metali ciężkich, w tym pierwiastków z grupy mikroelementów [Zhang i Itoh 2006], zawierają znaczne ilości makroskładników, które mogą stanowić źródło składników nawozowych oraz mogą oddziaływać na jakość uzyskanej biomasy roślin [Palumbo i in. 2007; Antonkiewicz 2010]. Ponieważ popioły paleniskowe zawierają trudno rozpuszczalne formy składników, zaleca się stosowanie komunalnych osadów ściekowych, które jednocześnie mogą stanowić źródło dostępnych makroskładników dla roślin wykorzystywanych w biologicznym zagospodarowaniu tych odpadów [Rosik-Dulewska i in. 2008].

Celem badań było poznanie wpływu wzrastających dawek komunalnych osadów ściekowych na wielkość plonu oraz pobieranie K, Ca, Mg, Na i P przez mieszanek traw wykorzystywaną do biologicznego zagospodarowania składowiska odpadów paleniskowych. Niniejsza praca jest kontynuacją badań nad wpływem komunalnych osadów ściekowych na plonowanie i pobieranie metali ciężkich przez mieszanek traw [Antonkiewicz 2009].

MATERIAŁ I METODY

Badania nad wpływem wzrastających dawek komunalnych osadów ściekowych na plonowanie oraz pobieranie makroelementów przez mieszanek traw przeprowadzono w latach 2005–2007 w warunkach doświadczenia polowego, na składowisku odpadów paleniskowych, należącym do Firmy Chemicznej Dwory SA w Oświęcimiu. Jednoczynnikowe doświadczenie polowe założono w układzie losowanych bloków, w czterech powtórzeniach. Powierzchnia poletek wynosiła 10 m². Składowisko posiada między innymi nieczynną kwaterę popiołową, wypełnioną odpadami paleniskowymi, tj. mieszanek popiołowo-żużłową z mokrego odprowadzania odpadów paleniskowych, o numerze katalogowym 10 01 80 [Rozporządzenie... 2001]. Składowany popiół, tj. mieszanek popiołowo-żużłowa została doprowadzona hydrotransportem i zdeponowana w kwaterze popiołowej.

W doświadczeniu zastosowano wzrastające dawki komunalnych osadów ściekowych. Schemat doświadczenia obejmował 5 obiektów: I. obiekt kontrolny; II. 25 Mg s.m.; III. 50 Mg s.m.; IV. 75 Mg s.m. i V. 100 Mg s.m. komunalnych osadów ściekowych na 1 hektar. Maksymalna dawka komunalnego osadu ściekowego wynosząca 100 Mg s.m. · ha⁻¹ mogła być zastosowana do rekultywacji gruntów na cele rolne i nierolne, w tym np. do rekultywacji składowisk odpadów paleniskowych, zgodnie z obowiązującym wówczas Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 1 sierpnia 2002 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych [Rozporządzenie... 2002].

Komunalne osady ściekowe, bez uzupełniającego nawożenia mineralnego (NPK) zastosowano powierzchniowo na dwa tygodnie przed wysianiem mieszanki traw. We wcześniejszych badaniach Klimont i Bulińska-Radomska [2009] stwierdzili, że rośliny bobowate (motylkowate) słabiej zadarniały popioły paleniskowe oraz mieszaniny popiołowo-osadowe, dlatego w doświadczeniu połowym założonym na składowisku odpadów paleniskowych zastosowano mieszankę składającą się wyłącznie z roślin trawiastych. Wysiano mieszankę nasion traw o następującym składzie: *Festuca rubra* (L.) – kostrzewa czerwona, odm. ‘Brdzińska’ (20%), *Festuca arundinacea* (Schreb.) – kostrzewa trzcinowa, odm. ‘Skarpa’ (25%), *Festuca pratensis* (L.) – kostrzewa łąkowa, odm. ‘Skiba’ (25%), *Poa pratensis* (L.) – wiechlina łąkowa, odm. ‘Skiz’ (5%) i *Lolium perenne* (L.) – życica trwała (rajgras angielski), odm. ‘Solen’ (25%).

Mieszankę traw wysiano ręcznie w pierwszej dekadzie sierpnia 2005 r. w ilości $53 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Norma wysiewu traw została zwiększona o 50%, ponieważ trawy początkowo słabo kiełkują w glebie o odczynie zasadowym [Antonkiewicz i Radkowski 2006; Klimont i Bulińska-Radomska 2009]. W początkowym okresie po wysiewie nasion mieszanki traw poletka zraszano wodą w miarę wysychania podłoża na głębokość 2 cm, a po 3 tygodniach od wysiewu wykonano obserwacje wschodów. Rośliny w pierwszym roku wegetacji zebrano w pierwszej dekadzie października (1 odrost), natomiast w kolejnych latach koszono jednokrotnie, w pierwszej dekadzie września. Jednokrotny zbiór mieszanki traw wynikał z warunków panujących w miejscu prowadzenia doświadczenia, m.in. intensywnego pylenia składowiska, co ograniczało plonowanie roślin, zwłaszcza w I i II roku badań (tab. 2).

Po zbiorach materiał roślinny wysuszono w suszarce z wymuszonym obiegiem powietrza w temp. 70°C , a następnie określono wielkość plonu suchej masy. Próbkę materiału roślinnego poddano mineralizacji na sucho w piecu muflowym w temp. 450°C , a uzyskany popiół roztworzono w 20% kwasie azotowym(V). W pracy przedstawiono średnie plony mieszanki traw z poszczególnych powtórzeń z lat 2005–2007 oraz średni plon z całego okresu badawczego (tab. 2). Na rycinie 1 zaprezentowano średnie ważone zawartości pierwiastków z badanego okresu, z lat 2005–2007. W popiele i osadzie ściekowym oznaczono zbliżone do całkowitych zawartości pierwiastków, po uprzednim spopieleniu materii organicznej i trawieniu w mieszaninie kwasów HClO_4 i HNO_3 (3:2, v/v) [Ostrowska i in. 1991]. Zawartość K, Ca, Mg, Na i P w mineralizatach popiołu i osadu oraz materiału roślinnego oznaczono z wykorzystaniem spektrometru emisji atomowej z indukcyjnie wzbudzoną plazmą argonową (ICP-OES). W pracy przedstawiono także stosunki ilościowe pomiędzy badanymi składnikami w mieszance traw (ryc. 3). Obliczono proporcje masowe K : Na, Ca : Mg i Ca : P oraz proporcje równoważnikowe K : (Ca+Mg), K : Mg i K : Ca.

WYNIKI BADAŃ

Podstawowe właściwości fizyczno-chemiczne odpadów zastosowanych w doświadczeniu połowym podano w tabeli 1.

Analiza uziarnienia wykazała, że zdeponowany popiół paleniskowy odpowiadał pod względem składu granulometrycznego pyłowi zwykłemu [Systematyka gleb... 1989].

Oznaczona zawartość węgla organicznego i azotu ogółem w popiele paleniskowym wskazuje na obecność resztek niespalonego węgla [Schumann i Sumner 2000; Mazur i Koniecznyński 2004].

Zawartość Ca, Mg i Na w popiele paleniskowym była odpowiednio 15,0, 5,4 i 1,7 razy większa w porównaniu z zawartością tych pierwiastków w komunalnych osadach ściekowych (tab. 1). Komunalne osady ściekowe zastosowane na składowisku odpadów paleniskowych wykazywały odczyn lekko kwaśny, a zawartość węgla organicznego, azotu i fosforu ogółem była odpowiednio 6,7, 25 i 6,5 razy większa niż w popiele paleniskowym (tab. 1).

Komunalne osady ściekowe stanowiły więc zasobne źródło przyswajalnych form makroelementów, głównie P, K i Mg (tab. 1). Oceniając komunalne osady ściekowe, stwierdzono, że pod względem zawartości metali ciężkich spełniały one wymagania dopuszczające ich stosowanie w rolnictwie i rekultywacji gruntów na cele rolne i nierolne [Rozporządzenie... 2002, 2010].

Tabela 1. Właściwości odpadów zastosowanych w doświadczeniu polowym
Table 1. Properties of wastes used in the field experiment

Parametr Parameter		Jednostka Unit	Popiół/Ash	Osady ściekowe Sewage sludge
			zawartość/content	
pH	H ₂ O	pH	8,83	6,72
	KCl 1 mol·dm ⁻³		8,74	6,25
Uziarnienie/Texture		–	Plz*	–
Sucha masa/Dry mass		%	77,15	20,56
Węgiel organiczny/Organic carbon		g·kg ⁻¹ s.m.	40,36	268,46
Azot ogółem/Total nitrogen			1,55	38,91
Wapń/Calcium			15,23	2,82
Magnez/Magnesium			8,69	0,58
Potas/Potassium			1,83	1,93
Sód/Sodium			1,45	0,85
Fosfor/Phosphorus			2,11	13,60
P przyswajalny/Available P		mg·kg ⁻¹ s.m.	145,98	648,96
K przyswajalny/Available K			121,62	412,48
Mg przyswajalny/Available Mg			453,97	865,87

* Plz – pył zwykły/ silt

Plony suchej masy mieszanki traw

Wpływ wzrastających dawek komunalnego osadu ściekowego na plonowanie mieszanki traw uprawianych na składowisku odpadów paleniskowych był szczegółowo przedstawiany we wcześniejszej pracy [Antonkiewicz 2009]. Plony mieszanki traw uzyskane w doświadczeniu polowym w poszczególnych latach 2005–2007 oraz średnie z lat 2005–2007 przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Plony mieszanki traw (Mg s.m.·ha⁻¹)
Table 2. Yields of grass mixture (Mg d.m.·ha⁻¹)

Obiekt Object	Dawka osadów ściekowych Dose of sewage sludge	Rok wegetacji/Year of vegetation			Średnia Average
		2005	2006	2007	
I	Kontrola – Control	0,09	0,88	1,10	0,69
II	25	0,27	1,62	2,10	1,33
III	50	0,44	2,64	3,76	2,28
IV	75	0,78	3,36	4,71	2,95
V	100	1,13	4,58	6,39	4,03
RSD (%)*		76,62	55,51	57,99	58,44
NIR _(α=0,05) /LSD _(α=0,05)		0,10	0,27	0,41	0,220

* Względne odchylenie standardowe/ Relative standard deviation

Średnie plony suchej masy mieszanki traw uzyskane w latach 2005–2007 na składowisku odpadów paleniskowych wahały się, w zależności od obiektu, od 0,69 do 4,03 Mg s.m. · ha⁻¹ (tab. 2). Najmniejszy plon mieszanki traw uzyskano w obiekcie kontrolnym, na którym nie zastosowano osadu ściekowego. Otrzymany plon mieszanki traw uprawianej wyłącznie na popiele paleniskowym można wytłumaczyć niekorzystnymi właściwościami fizyczno-chemicznymi podłoża oraz niedoborem przyswajalnych składników pokarmowych w porównaniu z obiektami nawożonymi komunalnymi osadami ściekowymi (tab. 1).

Zastosowanie komunalnych osadów ściekowych na składowisku odpadów paleniskowych skutkowało istotnym zwiększeniem plonu mieszanki traw. Osady ściekowe w najmniejszej dawce, tj. 25 Mg s.m. · ha⁻¹, spowodowały średni przyrost plonu mieszanki traw o 94% w porównaniu z uzyskanym w obiekcie kontrolnym. Podwojenie dawki osadu ściekowego (50 Mg s.m. · ha⁻¹) spowodowało zwiększenie plonu o 230% w porównaniu z obiektem kontrolnym. Kolejne dawki osadu ściekowego również wpływały pozytywnie na wielkość plonu. Największy średni plon mieszanki traw uzyskano w obiekcie, w którym zastosowano osad ściekowy w ilości 100 Mg s.m. · ha⁻¹. Plon mieszanki traw z tego obiektu był większy o ponad 484% od uzyskanego w obiekcie kontrolnym. Z przeprowadzonych badań na składowisku odpadów paleniskowych wynika, że największy efekt plonotwórczy uzyskano w obiekcie, w którym zastosowano 100 Mg · ha⁻¹ s.m. osadu ściekowego.

Plony mieszanki traw uzyskane w latach 2005–2007 były jednak zróżnicowane (tab. 2). Najmniejsze plony uzyskano w pierwszym roku badań, co należy tłumaczyć długim okresem wschodów mieszanki traw oraz krótszym okresem ich wegetacji. Znacznie większe plony mieszanki traw uzyskano w drugim roku, a największe w trzecim roku wegetacji. W zależności od obiektu plony w trzecim roku badań były od 5,7 do 12,2 razy większe w porównaniu z uzyskanymi w pierwszym roku wegetacji. Największy przyrost plonu, w porównaniu z pierwszym rokiem wegetacji, zanotowano w obiekcie kontrolnym, a najmniejszy po zastosowaniu największej dawki osadu ściekowego. Największy przyrost plonu zanotowany w przypadku mieszanki traw uprawianej wyłącznie na popiele paleniskowym, był skutkiem rozkrzewienia się roślin.

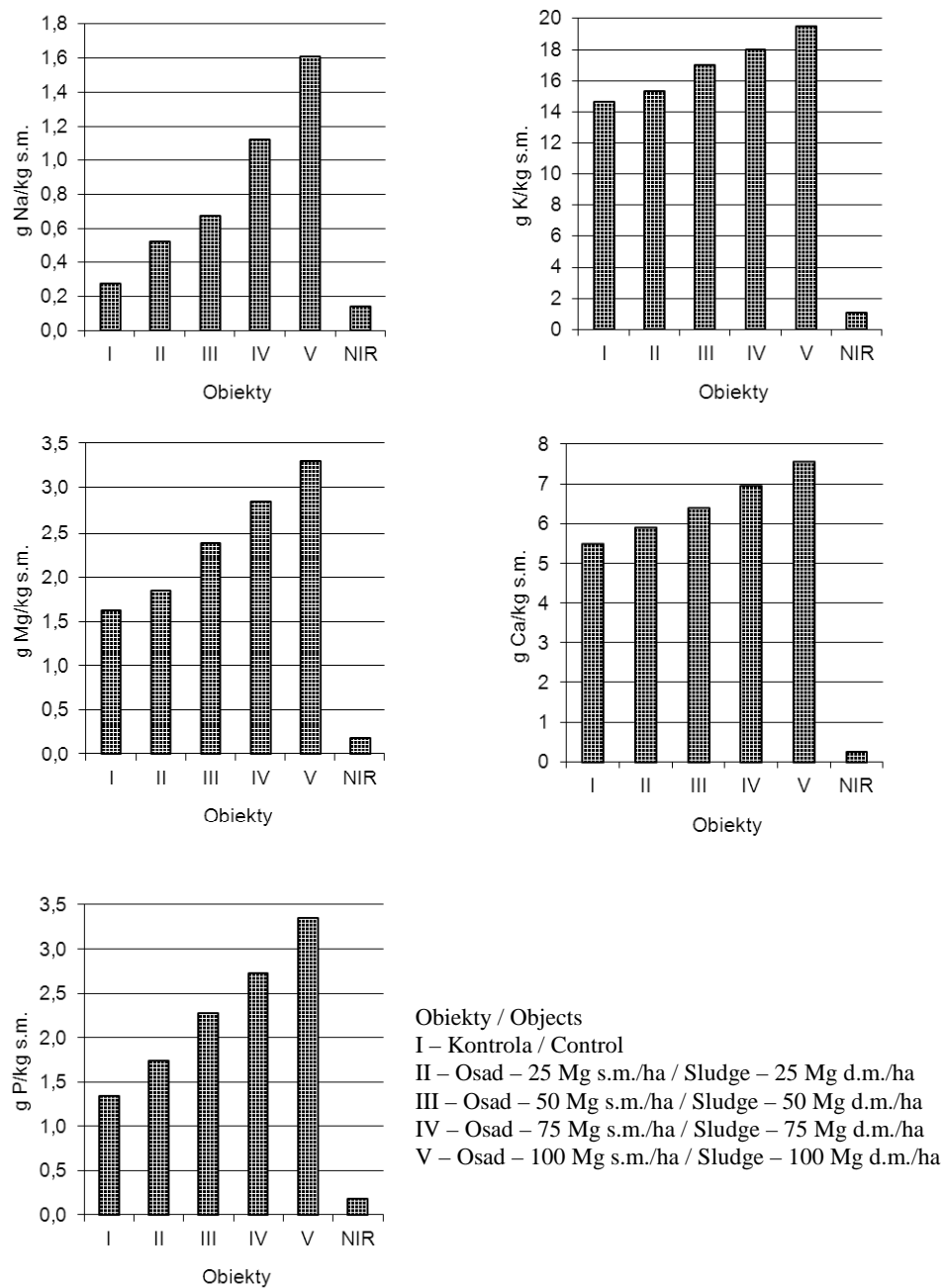
Potencjalnym źródłem K, Ca, Mg, Na i P dla mieszanki traw uprawianej na składowisku był popiół paleniskowy i komunalne osady ściekowe (tab. 1). W zależności od dawki osadów ściekowych, zawartość pierwiastków w mieszance traw była zróżnicowana i wahała się w zakresie: 14,62–19,49 g K; 5,51–7,56 g Ca; 1,62–3,31 g Mg; 0,27–1,11 g Na i 1,34–3,35 g P · kg⁻¹ s.m. (rys. 1). Największe zróżnicowanie zanotowano w zawartości Na w uzyskanej biomase mieszanki traw (RSD = 63%), następnie P (RSD = 35%) i kolejno Mg (RSD = 29%), a najmniejsze dotyczyło Ca i K (RSD = 13% i 12%). W doświadczeniu stwierdzono, że zastosowanie komunalnych osadów ściekowych na składowisku odpadów paleniskowych spowodowało istotne zwiększenie zawartości K, Ca, Mg, Na i P w mieszance traw (rys. 1). Zastosowanie komunalnego osadu ściekowego już w dawce 25 Mg s.m. · ha⁻¹ skutkowało istotnym zwiększeniem zawartości Ca, Mg, Na i P. Zarejestrowano również zwiększoną zawartość K w mieszance traw, aczkolwiek przyrost zawartości tego składnika był nieistotny. Kolejne dawki osadu ściekowego również wywołały istotny wzrost zawartości badanych makroskładników w mieszance traw. Największe przyrosty zawartości tych pierwiastków zanotowano po zastosowaniu osadów ściekowych w dawce 100 Mg s.m. · ha⁻¹. Przyrosty zawartości Na, P, Mg, Ca i K w wyniku zastosowania tej dawki osadu wynosiły odpowiednio: ponad 488%, 150%, 104%, 37% i 33%, w stosunku do stwierdzonych w biomase z obiektu kontrolnego. Z badań wynika, że najbardziej zwiększyła się zawartość Na, a najmniejsze przyrosty zanotowano w przypadku K i Ca.

Pobranie pierwiastków z plonem mieszanki traw

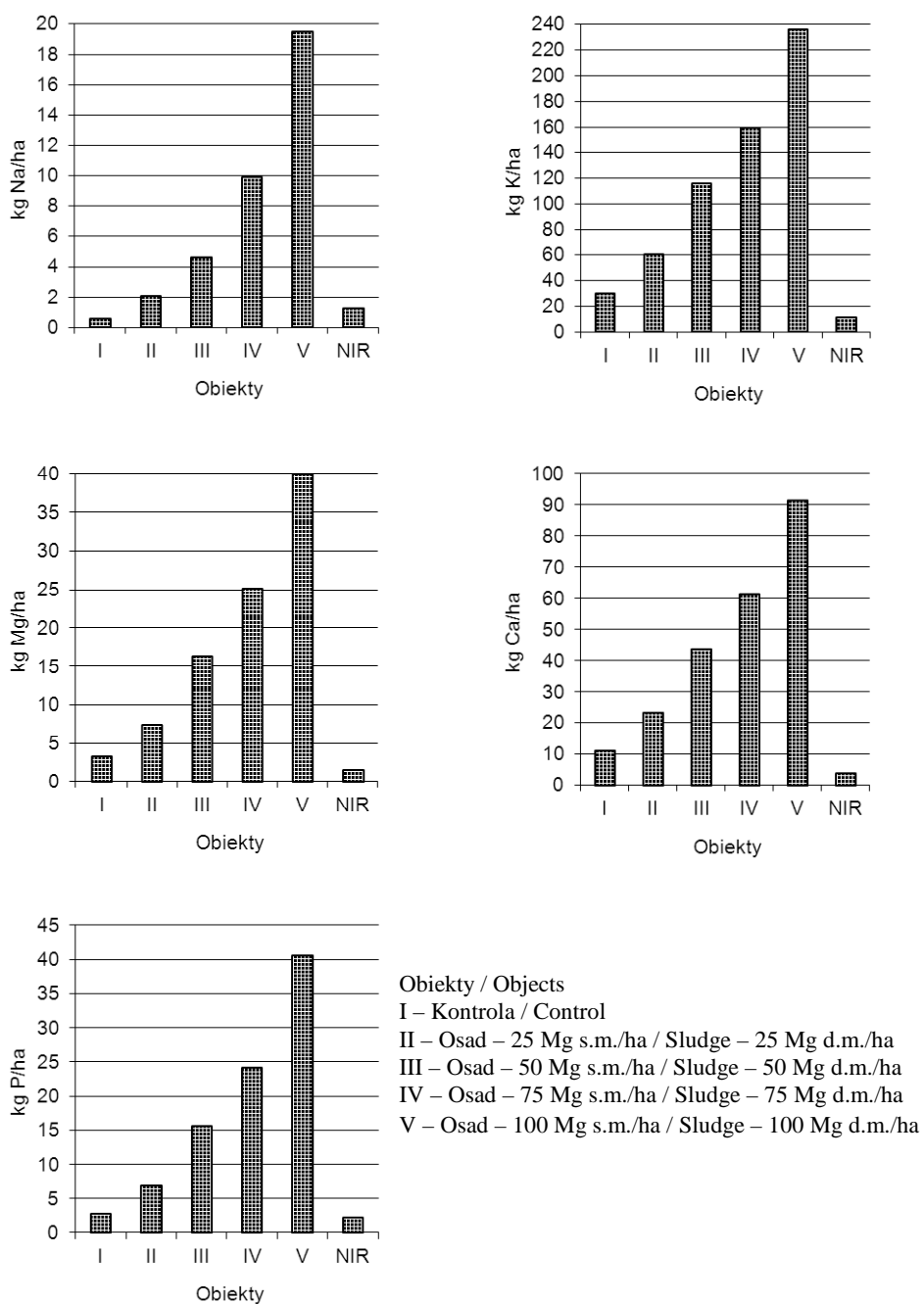
W pracy podano sumaryczne pobranie pierwiastków z trzyletniego okresu badań (2005–2007). Ilość pierwiastków wyniesionych (pobranych) z obiektów (ze składowiska) zależała od wielkości plonu i zawartości danego pierwiastka w plonie (rys. 2). Wzrastające dawki komunalnego osadu ściekowego skutkowały zwiększonym pobraniem K, Ca, Mg, Na i P z plonem mieszanki traw (rys. 2). Ilość pobranych makroskładników, niezależnie od dawki osadu ściekowego, była zróżnicowana i wahała się w zakresie: 30,29–235,98 kg K; 11,40–91,52 kg Ca; 3,35–39,98 kg Mg; 0,56–19,49 kg Na; 2,27–40,57 kg P · ha⁻¹ (rys. 2).

Zastosowane na składowisku komunalne osady ściekowe w dawce 100 Mg s.m. · ha⁻¹ w największym stopniu wpłynęły na wielkość pobrania K, Ca, Mg, Na i P z plonem mieszanki traw. Pobranie Na, P, Mg, Ca i K po zastosowaniu największej dawki osadów ściekowych było odpowiednio 33,6; 13,7; 10,9; 7,0 i 6,8 razy większe w porównaniu z zanotowanym w obiekcie kontrolnym, w którym mieszankę traw uprawiano na samym popiele, bez dodatku osadów ściekowych. W badaniach stwierdzono, że im mniejsza dawka osadów ściekowych, tym mniejsze było pobranie tych pierwiastków z plonem biomasy mieszanki traw. Najmniejsze pobranie pierwiastków stwierdzono w obiekcie kontrolnym, co wiązało się głównie z najmniejszym plonem i małą zawartością tych pierwiastków w plonie traw (tab. 2, rys. 1).

Zawartość makroelementów w mieszanke traw

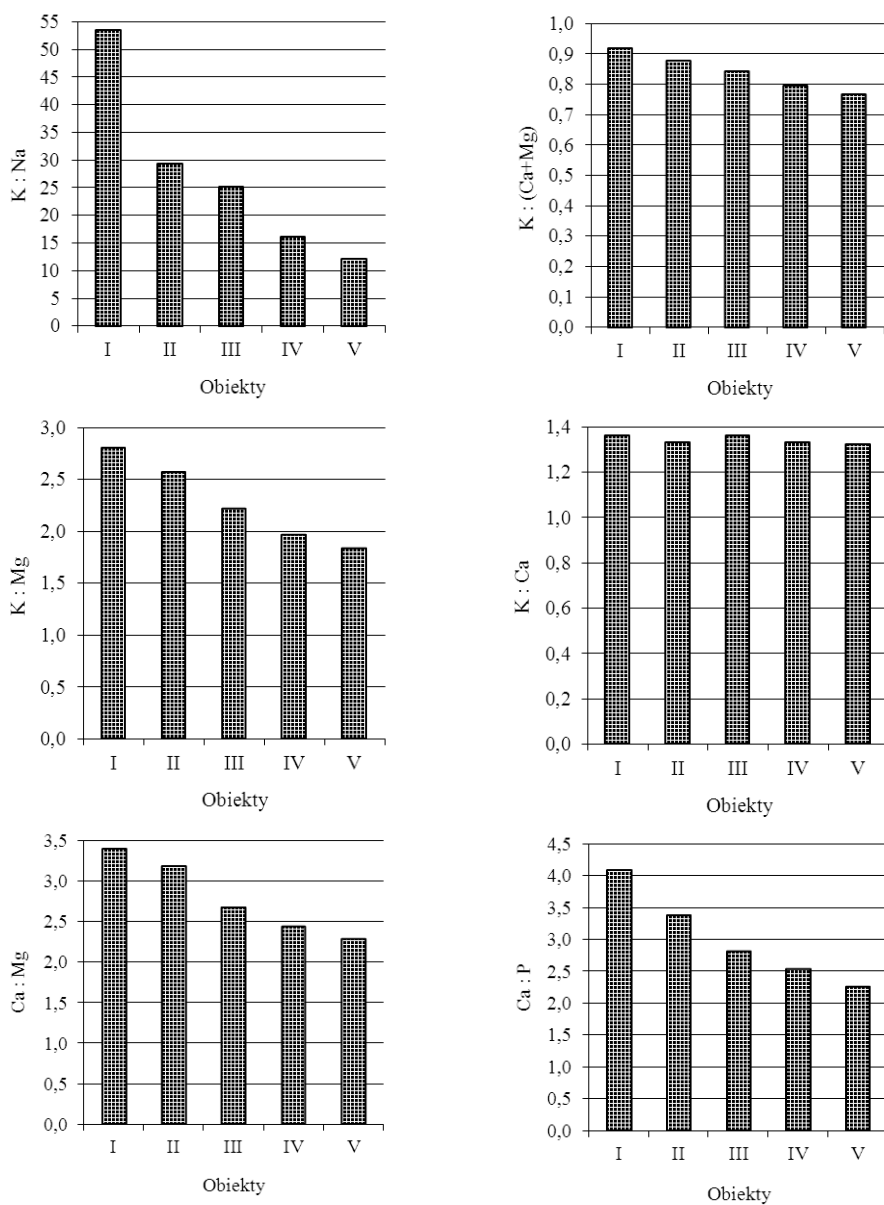


Rys. 1. Średnia ważona z trzech lat zawartość makroelementów w mieszanke traw
 Fig. 1. The weighted average of the three years of macroelements content in grass mixture



Rys. 2. Pobranie makroelementów z plonem mieszanki traw w okresie 2005–2007 r.
 Fig. 2. Uptake of macroelements with yield of grass mixture in the period 2005–2007

Proporcje pomiędzy pierwiastkami w mieszance traw



Obiekty / Objects

I – Kontrola / Control

II – Osad – 25 Mg s.m./ha / Sludge – 25 Mg d.m./ha

III – Osad – 50 Mg s.m./ha / Sludge – 50 Mg d.m./ha

IV – Osad – 75 Mg s.m./ha / Sludge – 75 Mg d.m./ha

V – Osad – 100 Mg s.m./ha / Sludge – 100 Mg d.m./ha

Rys. 3. Proporcje pomiędzy makroelementami w mieszance traw

Fig. 3. Relation between macroelements in grass mixture

Do celów poznawczych w pracy przedstawiono proporcje pomiędzy pierwiastkami zawartymi w zebranej biomase mieszanki traw. Z badań wynika, że zastosowane wzrastające dawki osadów ściekowych na składowisku popiołów paleniskowych modyfikowały wielkość wartości proporcji pomiędzy oznaczonymi pierwiastkami (rys. 3). W doświadczeniu stwierdzono duży zakres zmienności tych proporcji, co wskazuje, że mieszanka traw uprawiana na odpadach cechowała się dużą tolerancją na kształtowanie się stosunków pomiędzy pierwiastkami. Największą zmienność stwierdzono w przypadku proporcji masowej K : Na (RSD = 60%), natomiast najmniejszą zmienność w przypadku proporcji równoważnikowej K : Ca (RSD = 1,5%). Zastosowanie wzrastających dawek komunalnych osadów ściekowych na składowisku popiołów skutkowało zmniejszeniem wartości proporcji K : Na, K : (Ca + Mg), K : Mg, Ca : Mg oraz Ca : P w biomase mieszanki traw w porównaniu z uzyskaną w obiekcie kontrolnym. W przypadku proporcji K : Ca stwierdzono, że dodatek osadów ściekowych do popiołów paleniskowych nie miał większego wpływu na wartość tego stosunku w mieszance traw (Rys. 3).

Uzyskaną biomasę mieszanki traw oceniono w oparciu o kryteria wartości pokarmowej paszy, według których optymalne stosunki: K : Na, K : (Ca+Mg), K : Mg, K : Ca, Ca : Mg i Ca : P powinny wynosić odpowiednio: 10 : 1; 1,62–2,2 : 1; 6 : 1, 2 : 1, 2–3 : 1 i 2 : 1 [Wiśniowska-Kielian, Lipiński 2007]. Z badań wynika, że wzrastające dawki osadów ściekowych zawężyły stosunek K : Na do wartości optymalnej. Wartość proporcji K : (Ca + Mg) nie powinna być mniejsza od 1,62 i nie powinna przekraczać 2,2. Wartość tego stosunku w obiekcie kontrolnym była zbyt mała i nie przekraczała jedności, a wzrastające dawki osadów ściekowych wpływały niekorzystnie na jego wartość, powodując jego zawężenie. Wartość optymalna stosunku K : Mg wynosi 6 : 1, a w biomase mieszanki traw uprawianej na popiołach paleniskowych (obiekt kontrolny) stwierdzono wartość mniejszą od optymalnej. Wzrastające dawki osadu ściekowego systematycznie zawężyły wartość tego stosunku. Mając na uwadze optymalną wartość proporcji Ca : Mg, która wynosi 2–3 : 1, stwierdzono, że wzrastające dawki komunalnych osadów ściekowych poprawiały wartość stosunku pomiędzy tymi pierwiastkami. Z kolei optymalna wartość stosunku Ca : P mieści się w zakresie od 1 do 7 [Underwood 1971; Czuba i Mazur 1988], ale proporcja Ca : P w układzie kostnym wynosi 2 : 1. Stąd wielu badaczy uznaje tę wartość proporcji za najbardziej odpowiednią w paszy [Falkowski i in. 2000]. W mieszance traw uprawianej na popiele i nawożonej osadami ściekowymi wartość tego stosunku mieściła się w optymalnych granicach. Biorąc pod uwagę optymalną wartość proporcji Ca : P, która wynosi 2 : 1, stwierdzono, że wzrastające dawki osadów ściekowych poprawiały wartość tego stosunku.

DYSKUSJA

W ostatnich latach podejmuje się próby zastosowania popiołów paleniskowych w rolnictwie, ochronie środowiska oraz w gospodarce komunalnej, głównie do zobojętniania kwaśnych ścieków przemysłowych. Pozwala to na racjonalne wykorzystanie tych odpadów, przy jednoczesnym ograniczaniu ich masy przeznaczonej do składowania [Galos i Uliasz-Bocheńczyk 2005; Pyssa 2005]. W badanych popiołach paleniskowych stwierdzono charakterystyczne, duże zawartości wapnia i magnezu, co świadczy o silnie alkalicznych właściwościach tego odpadu. Z tego względu mogą być one wykorzystywa-

ne do odkwaszania komunalnych osadów ściekowych lub do odkwaszania gleb czy stabilizacji gruntów [Swanepoel i Strydom 2002]. Komunalne osady ściekowe zawierały znacznie więcej fosforu w porównaniu z popiołem paleniskowym. Badania innych autorów [Kukier i in. 2003; Kalisz i in. 2012] również potwierdzają dużą zawartość wapnia i magnezu w popiele paleniskowym, a fosforu w komunalnych osadach ściekowych. W zagospodarowaniu skały popiołowej, pozbawionej materii organicznej, zaleca się stosowanie komunalnych osadów ściekowych, które stanowią cenne źródło zarówno węgla organicznego, jak i składników pokarmowych [Zhang i in. 2001; Oudeh i in. 2002].

Stosowanie osadów ściekowych w biologicznym zagospodarowaniu składowisk odpadów paleniskowych poprawia ich właściwości fizyczne, chemiczne i biologiczne, m.in. przez zwiększenie dostępności dla roślin makroskładników zawartych w podłożu [Antonkiewicz 2010]. W badaniach stwierdzono istotny wpływ wzrastających dawek osadów ściekowych na zawartość K, Ca, Mg, Na i P w mieszance traw. Z badań wynika, że źródłem tych makroskładników dla roślin były zastosowane komunalne osady ściekowe, ponieważ podczas ich mineralizacji składniki te są udostępniane dla roślin. W popiołach paleniskowych K, Ca, Mg, Na i P występują w formach trudno rozpuszczalnych związków, m.in. w formach węglanowych, spineli Al-Mg, różnych minerałów, fazach oraz w formach różnych połączeń organo-mineralnych [Żelechower i in. 1998; Ratajczak i in. 1999]. Na przykład fosfor może wchodzić w skład szkliwa, bowiem jony P^{5+} mogą podstawiać Si^{4+} w jego strukturze. Niezależnie od tego obecność fosforu, przy równoczesnej obecności wapnia, a także innych składników, może sugerować, że w badanym materiale występują bliżej niezidentyfikowane fazy fosforanowe [Ratajczak i in. 1999]. Powstałe w wyniku termicznego rozkładu węgla niezidentyfikowane minerały zawierają składniki trudno dostępne dla roślin. Stąd alternatywnym źródłem makroskładników dla roślin mogą być komunalne osady ściekowe.

Biomasa uzyskana z mieszanki traw przeznaczonej do biologicznego zagospodarowania składowiska odpadów paleniskowych nie powinna być przeznaczana na paszę ze względu na ryzyko występowania w niej metali ciężkich w ilościach ponadprogowych, dyskwalifikujących ją jako paszę. Uzyskany plon mieszanki traw winien być przeznaczony na biomase, jako surowiec energetyczny czy też do produkcji kompostu. Przemysłowe przeznaczenie biomasy roślin jest ponadto gwarancją wyłączenia metali ciężkich z łańcucha troficznego. W pracy zwrócono uwagę na pierwiastki, takie jak potas, wapń, magnez, sód i fosfor, które występują w roślinach w zróżnicowanych ilościach, jednak niezbędnych do prawidłowego ich wzrostu i rozwoju [Falkowski i in. 2000]. Dlatego do celów poznawczych zawartość tych pierwiastków w mieszance traw poddano ocenie, biorąc pod uwagę kryterium przydatności paszowej.

Dla badanych pierwiastków przyjęto następujące wartości optymalne, poniżej których występuje ich niedobór w roślinach przeznaczonych na paszę: 17–20 g K; 7,0 g Ca; 2,0 g Mg; 1,5–2,5 g Na i 3,0 g P · kg⁻¹ s.m. [Falkowski i in. 2000; Epstein i Bloom 2004]. Mogą jednak występować duże odchylenia od tych wartości, zależne m.in. od warunków środowiskowych. Wykazano, że zawartości wymienionych makroskładników w mieszance traw uprawianej wyłącznie na popiele paleniskowym nie spełniały powyższych kryteriów wartości optymalnych. Zawartości tych pierwiastków utrzymywały się na niskim poziomie, poniżej wartości optymalnych. Zastosowanie komunalnych osadów ściekowych w dawce 100 Mg s.m. · ha⁻¹ spowodowało zwiększenie zawartości tych ma-

kroskładników w mieszance traw, w wyniku czego zawartości K, Ca, Mg, Na i P mieściły się w granicach wartości optymalnych.

Z badań własnych oraz literatury naukowej [Sienkiewicz i Czarnecka 2012] wynika, że komunalne osady ściekowe stanowią nie tylko źródło metali ciężkich, ale także są źródłem makroelementów i mikroelementów, które w warunkach alkalicznego podłoża są na ogół dostępne dla roślin.

Z badań własnych wynika, że proporcje między pierwiastkami w mieszance traw były wyraźnie modyfikowane na skutek zastosowania komunalnych osadów ściekowych. Pod wpływem wzrastających dawek osadów ściekowych stosunki pomiędzy pierwiastkami ulegały systematycznemu zawężaniu. Wcześniejsze badania potwierdzają, że komunalne osady ściekowe zastosowane w zagospodarowaniu popiołów powodują zawężanie wartości stosunków pomiędzy makroskładnikami w warunkach alkalicznego podłoża [Antonkiewicz 2010].

WNIOSKI

1. Komunalne osady ściekowe, zastosowane we wzrastających dawkach, spowodowały istotne zwiększenie plonów mieszanki traw uprawianej na składowisku odpadów paleniskowych.

2. Zastosowanie wzrastających dawek komunalnych osadów ściekowych spowodowało istotne zwiększenie zawartości oraz pobrania K, Ca, Mg, Na i P z plonem mieszanki traw uprawianej na składowisku odpadów paleniskowych.

3. Po zastosowaniu największej dawki osadu ściekowego ($100 \text{ Mg s.m.} \cdot \text{ha}^{-1}$) zawartości K, Ca, Mg, Na i P w mieszance traw mieściły się w granicach wartości optymalnych, według kryteriów przydatności paszowej.

4. Wzrastające dawki komunalnego osadu ściekowego skutkowały wyraźnym zmniejszeniem wartości stosunków pomiędzy badanymi pierwiastkami w mieszance traw.

PIŚMIENNICTWO

- Antonkiewicz J., 2009. Ocena przyrodniczego wykorzystania popiołów paleniskowych i komunalnych osadów ściekowych. Zesz. Nauk UR w Krakowie, 331, Rozprawy 454.
- Antonkiewicz J. 2010. Effect of sewage sludge and furnace waste on the content of selected elements in the sward of legume-grass mixture. *J. Elementol.*, 15(3), 435–443.
- Antonkiewicz J., Radkowski A. 2006. Przydatność wybranych gatunków traw i roślin motylkowatych do biologicznej rekultywacji składowisk popiołów paleniskowych. *Annales UMCS, sec. E, Agriultura* 61, 413–421.
- Czuba R., Mazur T., 1988. Wpływ nawożenia na jakość plonów. PWN, Warszawa.
- Dellantonio A., Fitz W.J., Custovic H., Repmann F., Schneider B.U., Grünwald H., Gruber V., Zgorelec Z., Zerem N., Carter C., Markovic M., Puschenreiter M., Wenzel W.W., 2008. Environmental risks of farmed and barren alkaline coal ash landfills in Tuzla, Bosnia and Herzegovina. *Environ. Poll.* 153, 677–686.
- Epstein E., Bloom A.J., 2004. Mineral nutrition of plants: principles and perspectives. Sinauer Associates, Inc. Publishers, Sunderland, Massachusetts, 47, 207–225.

- Falkowski M., Kukułka I., Kozłowski S., 2000. Właściwości chemiczne roślin łąkowych. Wyd. AR Poznań.
- Galos K., Uliasz-Bocheńczyk A., 2005. Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce. *Gosp. Sur. Min.* 21(1), 23–42.
- Goswami R.K., Mahanta C., 2007. Leaching characteristic of residual lateritic soil stabilised with fly ash and lime for geotechnical applications. *Waste Manage.* 27, 466–481.
- Kalisz B., Lachach A., Glazewski R., Klasa A., 2012. Effect of municipal sewage sludge under *Salix* plantations on dissolved soil organic carbon pools. *Arch. Environ. Prot.* 38(4), 87–97.
- Klimont K., Bulińska-Radowska Z., 2009. Badanie rozwoju wybranych gatunków traw do umacniania składowisk popiołów paleniskowych z elektrociepłowni. *Probl. Inż. Rol.*, 2, 135–144.
- Kukier U., Ishak C.F., Sumner M.E., Miller W.P., 2003. Composition and element solubility of magnetic and non-magnetic fly ash fractions. *Environ. Poll.* 123, 255–266.
- Mazur J., Koniecznyński J., 2004. Dystrybucja pierwiastków śladowych we frakcjach ziarnowych popiołu lotnego emitowanego z elektrowni. Monografia, Wyd. Polit. Śląskiej, Gliwice.
- Ochrona Środowiska, 2013. Informacje i opracowania statystyczne. GUS, Warszawa.
- Ostrowska A., Gawliński S., Szczubiałka Z., 1991. Metody analizy i oceny właściwości gleb i roślin. Katalog. Wyd. IOŚ, Warszawa.
- Oudeh M., Khan M., Scullion J., 2002. Plant accumulation of potential toxic elements in sewage sludge as affected by soil organic matter level and mycorrhizal fungi. *Environ. Poll.* 116, 293–300.
- Palumbo A.V., Tarver J.R., Fagan L.A., McNeilly M.S., Ruther R., Fisher L.S., Amonette J.E., 2007. Comparing metal leaching and toxicity from high pH, low pH, and high ammonia fly ash. *Fuel* 86, 1623–1630.
- Pysa J., 2005. Odpady z energetyki – przemysłowe zagospodarowanie odpadów z kotłów fluidalnych. *Gosp. Sur. Min.* 21(3), 83–92.
- Ratajczak T., Gawel A., Górniak K., Muszyński M., Szydłak T., Wyszomirski P., 1999. Charakterystyka popiołów lotnych ze spalania niektórych węgla kamiennych i brunatnych. *Polskie Towarzystwo Mineralogiczne, Prace Specjalne* 13, 9–34.
- Rosik-Dulewska C., Głowała K., Karwaczyńska U., Robak J., 2008. Elution of heavy metals from granulates produced from municipal sewage deposits and fly-ash of hard and brown coal in the aspect of recycling for fertilization purposes. *Arch. Environ. Prot.* 34(2), 63–72.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 r. w sprawie katalogu odpadów. *Dz.U. RP*, 2001, Nr 112, poz. 1206.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 sierpnia 2002 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych. *Dz.U. RP*, 2002, Nr 134, poz. 1140. (Nie obowiązuje.).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 lipca 2010 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych. *Dz.U. RP*, 2010, Nr 137, poz. 924.
- Schumann A.W., Sumner M.E., 2000. Chemical evaluation of nutrient supply from fly ash-biosolids mixtures. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 419–426.
- Sienkiewicz S., Czarnecka M.H., 2012. Content of available Cu, Zn and Mn in soil amended with municipal sewage sludge. *J. Elementol.* 17(4), 649–657, DOI: 10.5601/jelem.2012.17.4.08.
- Swanepoel J.C., Strydom C.A., 2002. Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. *Appl. Geochem.* 17, 1143–1148.
- Systematyka gleb Polski. PTG, 1989. *Rocz. Glebozn.* 40(3/4), 1–150.
- Underwood S.J., 1971. Żywienie mineralne zwierząt. PWRiL, Warszawa.

- Wiśniowska-Kielian B., Lipiński W. (red.), 2007. Ocena składu chemicznego roślin. Polskie Towarzystwo Inżynierii Ekologicznej, Krajowa Stacja Chemiczno-Rolnicza, Kraków–Warszawa–Wrocław.
- Zhang F.-S., Yamasaki S.-I., Nanzyo M., Kimura K. 2001. Evaluation of cadmium and other metal losses from various municipal wastes during incineration disposal. *Environ. Poll.* 115, 253–260.
- Zhang F.-S., Itoh H., 2006. Extraction of metals from municipal solid waste incinerator fly ash by hydrothermal process. *J. Hazard. Mater. B*, 136, 663–670.
- Żelechower M., Smółka D., Jabłońska M., Dytkiewicz A., 1998. Determination of chemical and phase composition of fly-ashes by combined EPMA and XRD methods. *Microchim. Acta* 15 (Suppl.), 207–210.

Summary. Biological management of fly ash rocks recommends the use of municipal sewage sludge, which is rich in organic matter and macronutrients and micronutrients necessary for plants. The aim of the study was to investigate the effect of increasing additions of municipal sewage sludge on the yielding and K, Ca, Mg, Na and P uptake by a mixture of grasses used for the biological utilization of furnace waste. The experimental design consisted of five objects, differing in doses of municipal sewage sludge introduced on 1 hectare: I. the control object; II. 25 Mg d.m.; III. 50 Mg d.m.; IV. 75 Mg d.m.; V. 100 Mg d.m. The applied sewage sludge increased the yield of a mixture of grasses. The contents of K, Ca, Mg, Na and P in the mixture depended significantly on the dose of sludge. Increasing doses of sludge caused significant increase in the content of these macronutrients in the mixture biomass. It was found that increasing doses of the sludge to an even greater extent differentiated the macronutrients uptake by the grass mixture, causing an increase in their amount taken with the yield. The content of the analyzed macroelements in the mixture biomass was evaluated in terms of fodder value. It was found that the content of these elements in the mixture of grasses grown only on the ash was below the optimal values, while at the highest dose of the sludge the macronutrients content in the plants reached the optimum.

Key words: incineration ashes, municipal sewage sludge, a mixture of grasses, yield, content, K, Ca, Mg, Na, P, uptake, quantitative ratios