

ROŚLINNOŚĆ WIELOLETNIEGO DOŚWIADCZENIA NA MODELOWYM ZŁOŻU ODPADÓW PALENISKOWYCH ENERGETYKI WĘGLOWEJ W LATACH 2005–2017

Kazimierz Henryk Dyguś¹

¹ Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania, Wydział Inżynierii i Zarządzania, ul. Olszewska 12, 00-792 Warszawa, e-mail: k_dygus@wp.pl

STRESZCZENIE

W latach 2005–2017 prowadzono doświadczalnie ocenę udziału roślin w rekultywacji złoża odpadów paleniskowych energetyki węglowej użyźnionego czterema rodzajami kompostów i osadem ściekowym. Złoże odpadów paleniskowych założono w pojemnikach cylindrycznych o średnicy 80 cm (0,5 m² powierzchni) i 100 cm wysokości. Celem eksperymentu była ocena rekultywacyjnej efektywności kompostów i osadu ściekowego na złożu odpadów paleniskowych na podstawie wybranych wskaźników roślinnych (różnorodności, właściwości ekologicznych, plonowania). Corocznie w okresie wegetacyjnym oceniano ilościowo-jakościowy stan i plonowanie roślin zasilanych substancjami użyźniającymi. Wykazano wysokie bogactwo gatunkowe roślin o znacznej biomase. Stwierdzono wysoką efektywność rekultywacyjną złoża odpadów paleniskowych w większości wariantów nawożenia. Podczas wieloletniego eksperymentu wykazano, że oprócz roślin wysianych do pojemników doświadczalnych, duży udział w kształtowaniu pokrywy roślinnej ma flora samosiewna. Wyniki badań dowodzą, że stosowanie kompostów i osadów ściekowych tworzy korzystne warunki dla rozwoju spontanicznej roślinności na złożach odpadów paleniskowych. Podkreślono duże znaczenie roślin w procesie biologicznej rekultywacji złoża odpadów paleniskowych, co w konsekwencji może przyczynić się do zwiększenia powierzchni biologicznie czynnych i poprawy stanu środowiska naturalnego.

Słowa kluczowe: rekultywacja biologiczna, roślinność, odpad paleniskowy, kompost, osad ściekowy

VEGETATION OF A MULTIVARIANT MODEL EXPERIMENT ON COAL COMBUSTION WASTE DEPOSITS IN THE YEARS 2005–2017

ABSTRACT

In the years 2005–2017, an experiment was carried out to assess the share of plants in the reclamation of the furnace waste deposit of coal power plants, fertilized with four types of compost and sewage sludge. The furnace waste deposit was installed in cylindrical containers with a diameter of 80 cm (0.5 sq m) and 100 cm height. The aim of the experiment was to assess the reclamation effectiveness of composts and sewage sludge on the furnace waste deposit based on selected plant indices (diversity, ecological properties, yield). Every year during the growing season, the quantity and quality status and yield of plants fed with fertilizers were evaluated. There was demonstrated a high species richness of plants with significant biomass. High reclamation efficiency of the furnace waste deposit was found in the majority of fertilization variants. During a long-term experiment it was demonstrated that in addition to plants sown in experimental containers, self-seed flora has a large share in shaping the plant cover. The research results prove that the use of composts and sewage sludge creates favourable conditions for the development of spontaneous vegetation on furnace waste deposits. The importance of plants in the process of biological reclamation of furnace waste deposits has been emphasized, which in consequence may contribute to increasing the biologically active area and improving the condition of the natural environment.

Keywords: biological reclamation, vegetation, combustion waste, compost, sewage sludge

WSTĘP

Składowiska odpadów energetyki węglowej, ze względu na ich drobnoziarnistą strukturę, wykazują dużą podatność na erozję wietrzną i wodną. Techniczne sposoby utrwalania tego typu składowisk nie eliminują uciążliwości pyłowej. Odpowiednio dobrane i wysiane gatunki roślin mogą utworzyć na powierzchni składowisk trwałą pokrywę roślinną, i w ten sposób ochronić składowiska przed erozyjnym działaniem wiatru i wody, migracją metali ciężkich do wód gruntowych oraz poprawić estetykę krajobrazu [Siuta 2005, Antonkiewicz, Radkowski 2006].

Metody biologicznej rekultywacji wymagają dużych zasobów ziemi próchnicznej i nakładów finansowych. Tańszym rozwiązaniem jest zainicjowanie procesu glebotwórczego w celu uzyskania odpowiednich warunków siedliskowych do wzrostu i ukształtowania się pokrywy roślinnej. W tym celu stosuje się nawozy organiczne ze względu na duże zawartości składników pokarmowych i substancji próchnicotwórczych. Są to głównie osady ściekowe, komposty, odpady komunalne, torf itp. Wprowadzenie tych substancji na wierzchnią warstwę popiołów paleniskowych inicjuje życie biologiczne a następnie proces glebotwórczy, stwarzając warunki do rozwoju roślin. Materia organiczna tworzy kompleks sorpcyjny chłonący składniki pokarmowe i wodę [Gilewska 1999, Gilewska, Przybyła 2011, Polkowski, Sułek 1999, Siuta 2005, Siuta 2007, Siuta i in 2008, Klimont 2011].

Celem badań była ocena efektywności rekultywacyjnej na doświadczalnym złożu odpadów paleniskowych zasilanych kilkoma rodzajami substancji użyźniających. Ocenę tę uzyskano na podstawie procentowego oszacowania pokrycia

gatunków i plonów roślin oraz właściwości ekologicznych gatunków roślin.

METODYKA

Bogactwo gatunkowe i plonowanie roślin badano na modelowym złożu popiołu z Elektrociepłowni Kawęczyn. Złoża te ukształtowano w pojemnikach cylindrycznych o średnicy 80 cm (0,5 m² powierzchni) i wysokości 100 cm [Dyguś i in. 2014, Siuta, Dyguś 2013].

Modelowe złoża miały następujący skład chemiczny [Siuta i in. 2008]:

- składniki główne: SiO₂ - 48,5%; Al₂O₃ - 4,8%; Fe₂O₃ - 2,8%; CaO - 2,8%; MgO - 2,7%; K₂O - 2,1%; TiO₂ - 1,1%; Na₂O - 0,8%; MnO₂ - 0,5%;
- metale ciężkie w mg/100 g: Zn - 90; Cu - 59; Pb - 50; Ni - 42; Co - 17; Cd - 15; Cr - 46.

Pojemniki ze złożem odpadów paleniskowych zostały użyźnione następującymi substancjami:

- kompost roślinny wyprodukowany doświadczalnie z odpadów zieleni miejskiej (kr) [Madej 2007, Madej i in. 2010];
- kompost „Radiowo” z nieselektywnie gromadzonych odpadów komunalnych (kRa);
- kompost Zakładu Unieszkodliwiania Stałych Odpadów Komunalnych – „ZUSOK” (kZ);
- kompost firmy AG – COMPLEX produkowany z odpadów zieleni miejskiej Warszawy (kC) [Opaliński 2007];
- osad komunalnej oczyszczalni ścieków w Radzyminie (O);
- nawóz mineralny N, P₂O₅, K₂O (NPK).

Schemat doświadczenia i rekultywacyjne dawki nawozów przedstawia tabela 1, a ich charakterystykę tabela 2 [Siuta i in. 2008].

Tabela 1. Rekultywacyjne dawki nawozów

Table 1. Reclamation doses of fertilisers

Wprowadzane substancje	Dawki					
	dm ³ /0,5 m ²			m ³ /ha		
Osad ściekowy (O)	5,0	10,0	15,0	100	200	300
Kompost roślinny (kr)	5,0	7,5	10,0	100	150	200
Kompost Radiowo (kRa)	5,0	7,5	10,0	100	150	200
Kompost z ZUSOK (kZ)	5,0	7,5	10,0	100	150	200
Kompost Complex (kC)	5,0	7,5	10,0	100	150	200
NPK	g/0,5 m ²			kg/ha		
Azot (N)	7,5	10,0	12,5	150	200	250
Fosfor (P ₂ O ₅)	3,5	4,5	6,0	70	90	120
Potas (K ₂ O)	5,0	7,5	10,0	100	150	200
Razem NPK	16,0	22,0	28,5	320	440	570

Tabela 2. Właściwości nawozów organicznych zastosowanych w doświadczeniu**Table 2.** Properties of organic fertilisers applied in the experiment

Zawartości	Rodzaj nawozu				
	Kompost Radiowo (kRa)	Kompost roślinny (kr)	Kompost ZUSOK (kZ)	Kompost Complex (kC)	Osad ściekowy (O)
Substancja org. s.m. %	25,8	42,8	24,0	74,4	37,7
Węgiel organiczny s.m. %	12,8	19,3	11,9	39,2	21,2
Azot s.m. %	1,1	2,1	1,0	5,8	1,4
Fosfor s.m. %	0,6	0,8	0,5	1,5	0,6
Zawartość potasu s.m. %	0,5	1,0	0,8	0,3	1,3
C : N	10,8	9,2	11,9	6,1	15,1
pH	7,8	7,2	7,9	7,1	7,9
Masa świeża g/dm ³	807	330	790	950	490
Masa sucha g/dm ³	472	219	504	185	350
Woda %	40,1	31,7	36,9	80,9	40
Azot gN/ dm ³	5,2	4,6	5,0	11,0	n.o.

n.o. – nie oznaczono

Pierwszy etap doświadczenia zrealizowano w latach 2005 i 2006 [Siuta i in. 2008]. W latach 2007–2010 wegetacja roślin i formowanie się gleby postępowało bez żadnej ingerencji.

Podjmując drugi etap doświadczenia (lata 2011-2017) usunięto nadziemną biomasę roślin, pozostawiając biomasę podziemną. Wiosną 2011 r. wysiano mieszankę czterech gatunków traw: życicę trwałą Stadion, wiechlinę łąkową Evon, kostrzewę trzcinową Starlett, kostrzewę czerwoną Maxima, oraz jeden gatunek rośliny dwuliściennej – gorczycę jasną. Po wysiewie roślin modelowe złoża zasilono kompleksowym nawozem mineralnym (azofoską) o zawartości 13,6% azotu, 6,4%, 19,1%, 4,5% i 23,0% z udziałem Cu, Fe, Mn, Mo i Zn.

W sezonach wegetacyjnych II etapu doświadczenia prowadzono szczegółowe obserwacje florystyczne. Notowane gatunki roślin poddano analizie florystyczno-fitosocjologicznej i taksonomicznej. Natomiast analizę ekologiczną gatunków przedstawiono w innej publikacji [Dyguś 2015]. Dynamikę zmian roślin w pojemnikach wielowariantowego doświadczenia wyrażono procentowym udziałem pokrycia roślin w poszczególnych modelach doświadczalnych. Na podstawie składu gatunkowego roślin wyodrębniono ich grupy systematyczne, syntaksonomiczne, ekologiczne, geograficzno-historyczne i formy życiowe według Raunkiaera. W poszczególnych latach eksperymentu inwentaryzowano gatunki roślin i szacowano ich procentowe pokrycie.

Trzy razy w roku, podczas wegetacji roślin, zbierano plony roślin (rys. 1). Zebraną biomasę roślinną suszono w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 75°, aż do uzyskania suchej masy, a następnie ważono z dokładnością do 0,0001 g.

Stwierdzoną florę poddano analizie ekologicznej. Dane taksonomiczne opracowano według „Klucza do oznaczania roślin naczyniowych Polski niżowej” [Rutkowski 1998]. Nomenklaturę jednostek grup syntaksonomicznych zastosowano według Matuszkiewicza [2001]. Klasyfikację i udział form życiowych flory opracowano według Raunkiaera [Zarzycki i in. 2002]. Analizę geograficzno-historyczną roślin przeprowadzono na podstawie opracowań Rutkowskiego [1998] oraz Mirka i in. [2002]. Średnie pokrycie roślin w poszczególnych modelach nawożenia wyrażono skalą Braun-Blanqueta [1964] z uwzględnieniem modyfikacji Westhoffa i van der Maarela [1978]. Nazewnictwo łacińskie roślin naczyniowych przyjęto według Mirka i in. [2002].



Rys. 1. Szpaler pojemników z udziałem traw i gorczycy jasnej (*Sinapis alba*) (po prawej stronie); po lewej pojemniki po zebranych plonie roślin

Fig. 1. Lane of containers with grass and white mustard (*Sinapis alba*) (on the right); on the left - containers following plant harvesting

WYNIKI I DYSKUSJA

Bogactwo florystyczne na nawożonym złożu odpadów paleniskowych energetyki węglowej

W latach 2011-2017 w pojemnikach stwierdzono 105 gatunków roślin, spośród nich 100, to gatunki zasiedlone spontanicznie. W tabeli 3 przedstawiono stan bogactwa florystycznego wraz z oceną pokrycia gatunków stwierdzonych w latach 2011-2017.

Skład florystyczny wraz z pokryciem roślin okazał się przydatny do oceny efektywności rekultywacyjnej w doświadczalnym złożu. W wielu badaniach dowiedziono, że liczba gatunków i ich pokrycie są ważnymi wskaźnikami możliwości rekultywacyjnych aplikowanej na złożu substancji nawozowej [Gutkowska, Pawluśkiewicz 2006]. Warto przy tym wspomnieć, że w procesie rekultywacji biologicznej ważnym jest odpowiedni dobór roślin [Majtkowski i in. 1999, Nowak 2006]. Zinventaryzowana w latach 2011-2017 flora należała do 19 taksonów w randze rodzin, wśród których w pierwszych latach obserwacji dominowały gatunki z rodziny traw (*Poaceae*), złożonych (*Asteraceae*), rodziny komosowatych (*Chenopodiaceae*) i rodziny krzyżowych (*Brassicaceae*). W ostatnich latach badań struktura dominacji rodzin uległa częściowo zmianie. Nadal dominowały gatunki z rodziny traw (*Poaceae*), lecz subdominantami okazały się gatunki z rodziny motylkowatych (*Fabaceae*) i rodziny złożonych (*Asteraceae*) (rys. 2).

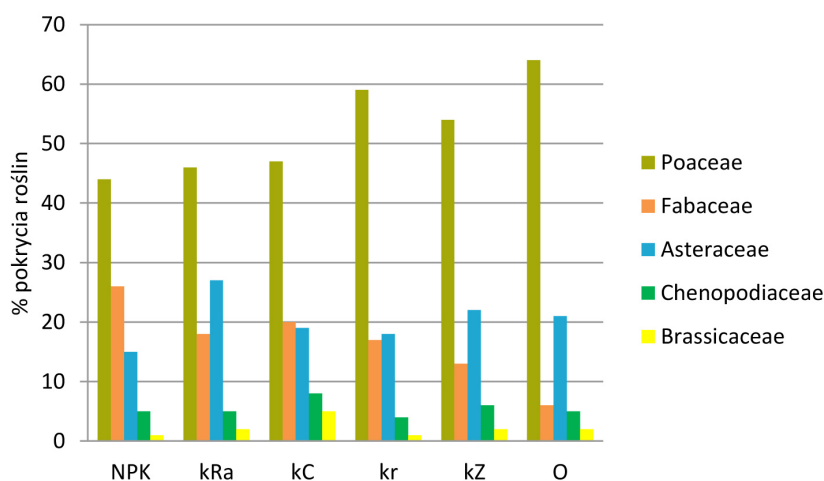
Wiąże się to z przewagą anemochorów w tych rodzinach, które produkują duże ilości lek-

kich, lotnych nasion, co umożliwia ich rozsiew na znaczne odległości.

Do najliczniej reprezentowanych rodzajów botanicznych należą: komosa (*Chenopodium*), rdest (*Polygonum*), mleczyk (*Sonchus*), wiechlina (*Poa*), łoboda (*Atriplex*), koniczyna (*Trifolium*), babka (*Plantago*). Jest to typowy udział taksonów botanicznych w procesie spontanicznego kształtowania się pokrywy roślinnej w początkowych etapach rekultywacji składowisk przemysłowych i komunalnych [Gutkowska, Pawluśkiewicz 2006, Rostański 2006, Dyguś i in. 2012, Dyguś, Madej 2012].

Analiza fitosocjologiczna i syntaksonomiczna flory z lat 2011-2017 wykazała udział 11 grup syntaksonomicznych w randze klas. Wśród wyróżnionych grup badanej flory 39% gatunków należała do nitrofilnych zbiorowisk pól uprawnych (klasa *Stellarietea mediae*). Dwie następne grupy gatunków związane były z antropogenicznymi siedliskami ruderalnymi (klasa *Artemisietea vulgaris*) oraz mezo- i eutroficznymi zbiorowiskami łąkowymi (klasa *Molinio-Arrhenatheretea*). Pozostałe grupy syntaksonomiczne reprezentowane były przez znikome liczby gatunków (tab. 4).

Wśród zidentyfikowanych gatunków w latach 2011-2017 wykazano wyraźną dominację roślin jednorocznych (terofitów), które stanowiły niemal połowę składu gatunkowego badanej flory. W pierwszych latach eksperymentu stosunkowo wysoki udział we florze miały rośliny wieloletnie - hemikryptofity. Natomiast od roku 2013 już wyraźnie dominowały hemikryptofity, z jednoczesną tendencją zmniejszania się udziału terofitów. Przez cały okres obserwacji znaczący udział miały geofity, czyli rośliny skrywające pąki w glebie (tab. 5).



Rys. 2. Procentowy udział dominujących rodzin tworzących pokrywę roślinną w doświadczeniu
Fig. 2. Percentage share of dominating families creating the plant cover in the experiment

Tabela 3. Bogactwo florystyczne i pokrycie roślin w doświadczeniu modelowym notowane w latach 2011-2017
Table 3. Floristic richness and plant cover in the model experiment recorded in 2011-2017

Lp.	Gatunek	NPK	kRa	kC	kr	kZ	O
1	<i>Acer negundo</i> - s	+	+	+			
2	<i>Achillea millefolium</i>				+	+	1
3	<i>Agrostis stolonifera</i>	+		+	+	+	+
4	<i>Anthriscus sylvestris</i>				+		+
5	<i>Arabidopsis thaliana</i>	+		1	+		
6	<i>Artemisia vulgaris</i>	+	+	1	1	+	+
7	<i>Atriplex patula</i>				+		
8	<i>Atriplex prostrata</i>				+		
9	<i>Atriplex tatarica</i>				+	+	
10	<i>Betula pendula</i> - s				+		+
11	<i>Bidens frondosa</i>	+	1	+		1	+
12	<i>Bidens tripartita</i>	+	1	+	+	+	+
13	<i>Bromus tectorum</i>		1		1	+	
14	<i>Calamagrostis epigejos</i>	+		+			
15	<i>Capsella bursa-pastoris</i>		+	1	+	+	1
16	<i>Cardaminopsis arenosa</i>	+	+		r	1	
17	<i>Chamomilla recutita</i>					+	
18	<i>Chelidonium majus</i>				+	r	
19	<i>Chenopodium album</i>	2a	2a	2a	2a	2a	2a
20	<i>Chenopodium glaucum</i>			+		+	
21	<i>Chenopodium hybridum</i>			+	+	+	
22	<i>Chenopodium murale</i>		1	1		+	+
23	<i>Chenopodium polyspermum</i>		+	+			
24	<i>Chenopodium urticum</i>			+			
25	<i>Cirsium arvense</i>		+	+	+	+	1
26	<i>Cirsium oleraceum</i>	+		+	+		
27	<i>Crisium vulgare</i>	+	+	2m		+	+
28	<i>Convolvulus arvensis</i>			2a	+		+
29	<i>Conyza canadensis</i>	1	2m	2a	2m	1	1
30	<i>Dactylis glomerata</i>		+	+	+	+	+
31	<i>Daucus carota</i>				+		+
32	<i>Descurainia sophia</i>	+	+	+	+	+	1
33	<i>Elymus repens</i>	+	+	+	+	+	+
34	<i>Epilobium montanum</i>						+
35	<i>Erigeron annuus</i>	+				+	
36	<i>Erigeron ramosus</i>	+		+		+	
37	<i>Erysimum cheiranthoides</i>		+		+	+	1
38	<i>Fallopia convolvulus</i>				+		
39	<i>Festuca arundinacea</i> var. Starlett	2a	2a	2a	2a	2a	2b
40	<i>Festuca rubra</i> var. Maxima	2a	2m	2a	2a	2a	2a
41	<i>Galinsoga parviflora</i>	+	+	+	1	+	1
42	<i>Geranium pyrenaicum</i>				+		+
43	<i>Geranium pusillum</i>			+	1	+	
44	<i>Hypochoeris radicata</i>		r				
45	<i>Impatiens parviflora</i>	2a		2a	+	2a	2m
46	<i>Lactuca serriola</i>	+					+
47	<i>Lamium maculatum</i>	+		+			+
48	<i>Lamium purpureum</i>			+			r
49	<i>Leonurus cardiaca</i>					r	
50	<i>Lolium perenne</i> var. Stadion	2a	2a	2a	2a	2a	2b
51	<i>Lotus corniculatus</i>					+	
52	<i>Lycopus europaeus</i>			+			
53	<i>Matricaria maritima</i> ssp. inodora	+	+	1	2a	+	
54	<i>Medicago falcata</i>	1	2m	1	+		1
55	<i>Medicago lupulina</i>	2a	2a	2m	2a	2m	2m
56	<i>Melilotus officinalis</i>					r	
57	<i>Oxalis fontana</i>					1	2a
58	<i>Parthenocissus inserta</i>					1	2a
59	<i>Pastinaca sativa</i>	+			r		
60	<i>Phleum pratense</i>	+	+	+	+	+	+
61	<i>Plantago intermedia</i>	1		+	+	+	+
62	<i>Plantago lanceolata</i>			+		+	+
63	<i>Plantago major</i>				+	1	
64	<i>Poa angustifolia</i>	+	+	+	+		+
65	<i>Poa annua</i>	+	+	+	+	1	+
66	<i>Poa compressa</i>	+	+			+	
67	<i>Poa pratensis</i> var. Evona	2a	2a	2b	2a	2b	2b
68	<i>Polygonum aviculare</i>	+	2a	+	1	1	1
69	<i>Polygonum lapathifolium</i>				+	+	+
70	<i>Polygonum persicaria</i>					+	
71	<i>Quercus robur</i> - s						+
72	<i>Raphanus raphanistrum</i>		1	+		+	+
73	<i>Rumex acetosa</i>	1			+	+	
74	<i>Rumex acetosella</i>		+		+		
75	<i>Rumex crispus</i>				+	+	
76	<i>Senecio vulgaris</i>		+	1	+		2a
77	<i>Silene vulgaris</i>						+
78	<i>Sinapis alba</i>	r				r	
79	<i>Sinapis arvensis</i>		+			+	+
80	<i>Sisymbrium altissimum</i>	+					
81	<i>Sisymbrium loeselii</i>	1	1	1	+	1	
82	<i>Sisymbrium officinale</i>	+	+	+		+	+
83	<i>Solidago canadensis</i>	2a	2a	+	2a	1	1
84	<i>Solidago gigantea</i>	1			+	+	1
85	<i>Sonchus arvensis</i>	2a	2a	1	2a	2a	2a
86	<i>Sonchus asper</i>		+	+			
87	<i>Sonchus oleraceus</i>	+	1	+	+	+	1
88	<i>Stellaria media</i>	2m	1	2m	2a	2m	2a
89	<i>Tanacetum vulgare</i>				r		
90	<i>Taraxacum officinale</i>	1	2a	1	1	2a	1
91	<i>Trifolium arvense</i>	2m		2a		1	1
92	<i>Trifolium dubium</i>					+	
93	<i>Trifolium hybridum</i>					1	1
94	<i>Trifolium pratense</i>				+	+	+
95	<i>Trifolium repens</i>	2m	2a	2a	2a	1	1
96	<i>Tussilago farfara</i>		2m		2m		
97	<i>Urtica dioica</i>	+					
98	<i>Valeriana officinalis</i>						+
99	<i>Veronica arvensis</i>		+	+	1		1
100	<i>Veronica persica</i>				+		+
101	<i>Vicia cracca</i>	+		+			+
102	<i>Vicia dumetorum</i>				+		+
103	<i>Vicia hirsuta</i>				+		
104	<i>Vicia sativa</i>						+
105	<i>Viola arvensis</i>			+			

Objaśnienia:

Średnie pokrycie roślin w poszczególnych modelach nawożenia wyrażone skalą Braun-Blanqueta [1964] z uwzględnieniem modyfikacji Westhoffa i van der Maarela [1978],

NPK – nawóz N, P₂O₅, K₂O bez nawożenia organicznego, kRa – kompost z odpadów komunalnych Radiowo, kC – kompost Complex, kr – kompost roślinny wyprodukowany z trawy, kZ – kompost z odpadów komunalnych i roślinnych (ZUSOK), O – osad z oczyszczania ścieków komunalnych; s – siewka

Tabela 4. Udział grup syntaksonomicznych w randze klasy**Table 4.** Share of syntaxonomic groups in the class range

Grupa syntaksonomiczna (klasa)	Liczba gatunków	%
<i>Stellarietea mediae</i>	41	39,0
<i>Artemisietea vulgaris</i>	26	24,8
<i>Molinio-Arrhenatheretea</i>	22	20,9
<i>Bidentetea tripartiti</i>	5	4,8
<i>Festuco-Brometea</i>	3	2,9
<i>Koelerio-Coryneporetea</i>	2	1,9
<i>Quercu-Fagetea</i>	2	1,9
Pozostałe grupy	4	3,8
Razem	105	100,0

Ocena efektywności rekultywacyjnej złoza odpadów paleniskowych energetyki węglowej na podstawie pokrycia roślin

Przeprowadzone doświadczenie na złożu odpadów paleniskowych energetyki węglowej wykazało, że we wszystkich modelach nawożenia, pod względem pokrycia, duży udział mają wysiane i spontanicznie zasiedlone trawy. Natomiast spośród samosiewnych roślin dwuliściennych ich pokrycie różni się w poszczególnych modelach, np. w modelu NPK dominują rośliny motylkowate, a w modelach z kompostem Radiowo, ZUSOK i z osadem ściekowym największe pokrycie miały rośliny z rodziny złożonych. Warto zwrócić także uwagę na rolę tzw. roślin rekultywacyjnych. Mają one dużą biomasę i są w większości roślinami jednorocznymi (terofitami). Ich podwyższony udział w pokryciu może być wskaźnikiem właściwego zapoczątkowania przebiegu rekultywacji biologicznej składowisk. Dość wyraźnie zaobserwowano to w modelu z kompostem Complex. Nie mniej ważną rolę w procesie rekultywacji spełniają rośliny motylkowate i złożone. Ich duży udział usprawnia tworzenie pokrywy roślinnej w większości modeli, a zatem przebieg rekultywacji, bowiem wiele gatunków z tych grup to rośliny wieloletnie.

W doświadczalnym modelu z NPK bez nawożenia organicznego wykazano umiarkowaną efektywność rekultywacyjną zaaplikowanego nawozu NPK. Świadczy o tym chociażby stosunkowo niższe pokrycia złoza hemikryptofitami - roślinami darniowymi i kępkowymi, głównie trawami. Natomiast na modelowym złożu z kompostem Radiowo (kRa) duży udział miały rośliny z rodziny komosowatych, krzyżowych i motylko-

Tabela 5. Spektrum form życiowych roślin według Raunkiaera**Table 5.** Spectrum of life forms according to Raunkiaer

Forma życiowa	Liczba gatunków	%
Hemikryptofity (H)	44	41,9
Terofity (T)	39	37,1
Geofity (G)	17	16,2
Pozostałe formy	5	4,8
Razem	105	100,0

watych, co świadczy o dobrej efektywności rekultywacyjnej na tym złożu. Na duże znaczenie w procesie rekultywacji biologicznej roślin z rodzin motylkowatych i krzyżowych zwrócił uwagę w swoich badaniach także Góral [2001]. Z kolei na złożu z kompostem Complex (kC) dominowały terofity. Duży udział roślin jednorocznych, na tym etapie rekultywacji, nie jest zadowalający. Ale jednocześnie znaczny udział traw i roślin komosowatych rokuje dla tego modelu nasilenie się procesu glebotwórczego w latach następnych, a w konsekwencji większy wzrost sprawności rekultywacyjnej tego złoza. Efektywność rekultywacji w doświadczalnym modelu z kompostem roślinnym (kr) częściowo usprawniało osiedlanie się wieloletnich roślin dwuliściennych (hemikryptofitów, geofitów i chamefitów zielnych). Jednak stosunkowo niskie pokrycie traw na tym etapie rekultywacji świadczy o jej powolnym tempie. Stwierdzony skład florystyczny w pojemnikach z kompostem ZUSOK (kZ) wskazuje, że nawóz ten wpłynął w zaledwie zadawalającym stopniu na przebieg rekultywacji biologicznej. W pojemnikach doświadczalnych nawożonych osadem ściekowym (O) wykazano dość dobry rozwój pokrywy roślinnej. Można przypuszczać, że dalsze etapy rekultywacji powinny przebiegać w tym modelu sprawniej za przyczyną występowania (jeszcze z niewielkim pokryciem), aż kilkunastu gatunków z rodziny motylkowatych i krzyżowych, spełniających wraz z trawami główną rolę w procesie rekultywacji składowisk odpadów paleniskowych.

Ocena efektywności rekultywacyjnej w modelowym doświadczeniu na podstawie plonowania roślin

Na podstawie uzyskanych wyników plonowania roślin podjęto próbę oceny rekultywacyjnej efektywności stosowanych modeli nawoże-

nia. Założono, że im większe plonowanie roślin, tym proces glebotwórczy, a zarazem i rekultywacja, zachodzą efektywniej. Każdy model przeanalizowano pod względem średnich sumy plonów ze wszystkich wariantów nawożenia podczas wieloletniego eksperymentu (tab. 6).

W roku 2011 w większości wariantów nawożenia uzyskano stosunkowo wysokie plony roślin. Tyko w wariacie ZUSOK (kZ) plon był dużo niższy [Siuta, Dyguś 2013]. Natomiast w 2014 roku plony we wszystkich wariantach nawożenia zmniejszyły się [Dyguś 2015]. Jeszcze niższe plonowanie roślin, w porównaniu z latami ubiegłymi, wystąpiło w 2016 roku [Dyguś 2016]. Dynamikę zmian plonowania roślin częściowo odzwierciedlają także fotografie (rys. 3–6).

Na podstawie plonowania roślin za lata 2005-2017, najwyższą sumaryczną efektywność rekultywacyjną oszacowano na złożu nawożonym kompostem „Complex” (kC). Kompost ten cechuje m. in. wysoka zawartość substancji organicznej, węgla organicznego, azotu i fosforu, przy jednocześnie obojętnym pH (7,1). Stosunkowo dużą sprawność rekultywacyjną na podsta-

wie plonowania wykazano na złożu nawożonym kompostem „Radiowo” (kRa) i osadem ściekowym (O). Warto zwrócić uwagę na niską sprawność rekultywacyjną nawożenia mineralnego z zawartością N, P₂O₅, K₂O (NPK), a także kompostu „ZUSOK”, który cechuje najniższą zawartość substancji organicznej, węgla organicznego, azotu i fosforu i przy tym ma stosunkowo wysokie pH (7,9) (rys. 7).

WNIOSKI

Eksperyment na modelowym złożu odpadów paleniskowych wykazał, że istotną rolę w przebiegu rekultywacji składowisk ma sekwencja występowania odpowiednich form życiowych roślin. W początkowym stadium rekultywacji ważną rolę spełniały rośliny jednoroczne (terofity), które pobudzały do kreowania procesu glebotwórczego. W dalszych fazach najwyższą efektywność rekultywacyjną zapewniały trawy oraz rośliny dwuliścienne, zwłaszcza dwuletnie i wieloletnie (hemikryptofity, geofity, chamefity zielne), które utrwalały podłoże.

Tabela 6. Plony suchej masy roślin (w g/m²) w latach 2005-2017

Table 6. Dry matter yield of plants (g/m²) in the period 2005-2017

Dawka nawozu	Lata									Σ
	2005	2006	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
N, P ₂ O ₅ , K ₂ O (NPK)										
32 g	172	73	860	432	299	265	208	145	415	2869
44 g	136	214	784	522	317	314	263	211	402	3163
57 g	161	311	427	504	298	214	177	248	238	2578
Kompost Radiowo (kR)										
10 dm ³	114	230	911	687	544	530	324	220	389	3949
15 dm ³	185	216	905	611	466	504	480	396	465	4228
20 dm ³	184	214	835	751	656	478	412	267	577	4374
Kompost Complex (kC)										
10 dm ³	0*	256	1024	985	1021	659	519	267	1334	6065
15 dm ³	0*	406	1077	826	674	807	696	554	916	5956
20 dm ³	0*	582	1735	1077	960	1044	808	314	604	7124
Kompost roślinny (kr)										
10 dm ³	313	296	682	625	481	257	209	156	305	3324
15 dm ³	436	326	887	442	323	345	311	260	416	3746
20 dm ³	548	366	901	427	384	287	216	154	446	3729
Kompost ZUSOK (kZ)										
10 dm ³	323	257	318	575	337	246	179	145	248	2628
15 dm ³	413	317	389	539	334	367	301	226	286	3172
20 dm ³	573	347	572	607	337	412	333	176	237	3594
Osad ściekowy (O)										
10 dm ³	346	355	416	578	415	328	265	148	380	3231
15 dm ³	380	374	1103	721	545	587	410	227	251	4598
20 dm ³	412	694	1285	652	544	443	345	206	233	4814

* doświadczenie zapoczątkowano w 2006 r.



Rys. 3. Widok ogólny pojemników z roślinami - 31 maj 2011 r.
Fig. 3. General view of plant containers - 31 May 2011



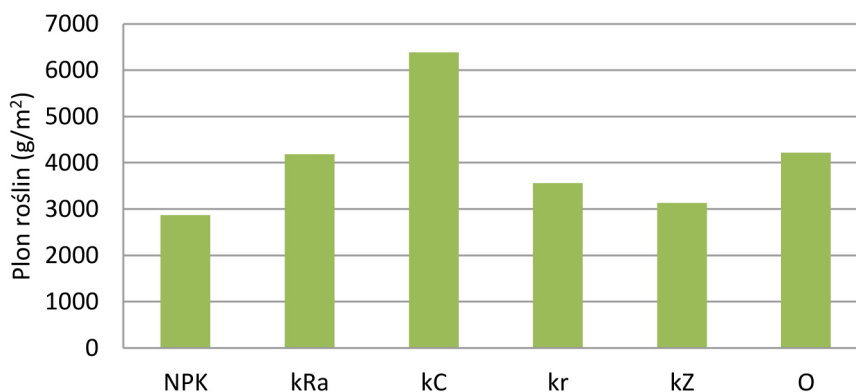
Rys. 4. Widok ogólny pojemników z roślinami - 30 maj 2013 r.
Fig. 4. General view of plant containers - 30 May 2013



Rys. 5. Widok ogólny pojemników z roślinami - 27 maj 2015 r.
Fig. 5. General view of plant containers - 27 May 2015



Rys. 6. Widok ogólny pojemników z roślinami - 26 maj 2017 r.
Fig. 6. General view of plant containers - 26 May 2017



Rys. 7. Szacunkowa efektywność rekultywacyjna na podstawie plonowania roślin podczas wieloletniego doświadczenia (objaśnienia patrz. tab. 3)

Fig. 7. Estimated reclamation effectiveness based on the yield of plants during many years of experience (for explanation see tab. 3)

Podczas prowadzonego eksperymentu zasadniczą rolę w usprawnianiu rekultywacji na doświadczalnych złożach pełniły (oprócz traw) rośliny z rodzin: złożonych, komosowatych, motylkowatych, które gromadziły znaczną biomasę, istotną w procesie rekultywacji składowisk.

Na podstawie oszacowanego w badanych modelach stopnia pokrycia gatunków i plonowania roślin najwyższą efektywność rekultywacyjną wykazano w pojemnikach z kompostem „Complex”, osadem ściekowym i kompostem „Radiowo”.

Duży wpływ na przebieg doświadczenia i sprawność rekultywacji na złożu odpadów paleniskowych miały warunki atmosferyczne (szczególnie wysokie temperatury, susza) i ubożenie związków pokarmowych w podłożu. Ilustruje to dynamika spadku plonowania w niektórych latach doświadczenia.

Zaimprovizowany model doświadczalny (*ex situ*) przebiegu rekultywacji biologicznej odpadów paleniskowych nie może odnosić się do układów rzeczywistych (*in situ* - hałd, składowisk itp.). Jego funkcjonalność jest fragmentaryczna i niekiedy ograniczająca trafne wnioskowanie. Wymaga zatem wielokrotnych powtórzeń i wieloaspektowego testowania.

Biologiczna (roślinna) rekultywacja składowisk odpadów przemysłowych i komunalnych może przyczynić się do zwiększenia biologicznie czynnej powierzchni ziemi i poprawy stanu środowiska naturalnego. Rekultywacja składowisk odpadów, z udziałem odpowiednio dobranych i spontanicznych roślin, może przyczynić się do zwiększenia bioróżnorodności gatunkowej a nawet krajobrazowej.

BIBLIOGRAFIA

1. Antonkiewicz J, Radkowski A. 2006. Przydatność wybranych gatunków traw i roślin motylkowych do biologicznej rekultywacji składowisk popiołów paleniskowych. *Annales UMCS, Sec. E*, 2006, 61: 413-421.
2. Braun-Blanquet J. 1964. *Pflanzensoziologie, Grundzüge der Vegetationskunde* 3. Aufl. Springer, Vienna-Nev York: 865.
3. Dyguś K. H. 2015. The role of plants in experimental biological reclamation in a bed of furnace waste from coal-based energy. *Journal of Ecological Engineering*. Vol. 16, 1: 8-22. DOI: 10.12911/22998993/581.
4. Dyguś K. H. 2016. Roślinność wieloletniego doświadczenia na modelowym złożu odpadów paleniskowych energetyki węglowej. Część III. *Polish Journal for Sustainable Development*. 20, 2016: 45-58.
5. Dyguś K. H., Madej M. 2012. Roślinność wielowariantowego doświadczenia modelowego na złożu odpadów paleniskowych energetyki węglowej. *Inżynieria Ekologiczna*, 30: 227-240.
6. Dyguś K. H., Siuta J., Wasiak G., Madej M. 2012. Roślinność składowisk odpadów komunalnych i przemysłowych. *Wyd. Wyższej Szkoły Ekologii i Zarządzania, Warszawa*: ss. 134.
7. Dyguś K. H., Wasiak G., Madej M. 2014. Dynamika zmian roślinności w doświadczeniu modelowym ze złożem odpadów paleniskowych energetyki węglowej. *Inżynieria Ekologiczna*, 40: 100-121.
8. Gilewska M. 1999. Utilization of sewage sludge in the reclamation of post-mining soil and ash disposal sites. *Roczniki AR Poznań*, 310. *Melioracje i Inżynieria Środowiska*, 20/II: 273-281.
9. Gilewska M., Przybyła Cz. 2011. Wykorzystanie osadów ściekowych w rekultywacji składowisk

- popiołowych. Zesz. Prob. Post. Nauk Roln. PAN, 477: 217-222.
10. Góral S. 2001. Roślinność zielna w ochronie i rekultywacji gruntów. *Inżynieria Ekologiczna*, 3: 161-178.
 11. Gutkowska A., Pawluśkiewicz B. 2006. Kształtowanie zadarnienia i składu florystycznego zbiorowisk trawiastych pod wpływem zabiegów pratotechnicznych na składowisku popiołu EC Siekierki. *Annales UMCS, Sec. E*, 61:249-255.
 12. Klimont K. 2011. Rekultywacyjna efektywność osadów ściekowych na bezglebowym podłożu wapna poflotacyjnego i popiołów paleniskowych. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 2/2011: 165-176.
 13. Madej M. 2007. Zieleń miejska źródłem surowca do produkcji kompostu. Praca doktorska, WSEiZ, Warszawa; 140 s.
 14. Madej M., Siuta J., Wasiak G. 2010. Zieleń Warszawy źródłem surowca do produkcji kompostu. Cz. II. Skład chemiczny masy roślinnej z różnych powierzchni zieleni warszawskiej. *Inżynieria Ekologiczna*, 23: 22-36.
 15. Majtkowski W., Głazewski M., Schmidt J. 1999. Roślinność trawiasta składowiska fosfogipsów w Wiślince koło Gdańska. *Fol. Uniw. Agric. Stein*. 197, *Agricultura* 75: 207-210.
 16. Matuszkiewicz W. 2001. Przewodnik do oznaczania zbiorowisk roślinnych Polski. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.
 17. Mirek Z., Piękoś-Mirkowa H., Zajac A. & Zajac M., 2002. Flowering Plants and pteridophytes of Poland a checklist. Krytyczna lista roślin naczyniowych Polski. Wyd. W. Szafer Institute of Botany, PAS, Kraków.
 18. Nowak W. 2006. Rekultywacja biologiczna hałdy fosfogipsu w zakładach chemicznych „Wizów” S. A. Zesz. Nauk. Uniw. Przyr. we Wrocławiu. Ser. Rolnictwo, nr 88, 545: 195-203.
 19. Opaliński R. 2007. Rekultywacyjna efektywność kompostu Complex na odpadach paleniskowych w doświadczeniu lizymetrycznym. Praca magisterska. WSEiZ, Warszawa, ss. 78.
 20. Polkowski M, Sułek St. 1999. Kompostowanie masy roślinnej ze strefy bezleśnej przy Zakładach Azotowych Puławy. Kompostowanie i użytkowanie kompostu. IOŚ, IUNG, PTIEkol. Warszawa: 71-74.
 21. Rostański A. 2006. Spontaniczne kształtowanie się pokrywy roślinnej na zwałowiskach po górnictwie węgla kamiennego na Górnym Śląsku. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
 22. Rutkowski L. 1998. Klucz do oznaczania roślin naczyniowych Polski niżowej. Wyd. Naukowe PWN. Warszawa.
 23. Siuta J. 2005. Rekultywacyjna efektywność osadów ściekowych na składowiskach odpadów przemysłowych. *Acta Agrophysica*, 2005, 5(2): 417-425.
 24. Siuta J. 2007. System uprawy i kompostowania roślin na składowisku odpadów posodowych w Janikowie z zastosowaniem osadów ściekowych. *Inżynieria Ekologiczna*, 19: 38-58 + 6 fot.
 25. Siuta J., Dyguś K. H. 2013. Plony i chemizm roślin wielowariantowego doświadczenia na modelowym złożu odpadów paleniskowych energetyki węglowej. *Inżynieria Ekologiczna*, 35: 7-31.
 26. Siuta J., Wasiak G., Madej M. 2008. Rekultywacja efektywności kompostów i osadów ściekowych na złożu odpadów paleniskowych w doświadczeniu modelowym. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 34: 145-172 + 26 fot.
 27. Westhoff V., van der Maarel E. 1978. The Braun-Blanquet approach. In: R.H. Whittaker (ed.) *Classification of plant communities*. Junk, The Hague, pp. 287-297.
 28. Zarzycki K., Trzcińska-Tacik H., Różański W., Szelaż Z., Wołek J. & Korzeniak U. 2002. Ecological indicator values of vascular plants of Poland. W. Szafer Institute of Botany, PAS, Kraków.