



Odtworzenie zdegradowanych
i przekształconych ekosystemów na terenach
pogórniczych

847205-RECOVERY-RFCS-2018

Zadanie 3.2

Opracowanie mieszanek glebowych do
rekułtywacji terenów pogórniczych – raport
z wyników

Autorzy

Dr inż. Arkadiusz Bauerek, GIG Instytut Badawczy

Dr Łukasz Pierzchała GIG Instytut Badawczy

Mgr inż. Angelika Więckol-Ryk GIG Instytut Badawczy

Dr hab. Alicja Krzemień, Prof. GIG Instytut Badawczy

Prof. dr hab. Jean Diatta, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Dr Robert Frączek, Tauron Wydobycie S.A.

Zadanie 3.2	
Data zakończenia	30.09.2022
Rozpoczęcie – zakończenie projektu	01.07.2019 – 30.06.2023
Okres realizacji	4 lata
Lider zadania 3.2	GIG
Poziom rozpowszechnienia	Publiczny
Pakiet zadaniowy	WP 3
Tytuł	D3.2 Opracowanie mieszanek glebowych do rekultywacji terenów pogórnich
Słowa kluczowe	rekultywacja, odpady wydobywcze, ocena wegetacji, składowisko odpadów wydobywczych, zakład Górniczy Janina

Zastrzeżenie

Informacje oraz zdjęcia zawarte w niniejszym opracowaniu pozostają własnością Projektu RECOVERY lub jego Partnerów. Zabrania się rozpowszechniania tych informacji bez zgody autorów.

Spis treści

1	WSTĘP	10
2	CHARAKTERYSTYKA SKŁADOWISKA ODPADÓW WYDOBYWCZYCH ZG JANINA	12
3	MATERIAŁY I METODY BADAWCZE	14
3.1	ODPADY WYDOBYWCZE	14
3.2	METODY BADAWCZE	15
4	OZNACZENIE PH PRÓBEK ODPADÓW WYDOBYWCZYCH	16
5	KOMPONENTY DO WYTWORZENIA SUBSTYTUTÓW GLEBOWYCH	17
5.1	PARAMETRY FIZYKOCHEMICZNE KOMPONENTÓW	19
5.2	WYTWARZANIE I CHARAKTERYSTYKA SUBSTYTUTÓW GLEBOWYCH	21
5.3	TESTY FITOTOKSYCZNOŚCI	26
5.3.1	OCENA KIEŁKOWANIA I WZROSTU <i>SINAPIS ALBA</i>	26
5.3.2	TESTY Z WYKORZYSTANIEM ROŚLIN SIEDLISK ŁĄKOWYCH	28
6	PRZYGOTOWANIE POLIGONU BADAWCZEGO	32
6.1	FORMOWANIE POLIGONU BADAWCZEGO	33
6.2	NASADZENIA ROŚLINNOŚCI	34
6.3	KOSZTY MATERIAŁÓW DLA REKULTYWACJI POLIGONU BADAWCZEGO	36
7	OCENA RÓŻNORODNOŚCI GATUNKOWEJ NA OBSZARZE PO REKULTYWACJI	37
7.1	CHARAKTERYSTYKA ZBIOROWISK ROŚLINNYCH	37
7.2	OCENA WEGETACJI ROŚLINNOŚCI ŁĄKOWEJ	39
7.3	OCENA FIZYKOCHEMICZNA SUBSTYTUTÓW GLEBOWYCH	43
8	PODSUMOWANIE I WNIOSKI	47
9	SKRÓTY	51
	LITERATURA	52

Spis rysunków

Rys. 1 Zbocze zachodnie OUOW ZG Janina w Libiążu	12
Rys. 2 Erozja powierzchni OUOW Janina spowodowana spływem kwaśnych wód deszczowych	13
Rys. 3 Wody spływu powierzchniowego na terenie ZG Janina	13
Rys. 4 Punkty poboru próbek ze zwałowiska OUOW Janina	14
Rys. 5 Profil odpadów wydobywczych ze składowiska ZG Janina	14
Rys. 6 Pobór próbek wód powierzchniowych z poligonu doświadczalnego ZG Janina..	15
Rys. 7 Skład mieszanek glebowych A1-D3 a) Etap I, b) Etap II, c) Etap III	22
Rys. 8 Wytwarzanie mieszanek glebowych w warunkach laboratoryjnych	23
Rys. 9 Wegetacja <i>Sinapis alba</i> na substytutach glebowych	26
Rys. 10 Kiełkowanie <i>Sinapis alba</i> na substytutach glebowych (A1-D3) i glebie (S0)	27
Rys. 11 Rozwój roślinności siedlisk świeżych (mesic meadow) na substytutach glebowych: a) procent pokrycia (MVC, %); b) widoczne rezultaty.....	29
Rys. 12 Rozwój roślinności siedlisk suchych (dry meadow) na substytutach glebowych: a) procent pokrycia (MVC, %); b) widoczne rezultaty	30
Rys. 13 Skład mieszanek glebowych użytych na poligonie badawczym ZG Janina	31
Rys. 14 Profil poligonu badawczego na terenie OUOW ZG Janina.....	32
Rys. 15 Podział poligonu badawczego na część wielowarstwową i część 2-warstwową	33
Rys. 16 Prace terenowe nad wykonanie poligonu badawczego	34
Rys. 17 Nasadzenia roślinności siedlisk mokrych i krzewiastych na poligonie badawczym	35
Rys. 18 Porównanie kosztów materiałów do rekultywacji poligonu badawczego dwoma metodami	36
Rys. 19 Średnia wysokość <i>Phragmites australis</i> po dwóch latach wegetacji.....	37
Rys. 20 Ocena wzrostu <i>Phragmites australis</i> na substytucie glebowym D w pierwszym i drugim roku od początku wegetacji	37
Rys. 21 Średnia wysokość roślinności krzewiastej po dwóch latach wegetacji z użyciem substytutu glebowego B2: a) pokrywa dwuwarstwową, b) pokrywa wielowarstwową	38
Rys. 22 Ocena wzrostu roślin krzewiastych na substytucie glebowym B2 w pierwszym i drugim roku od początku wegetacji: a) <i>Hippophae rhamnoides</i> , b) <i>Ligustrum vulgare</i> , c) <i>Crataegus monogyna</i>	39
Rys. 23 Lokalizacja poletek doświadczalnych na obszarze badawczym OUOW ZG Janina: TL-pokrywa dwuwarstwową, ML-pokrywa wielowarstwową.....	40
Rys. 24 Przykład poletka doświadczalnego na poligonie badawczym OUOW ZG Janina: a) 2021 rok, b) 2022 rok	40
Rys. 25 Skala pokrycia w zależności od siedlisk gatunkowych dla wielowarstwowej pokrywy w roku 2021 i 2022 a) substytut glebowy A3, b) substytut glebowy B2	41
Rys. 26 Skala pokrycia w zależności od siedlisk gatunkowych dla dwuwarstwowej pokrywy w roku 2021 i 2022 a) substytut glebowy A, b) substytut glebowy B	41
Rys. 27 Rozwój roślinności łąkowej z wykorzystaniem pokrywy substytutów glebowych: (a) łąka mezotroficzna na glebie B2, (b) łąka sucha na glebie A3	42

Rys. 28 Gatunki owadów zaobserwowane na zrehabilitowanym obszarze OUOW ZG Janina	42
Rys. 29 Rozwój roślinności łąkowej na obszarze OUOW ZG Janina z wykorzystaniem substytutów glebowych (a) poligon badawczy przed rekultywacją (b) poligon badawczy po 18 miesiącach rekultywacji.....	43
Rys. 30 Lokalizacja piezometrów na poligonie badawczym OUOW ZG Janina	44
Rys. 31 Pomiary wysokości zwierciadła wody gruntowej odczytane z piezometrów a) pokrywa dwuwarstwowa, b) pokrywa wielowarstwowa.....	45

Spis tabel

Tabela 1	Zmierzone wartości EC i pH dla odpadów wydobywczych ZG Janina	16
Tabela 2	Komponenty sztucznych mieszanek glebowych	17
Tabela 3	Charakterystyka fizykochemiczna komponentów	19
Tabela 4	Charakterystyka fizykochemiczna odcieków wodnych z komponentów	20
Tabela 5	Wartości pH and przewodności właściwej dla poszczególnych substytutów gleb	24
Tabela 6	Charakterystyka składników odżywczych roślin w substytutach glebowych (Etap I)	24
Tabela 7	Charakterystyka składników odżywczych roślin w substytutach glebowych (Etap II)	25
Tabela 8	Charakterystyka składników odżywczych roślin w substytutach glebowych (Etap III)	25
Tabela 9	Współczynniki korelacji Pearsona pomiędzy parametrami fizyko-chemicznymi substytutów glebowych, a kiełkowaniem nasion gorczycy białej	28
Tabela 10	Gatunki nasion roślin siedlisk suchych (dry meadow) i świeżych (mesic meadow)	28
Tabela 11	Sadzonki roślinności wykorzystane na poligonie doświadczalnym ZG Janina	35
Tabela 12	Porównanie kosztów materiałów do rekultywacji poligonu badawczego	36
Tabela 13	Charakterystyka piezometrów na poligonie badawczym OUOW ZG Janina	44
Tabela 14	Analiza fizykochemiczna pokrywy glebowej na poligonie badawczym OUOW ZG Janina	45

Streszczenie

W niniejszym opracowaniu przedstawiono nowatorskie podejście do rekultywacji terenów zdegradowanych działalnością górnictwem tzw. obiektów unieszkodliwiania odpadów wydobywczych (OUOW). Jako studium przypadku wybrano OUOW Zakładu Górniczego Janina w Libiążu, o intensywnie erodowanych zboczach i wysokim stopniu zakwaszenia. W badaniach wykorzystano uboczne produkty spalania i wydobycia węgla kamiennego będące własnością Tauron Wydobycie S.A.

W ramach realizacji zadania opracowano kilka rodzajów sztucznych mieszanek glebowych składających się ze skalnych odpadów wydobywczych, produktów ubocznych spalania węgla z elektrowni węglowych oraz odpadów organicznych, w tym osadów ściekowych i zużytego podłoża pieczarkowego. Przed wyborem odpowiednich mieszanek pobrano komplet próbek odpadów i wykonano badania parametrów fizykochemicznych substytutów glebowych oraz ich odcieków wodnych. Istotne znaczenie dla rekultywacji OUOW miała zawartość materii organicznej, a także stężenie wapnia oraz siarki, które wpływają na zmianę wartości pH. Przeprowadzono także ocenę kiełkowania i wczesnego wzrostu roślin, z użyciem jednego organizmu wskaźnikowego - gorczycy białej (*Sinapis alba*) oraz nasion zbiorowisk łąkowych. Wszystkie analizy i badania w warunkach laboratoryjnych pozwoliły na wybór trzech najlepszych rodzajów substytutów glebowych dla roślinności łąkowej suchej, roślinności łąkowej mezotroficznej oraz siedlisk wilgotnych i mokrych.

W kolejnym etapie opracowano koncepcję budowy poligonu doświadczalnego obejmującego fragment zwałowiska OUOW ZG Janina w Libiążu o powierzchni 4000 m² oraz przedstawiono ich koszty rekultywacji. Poligon badawczy podzielono na dwie części o wymiarach 40m x 50m różniące się sposobem aplikacji substytutu glebowego na powierzchnię odpadu wydobywczego: części dwuwarstwowa i wielowarstwowa. Następnie rozłożono trzy mieszanki substytutów glebowych w postaci pasów o szerokości 16,5 m. Na koniec wykonano nasadzenia krzewów (ok. 400 szt. sadzonek), roślinności zbiorowisk mokrych (ok. 1000 szt. sadzonek *Phragmites australis*) oraz wysiano ok. 3 kg nasion gatunków charakterystycznych dla zbiorowisk świeżych i suchych muraw kserotermicznych. W ostatnim etapie przeprowadzono ocenę różnorodności gatunkowej. Prowadzone były także obserwacje procesów przyrodniczych wraz z monitoringiem zmian parametrów fizykochemicznych podłoża. Przeanalizowany został skład podłoża glebowych, charakterystyka wód odpływowych oraz stopień rozwoju roślinności na obszarach zdegradowanych.

Badania efektów rekultywacyjnych wykazały, że opracowane substytuty glebowe stwarzają dogodne warunki dla rozwoju zbiorowisk roślinnych o wysokim stopniu naturalności i szerokim zakresie pełnionych usług ekosystemowych, w tym zapewnienia między innymi funkcji przyrodniczych, ochronnych i rekreacyjnych.

1 Wstęp

Projekt RECOVERY „Odtworzenie zdegradowanych i przekształconych ekosystemów na terenach pogórnicznych” to inicjatywa realizowana we współpracy czterech europejskich ośrodków badawczych oraz trzech partnerów przemysłowych, w tym Tauron Wydobycie S.A. Założeniem projektu jest ekologiczna odbudowa i odtworzenie zdegradowanych ekosystemów dotkniętych wydobyciem węgla. Efektem działań rewitalizacyjnych ma być wytworzenie miejsc o wysokim potencjale do pełnienia funkcji przyrodniczych i rekreacyjnych, co przyczyni się to do wzmocnienia wizerunku przedsiębiorstwa przyjaznego środowisku i dbającego o interesy lokalnej społeczności.

W ramach realizacji pakietu WP3, Zadania 3.2 opracowano nowatorskie podejście do rekultywacji składowisk odpadów wydobywczych. W skali laboratoryjnej zbadano wykorzystanie przemysłowych produktów ubocznych powstających w kopalniach węgla kamiennego i elektrowniach węglowych, jako składników do przygotowania sztucznych podłoży glebowych. Opracowane substytuty gleb zbadano w zakresie ich parametrów fizykochemicznych, a następnie kilka z nich wytypowano do rekultywacji poligonu doświadczalnego zlokalizowanego na terenie obiektu unieszkodliwiania odpadów wydobywczych (OUOW) ZG Janina w Libiążu, należącego do Tauron Wydobycie S.A.

Cele szczegółowe zadania 3.2:

- a) Przekształcenie przemysłowych produktów ubocznych ze spalania i wydobycia węgla kamiennego, z dodatkiem organicznych odpadów przemysłowych w użyteczne substytuty gleby, do rekultywacji terenów górniczych.
- b) Przygotowanie warstwy gleby do budowy poligonu doświadczalnego, chroniącej roślinność przed zakwaszeniem i zanieczyszczeniem ze składowiska odpadów.
- c) Wprowadzenie czterech zbiorowisk roślinnych (łąk świeżych, suchych muraw kserotermicznych, roślinności krzewiastej i zbiorowisk siedlisk podmokłych) odpowiednich dla różnych warunków występujących na składowisku odpadów.
- d) Obserwacja naturalnych procesów wegetacji roślin oraz monitorowanie zmian parametrów fizykochemicznych substytutów glebowych oraz charakterystyk wód odpływowych.

Osiągnięcie zamierzonych efektów projektu RECOVERY pozwoli:

- wskazać decydom wachlarz działań rekultywacyjnych i ekologicznych, które przyniosą największe korzyści w stosunku do poniesionych kosztów,
- zwiększyć pozytywny wpływ działań rekultywacyjnych zarówno na społeczeństwo, jak i na środowisko,

- stworzyć innowacyjny model wyceny usług ekosystemowych, który pozwoli na planowanie i ustalanie priorytetów zmierzających do odnowy obiektów powstałych w wyniku prowadzonej działalności wydobywczej,
- wdrożyć narzędzia, które pozwalają na porównanie różnych wariantów rekultywacji i zagospodarowanie terenu zwalowiska w oparciu o koszty realizacyjne oraz wycenę usług ekosystemowych,
- opracować „Wytyczne najlepszych praktyk” w zakresie rekultywacji obszarów pogórnich.

W ramach realizacji projektu opracowane zostały nowatorskie rozwiązania dla wykonania podłoży antropogenicznych na bazie ubocznych produktów wydobycia (UPW) i spalania węgla (UPS) oraz odpadów organicznych. Właściwości fizykochemiczne opracowywanych podłoży odzwierciedlają wymagania siedliskowe dla 4 typów zbiorowisk roślinnych, tj.:

- roślinności kserotermicznej (sucho i ciepłolubne gatunki roślin),
- roślinności siedlisk świeżych (zbiorowiska łąkowe na glebach o umiarkowanej wilgotności i zasobności w substancje biogenne),
- roślinności krzewiastej o funkcji przeciwoerozyjnej,
- roślinności siedlisk podmokłych (w miejscach gromadzenia się wód opadowych).

Projekt Recovery ma na celu jednoczesne usprawnienie realizacji polityki UE w zakresie gospodarki odpadami pochodzącymi z przemysłu wydobywczego (dyrektywa 2006/21/WE), polityki klimatyczno-energetycznej w zakresie emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych (COM/2016/479) oraz strategii ochrony różnorodności biologicznej (COM/2011/244). Dostarczenie instrumentu do oceny wpływu wydobycia węgla na krajobraz poeksploatacyjny, umożliwi odpowiednie sformułowanie zaleceń, dotyczących przyszłego planowania i rozwoju krajobrazów pokopalnianych. Osiągnięcie zamierzonych efektów projektu, pozwoli na ilustrację płynących z ich wdrożenia korzyści i rozpowszechnienie wyników wśród społeczności górniczej w całej Europie.

2 Charakterystyka składowiska odpadów wydobywczych ZG Janina

Obiektem do badań jest składowisko odpadów (hałda) ZG Janina, znajdujące się w Libiążu i będące własnością Tauron Wydobycie S.A. OUOW zajmuje powierzchnię 75 hektarów i osiąga wysokość 35m (Rys. 1).



Rys. 1 Zbocze zachodnie OUOW ZG Janina w Libiążu

Hałdy górnicze należą do terenów bardzo trudnych do rekultywacji. Problemy te wynikają z wielu niekorzystnych czynników tj.:

- niestabilne środowisko geochemiczne podatnych na wietrzenie odpadów zawierających piryt,
- generowanie kwaśnych odcieków w środowisku ubogim w fazy węglanowe,
- długotrwałe, negatywne oddziaływanie na jakość środowiska wodnego w otoczeniu hałd,
- negatywne oddziaływanie na walory estetyczne krajobrazu,
- trudny i kosztowny proces rekultywacji oraz zagospodarowania hałd.

Właściwości fizykochemiczne składowanych odpadów nie sprzyjają spontanicznej sukcesji roślinności. Powstający na niezazielenionej powierzchni obiektu pył generuje presje na środowisko i w okresach suchych jest uciążliwy dla lokalnej społeczności, a kwaśne odcieki zawierające metale ciężkie, stanowią potencjalne zagrożenie dla środowiska wód podziemnych i powierzchniowych. Dodatkową trudnością jest stożkowy kształt hałd, ich strome zbocza oraz podatność na procesy erozji wodnej, powodowanej przez spływ wód deszczowych czy topnienie śniegu (Rys. 2). Procesy te

prowadzą do pogorszenia się parametrów wytrzymałościowych zarówno gleby, jak i samego podłoża.



a)



b)

Rys. 2 Erozja powierzchni OUOW Janina spowodowana wpływem kwaśnych wód deszczowych

Problem stanowi także generowanie kwaśnych odcieków w środowisku ubogim w fazy węglanowe. Deponowana na hałdach skała płonna składa się głównie z łupków ilastych i iłowców, mułowców, piaskowców oraz domieszek węgla. Niepożądanym składnikiem odpadów są związki metali ciężkich, w tym siarczek żelaza (piryt) FeS_2 , którego udział w masie składowanych odpadów wynosi od 0,5% do 3%. Pod wpływem działania czynników zewnętrznych, takich jak woda pochodząca z opadów atmosferycznych, czy tlen zawarty w powietrzu materiał zwałowy ulega procesom wietrzenia chemicznego, czego konsekwencją jest powstawanie kwaśnych odcieków wodnych, które stanowią poważne zagrożenie dla środowiska wód podziemnych i powierzchniowych (Rys. 3).



Rys. 3 Wody spływu powierzchniowego na terenie ZG Janina

3 Materiały i metody badawcze

3.1 Odpady wydobywcze

W październiku 2019 r. z miejsca, w którym zaplanowano budowę poligonu doświadczalnego, zebrano 25 próbek odpadów wydobywczych. W tym celu, na terenie OUOW ZG Janina, wykonano 5 otworów wiertniczych i pobrano z nich 5 próbek, z następujących głębokości: 0–0,2 m; 0,2–0,4 m; 0,4–0,6 m; 0,6–0,8 m; 0,8–1,0 m (Rys. 4).



Rys. 4 Punkty poboru próbek ze zwałowiska OUOW Janina



Rys. 5 Profil odpadów wydobywczych ze składowiska ZG Janina

3.2 Metody badawcze

Ocena fizykochemiczna odpadów oraz mieszanek glebowych obejmowała badanie pH i elektryczności właściwej (EC) roztworów wodnych w stosunku wagowym 1:2.5 (w/v).

Dla wybranych komponentów, w laboratoriach GIG Zakładu Monitoringu Środowiska, przeprowadzono badania fizykochemiczne w zakresie: zawartość suchej masy, zawartość materii organicznej, potencjału do neutralizacji środowiska kwaśnego, składu elementarnego makroskładników niezbędnych dla prawidłowego rozwoju roślin (N, P, K, Ca, Mg) oraz składników pozostałych (Na, S, Cl, Na, Cu, Zn, Fe, Mn), jak również szkodliwych metali ciężkich tj.: Pb, Cd, As, Ni, Cr oraz zdolności komponentów do retencji wodnej.

W roztworach wodnych oznaczono zawartość kationów, anionów i metali ciężkich tj.: N-NH₄ i N-NO₃, (PO₄)³⁻, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, (SO₄)²⁻, Cl⁻, Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd, As, Ni, Cr.



Rys. 6 Pobór próbek wód powierzchniowych z poligonu doświadczalnego ZG Janina

4 Oznaczenie pH próbek odpadów wydobywczych

Zebrane z poszczególnych punktów próbki odpadów wydobywczych zostały poddane oznaczeniu pH i elektryczności właściwej (EC), wyniki badań przedstawione w Tab. 1.

Tabela 1 Zmierzone wartości EC i pH dla odpadów wydobywczych ZG Janina

Punkt pomiarowy	Głębokość (m)	EC ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	pH
1	0,0-0,2	$7,06\pm 0,72$	$2,42\pm 0,12$
2	0,2-0,4	$6,32\pm 1,64$	$2,52\pm 0,35$
3	0,4-0,6	$3,49\pm 0,96$	$2,80\pm 0,56$
4	0,6-0,8	$6,13\pm 1,77$	$2,99\pm 0,82$
5	0,8-1,0	$3,02\pm 0,81$	$3,09\pm 0,78$

Uzyskane wyniki badań zostały ocenione zgodnie z kryteriami opracowanymi przez Bruce and Rayment (1982) oraz Miller and Donahue (1995). Zmierzona wartość zasolenia (wyrażona jako EC) mieściła się w zakresie 3,02 to $7,06 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, co klasyfikuje próbki odpadów do następujących grup:




- lekko zasolone ($2 - 4 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$) dla punktów 3 i 5,
- średnio zasolone ($4 - 8 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$) dla punktów 1, 2 i 4.


Zmierzona wartość pH próbek odpadów mieściła się w granicach od 2,17 do 4,02 (silnie kwasowa). Zauważono również, że bardziej kwaśne są odpady z warstwy powierzchniowej (0,0 – 0,2 m) – pH 2,42 w porównaniu z odpadami z warstw głębszych.

5 Komponenty do wytworzenia substytutów glebowych

Do opracowania sztucznych mieszanek glebowych wykorzystano cztery uboczne produkty spalania węgla z elektrowni węglowych, zlokalizowanych na Górnym Śląsku w Polsce oraz dwa produkty uboczne z kopalń węgla kamiennego należących do TAURON Wydobycie S.A. Dodatkowo z oczyszczalni ścieków w Jaworznie oraz pieczarkarni w Kryrach pozyskano dwa odpady organiczne, w tym osady ściekowe i kompost ze zużytego podłoża pieczarkowego. Listę wybranych materiałów przebadanych jako składniki do przygotowania sztucznych mieszanek glebowych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2 Komponenty sztucznych mieszanek glebowych

Nr	Odpady	Nazwa	Symbol	Pochodzenie
1		Popiół lotny (spalanie węgla kamiennego)	CFA	Elektrownia Jaworzno 3
2		Popiół lotny (spalanie biomasy)	BFA	Elektrownia Jaworzno 2
3		Żużel energetyczny	ES	Elektrownia Łaziska

4		Dekarbonizat	DL	Elektrownia Łaziska
5		Kruszywo 0.0 – 2.0 mm	AG	Zakład Górnictwy Sobieski
6		Materiał uszczelniający TAURONIT U –	SL	Zakład Górnictwy Sobieski
7		Osad ściekowy	SWS	Oczyszczalnia ścieków Chrzanów
8		Zużyte podłoże pieczarkowe	CM	Kryry

5.1 Parametry fizykochemiczne komponentów

Wyniki badań laboratoryjnych komponentów dla wytworzenia substytutów glebowych zestawiono w tabeli 3. Materiały odpadowe różniły się od siebie zawartością składników chemicznych oraz strukturą.

Tabela 3 Charakterystyka fizykochemiczna komponentów

Parametr		Rodzaj materiału *								
		CFA	BFA	DL	AG	SL	SWS	CM	ES	
pH	-	12,0	13,1	9,6	7,6	8,0	7,5	7,1	9,8	
EC	mS·cm ⁻¹	3,60	39,4	1,57	0,50	0,90	12,18	7,76	0,35	
DM	%	100,0	99,7	50,8	90,1	72,6	16,6	34,7	77,6	
OM		3,28	0,52	7,02	15,9	35,6	64,33	60,4	4,38	
A		96,7	99,5	93,0	84,1	64,4	35,67	39,5	95,6	
Ca		2,27	9,65	32,0	0,43	0,34	4,45	8,22	2,74	
N		< 0,15	< 0,15	0,32	0,18	0,40	4,61	2,36	< 0,15	
K		2,05	5,53	0,04	2,32	1,69	0,037	1,03	2,14	
Mg		1,15	2,43	5,44	0,24	0,57	0,74	0,42	1,69	
P		0,10	1,07	0,01	0,02	0,03	2,73	0,78	0,11	
Na		1,22	0,75	0,01	0,09	0,08	0,10	0,13	0,32	
S		0,16	0,98	0,24	3,95	0,63	1,87	1,97	0,32	
Cd		1	9	< 1	4	< 1	29	< 1	1	
Cr		mg·kg ⁻¹	88	54	1	22	76	74	7	53
Cu			86	173	3	85	31	269	29	46
Ni	67		28	9	26	33	42	7	47	
Pb	94		176	4	213	53	300	2	3	
Zn	139		610	36	1281	141	2710	183	22	

DM-suchość, OM-materia organiczna, A-zawartość popiołu, EC-przewodność właściwa

Spośród wszystkich badanych odpadów jedynie CFA, BFA i AG charakteryzowały się wyjątkowo niską zawartością wody (90-100% suchej masy), przy czym SL i ES zawierały odpowiednio 72,6% i 77,6% suchej masy, a DL 50,8%.

Spośród wszystkich badanych odpadów tylko trzy, tj. SL, SMC i SWS, można było uznać za bogate w materię organiczną, mieszczącą się w przedziale 35,6-74,8%.

Największą zawartość wapna (Ca) zaobserwowano w DL w porównaniu do niskiego zakresu w SL i AG. Trzy, spośród ośmiu badanych odpadów, wykazywały zawartość siarki (S) powyżej 1,8%, tj. SWS i SMC, natomiast w pozostałych odpadach zawartość siarki nie przekraczała 1,0%

Stężenie fosforu (P), wyższe niż 1,0%, odnotowano w dwóch typowo organicznych odpadach tj. SWS i SMC oraz w jednym mineralnym pochodzącym ze spalania biomasy - BFA. Ponadto BFA charakteryzował się także najwyższą zawartością potasu (K).

Najwyższą zawartość miedzi (Cu) stwierdzono w popiołach BFA i CFA oraz osadzie ściekowym SWS. Nadmierną zawartość cynku (Zn) zaobserwowano jedynie dla SWS (1704,0 mg·kg⁻¹).

Zgodnie z polskimi przepisami dopuszczalny zakres zanieczyszczeń w nawozach organiczno-mineralnych nie może przekraczać 100 mg·kg⁻¹ s.m. dla chromu (Cr), 5 mg·kg⁻¹ s.m. dla kadmu (Cd), 60 mg·kg⁻¹ s.m. dla niklu (Ni) oraz 140 mg·kg⁻¹ s.m. dla ołowiu (Pb). Nadmierne stężenie Cd zaobserwowano jedynie w przypadku odpadów SWS i BFA. Zawartość Ni była niższa od polskiej wartości dopuszczalnej tylko w dwóch spośród wszystkich odpadów, takich jak DL (9 mg·kg⁻¹) i SMC (7 mg·kg⁻¹). Nadmierne wartości Pb odnotowano dla BFA, AG i SWS. Stężenie Cr we wszystkich badanych odpadach można uznać na poziomie dopuszczalnym (< 100 mg·kg⁻¹).

Wyniki badań fizykochemicznych odcieków wodnych z materiałów odpadowych do opracowania mieszanek glebowych przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4 Charakterystyka fizykochemiczna odcieków wodnych z komponentów

Parametr		Rodzaj materiału*							
		CFA	BFA	DL	AG	SL	SWS	CM	ES
pH	-	11,9	12,8	9,70	7,50	7,80	7,50	7,10	9,8
EC	mS·cm ⁻¹	3,60	39,40	1,57	0,50	0,90	12,20	7,70	0,35
Ca ²⁺	mg·l ⁻¹	612	540	3,35	25,9	40,5	642	1100	43,4
Mg ²⁺		0,26	<0,12	347	19,2	29,7	251	289	9,03
Na ⁺		184	175	5,52	33,4	101	167	223	12
K ⁺		29,8	11800	1,35	11,9	17,3	228	1870	6,57
NH ₄ ⁺		21,1	1	0,5	4,5	3,2	1980	239	0,3
NO ₃ ⁻		0,32	0,86	40	0,3	0,17	<0,5	4,2	0,35
N _t		16,5	0,97	9,42	3,57	2,53	1540	187	0,31
PO ₄		0,011	<0,1	<0,01	<0,01	<0,01	77	170	0,13
P _t		<0,03	<0,07	<0,03	<0,010	<0,010	36,5	57,4	0,053
SO ₄ ²⁻		1010	7460	581	192	250	5030	3200	112
Cl ⁻		20	4720	10	6,6	87	185	394	7,2
Cu		<0,005	<0,01	<0,005	<0,003	<0,005	0,042	0,32	<0,003
Fe _{tot}		0,006	<0,02	0,0047	0,0032	0,02	11,5	10,8	0,0086
Mn		<0,003	<0,003	<0,003	0,14	0,14	1,66	2,77	0,0014
Zn		<0,01	0,029	<0,01	0,015	0,011	0,31	0,79	<0,01
As		<0,03	<0,02	<0,005	<0,005	<0,005	0,14	0,050	<0,01
Cd		<0,001	<0,001	<0,001	<0,0005	<0,001	<0,002	0,0029	<0,0005
Cr		0,69	0,45	<0,003	<0,003	<0,003	0,007	0,019	<0,003
Ni	<0,005	<0,005	<0,005	<0,003	<0,005	0,71	0,082	<0,003	
Pb	<0,005	<0,01	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	

Analiza wykazała, że pH SMC (pH 7,1), SWS (pH 7,5), SL (pH 7,8) i kruszywa AG (pH 7,5) było obojętne lub lekko zasadowe w porównaniu z innymi odpadami przemysłowymi (zakres pH od 9,7 do 12,8). Przewodność elektryczna (EC) BFA (39,4 mS·cm⁻¹) była

znacznie wyższa w porównaniu z innymi odpadami mineralnymi, w granicach od 0,35 dla EC do $3,6 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ dla CFA, oraz stosunkowo wyższa niż odpadów organicznych.

Zawartość wapnia (Ca^{2+}) w odpadach mineralnych wahała się od 3,35 do $612 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ i wynosiła $642 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ dla SWS i $1110 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ dla CM. Niskie stężenia wapnia w wodnych ekstraktach z DL wynikały z obecności Ca^{2+} w postaci nierozpuszczalnego węglanu (CaCO_3). Natomiast stężenie magnezu (Mg^{2+}) w odciekach z DL było bardzo wysokie ($347 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) w porównaniu do pozostałych próbek.

Stężenie sodu wahało się od $5,52 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (DL) do $223 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (CM), natomiast potasu od $1,35 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (DL) do $1870 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (CM). Wysokie wartości fosforu ogólnego (P_t), tj. $36,5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ i $57,4 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, stwierdzono jedynie w przypadku odpadów organicznych SWS i CM. Stężenie azotu ogólnego (N_t) wynoszące $1540 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ dla SWS i $187 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ dla CM było również stosunkowo wyższe niż w węglowych produktach ubocznych, które mieściły się w przedziale $0,97\text{-}16,50 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$.

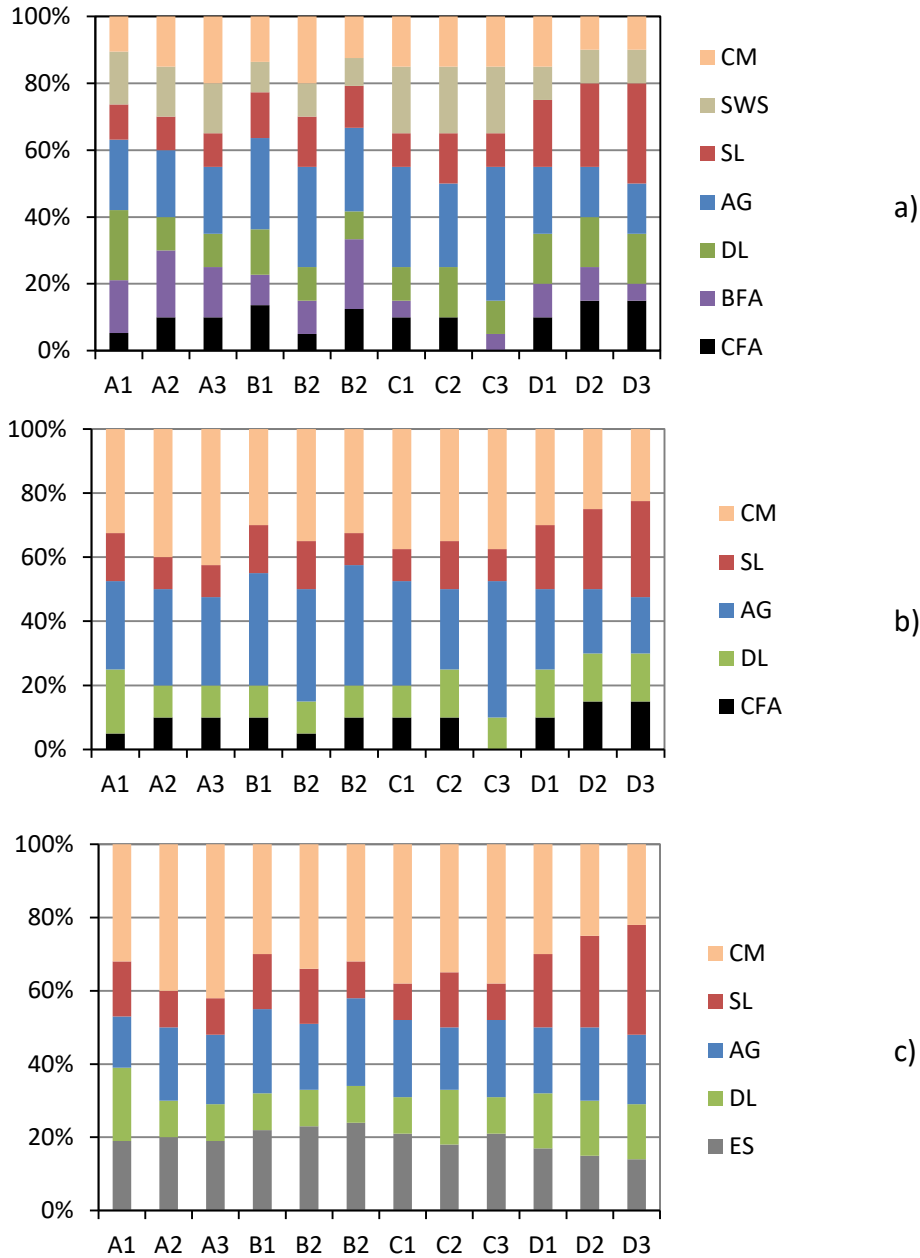
Stężenia pierwiastków śladowych takich jak Fe, Mn, As i Ni były wyższe w odpadach organicznych (SWS i CM) w porównaniu z produktami ubocznymi z przemysłu. Natomiast zawartość Cr w popiołach lotnych, tj. $0,69$ i $0,45 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ odpowiednio dla CFA i BFA, była wyższa niż w odpadach organicznych tj. SWS $0,007 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ i SMC $0,019 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$.

5.2 Wytwarzanie i charakterystyka substytutów glebowych

Właściwości fizykochemiczne opracowywanych podłoży odzwierciedlały wymagania siedliskowe dla 4 typów zbiorowisk roślinnych, tj.:

- roślinności kserotermicznej tj. sucha i ciepłolubne gatunki roślin (A1-A3),
- roślinności łąkowej siedlisk świeżych (B1-B3),
- roślinności krzewiastej o funkcji przeciwozyjnej (C1-C3) oraz
- roślinności siedlisk podmokłych (D1-D3).

Eksperymenty przeprowadzono w trzech etapach operacyjnych (Etap I-III). Wytworzone w warunkach laboratoryjnych substytuty glebowe symbol A1-D3 ($n=36$) różniły się od siebie typem i zawartością poszczególnych komponentów co przedstawiono na Rys. 7 a-c.



Rys. 7 Skład mieszanek glebowych A1-D3 a) Etap I, b) Etap II, c) Etap III

Prace związane z przygotowaniem mieszanek glebowych w skali laboratoryjnej przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8 Wytwarzanie mieszanek glebowych w warunkach laboratoryjnych

Za decydujące o optymalnym kiełkowaniu nasion i dalszym wzroście roślin uznane zostały dwa parametry: pH i przewodność właściwa (*EC-electrical conductivity*). Jak podano w tabeli 5 oraz na podstawie ogólnej klasyfikacji (Bruce and Rayment, 1982), pH substytutów gleby wykazało trzy podstawowe zakresy:

- umiarkowanie zasadowe (pH 8,0-8,4),
- silnie zasadowe (pH 8,5-9,0) oraz
- bardzo silnie zasadowe (pH >9,0).

Wyniki badań pH i przewodności właściwej dla poszczególnych substytutów gleb przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5 Wartości pH and przewodności właściwej dla poszczególnych substytutów gleb

Substytut glebowy	pH			EC, mS·cm ⁻¹		
	ETAP					
	I	II	III	I	II	III
A1	9,1 ^(a)	8,3 ^(c)	8,3 ^(c)	10,0 ^(e)	8,01 ^(e)	6,73 ^(d)
A2	9,4 ^(a)	8,1 ^(c)	8,2 ^(c)	11,7 ^(e)	7,54 ^(d)	6,67 ^(e)
A3	9,1 ^(a)	8,1 ^(c)	8,2 ^(c)	10,2 ^(e)	7,61 ^(d)	6,63 ^(d)
B1	9,0 ^(b)	8,2 ^(c)	8,2 ^(c)	6,9 ^(d)	6,21 ^(d)	5,39 ^(e)
B2	8,8 ^(b)	8,1 ^(c)	8,3 ^(c)	8,4 ^(e)	6,66 ^(d)	5,98 ^(d)
B3	9,6 ^(a)	8,2 ^(c)	8,3 ^(c)	11,0 ^(e)	6,93 ^(d)	5,66 ^(d)
C1	8,5 ^(b)	8,2 ^(c)	8,2 ^(c)	6,2 ^(d)	6,57 ^(d)	5,90 ^(d)
C2	8,3 ^(c)	8,2 ^(c)	8,4 ^(c)	4,7 ^(d)	8,85 ^(e)	6,19 ^(d)
C3	8,3 ^(c)	8,0 ^(c)	8,2 ^(c)	6,2 ^(d)	6,71 ^(d)	6,30 ^(d)
D1	9,0 ^(b)	8,3 ^(c)	8,6 ^(b)	6,7 ^(d)	6,87 ^(d)	5,80 ^(d)
D2	9,2 ^(a)	8,2 ^(c)	8,8 ^(b)	6,8 ^(d)	6,05 ^(d)	5,28 ^(d)
D3	8,7 ^(b)	8,2 ^(c)	8,4 ^(c)	5,1 ^(d)	5,73 ^(d)	5,71 ^(d)

(a) bardzo silnie alkaliczny, (b) silnie alkaliczna, (c) umiarkowanie alkaliczna; (d) umiarkowanie zasolony, (e) mocno zasolony (Bruce and Rayment, 1982; Hazelton and Murphy, 2016)

Analiza parametrów fizyko-chemicznych komponentów użytych w Etapie I wykazała, że składnikami, które w decydujący sposób wpłynęły na wysokie pH mieszanek glebowych oraz zawartość związków rozpuszczalnych był popiół lotny ze spalania biomasy. Natomiast wysokie stężenia jonów amonu związane były z zawartością osadów ściekowych. Charakterystykę głównych składników odżywczych roślin w badanych substytutach glebowych, na poszczególnych etapach ich wytwarzania (I-III) przedstawiono w tabelach 6-8.

Tabela 6 Charakterystyka składników odżywczych roślin w substytutach glebowych (Etap I)

Substytut glebowy	Parametr (%)							
	TOC	Ca	N _t	K	Mg	P _t	S _t	Na
A1	16,2	8,39	0,40	2,54	1,61	0,41	3,10	0,18
A2	18,7	6,07	0,40	2,27	1,24	0,25	3,76	0,15
A3	17,5	5,97	0,49	2,76	1,28	0,44	3,16	0,26
B1	16,4	6,10	0,37	3,17	1,36	0,47	2,97	0,35
B2	22,9	5,42	0,44	2,40	1,08	0,33	3,78	0,16
B3	14,9	4,93	0,37	2,81	1,71	0,38	3,42	0,24
C1	20,7	4,82	0,56	1,98	0,97	0,28	4,26	0,14
C2	23,9	6,50	0,48	1,47	1,16	0,23	3,42	0,19
C3	22,5	4,70	0,47	1,94	0,83	0,27	5,51	0,12
D1	19,1	6,11	0,38	2,19	1,16	0,27	3,15	0,23
D2	20,6	7,67	0,46	2,13	1,47	0,29	1,54	0,45
D3	25,0	6,13	0,51	1,78	1,31	0,23	1,21	0,22

Tabela 7 Charakterystyka składników odżywczych roślin w substytutach glebowych (Etap II)

Substytut glebowy	Parametr (%)							
	TOC	Ca	N _t	K	Mg	P _t	S _t	Na
A1	35,6	7,23	0,50	1,54	1,16	0,15	3,76	0,06
A2	36,0	5,37	0,56	1,78	0,90	0,18	4,20	0,10
A3	34,7	5,34	0,62	1,77	0,90	0,18	3,80	0,12
B1	41,5	4,63	0,32	1,77	0,87	0,13	3,91	0,10
B2	36,8	4,9	0,53	1,69	0,78	0,12	4,47	0,07
B3	41,2	4,47	0,47	1,78	0,83	0,14	4,45	0,10
C1	42,7	5,85	0,48	1,69	0,92	0,13	4,21	0,19
C2	30,5	6,9	0,61	1,64	1,23	0,19	2,80	0,18
C3	37,8	4,58	0,56	1,71	0,68	0,14	5,61	0,03
D1	35,6	5,52	0,35	1,65	1,03	0,13	3,20	0,09
D2	40,1	5,37	0,43	1,68	0,96	0,14	2,98	0,16
D3	39,9	4,95	0,49	1,67	0,96	0,13	2,70	0,14

Tabela 8 Charakterystyka składników odżywczych roślin w substytutach glebowych (Etap III)

Substytut glebowy	Parametr (%)							
	TOC	Ca	N _t	K	Mg	P _t	S _t	Na
A1	23,74	8,23	0,51	1,63	1,38	0,20	2,66	0,19
A2	22,23	5,51	0,56	1,96	1,02	0,21	3,28	0,20
A3	23,05	6,33	0,60	1,86	1,11	0,21	3,46	0,22
B1	22,61	5,32	0,44	1,86	1,01	0,14	3,69	0,19
B2	22,95	5,88	0,46	1,86	1,08	0,18	3,41	0,19
B3	20,27	6,00	0,45	1,98	1,09	0,17	4,12	0,19
C1	22,68	6,18	0,50	1,88	1,08	0,19	3,32	0,19
C2	24,55	6,95	0,51	1,79	1,26	0,17	3,18	0,18
C3	22,51	6,07	0,52	1,90	1,09	0,20	3,56	0,18
D1	24,61	6,88	0,48	1,71	1,22	0,16	3,61	0,17
D2	26,24	5,92	0,48	1,69	1,19	0,13	3,21	0,17
D3	27,90	5,38	0,48	1,74	1,13	0,13	3,41	0,16

Uzyskane wyniki wskazały, że zawartość materii organicznej oraz podstawowych składników pokarmowych może być wystarczająca do wspomaganie wzrostu roślin oraz dalszej produkcji biomasy.

5.3 Testy fitotoksyczności

5.3.1 Ocena kiełkowania i wzrostu *Sinapis alba*

Do oceny fitotoksyczności substytutu glebowego wykorzystano roślinę testową gorczycę białą (*Sinapis alba*). Jako glebę referencyjną (S0) wykorzystano glebę ogrodową, bogatą w materię organiczną o optymalnych parametrach (N, P, K). Wartości pH i przewodności elektrycznej gleby S0 wynosiły odpowiednio 5,5 i $443 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Zawartość materii organicznej w S0 wynosiła 89%, a koncentracja azotu (N), fosforu (P) i potasu (K) wynosiła odpowiednio 0,91, 0,11 i 0,12%.

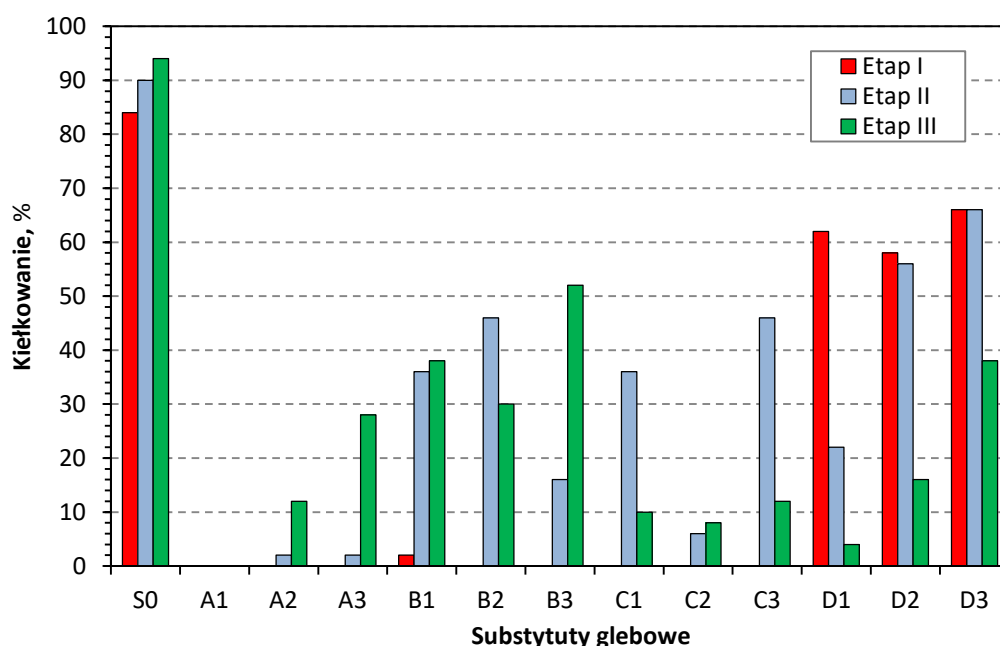
Eksperyment prowadzono w specjalnie przygotowanych inspektach hodowlanych w pomieszczeniu z monitorowanym źródłem światła, temperaturą (22°C) oraz stopniem wilgotności powietrza (30-40%) (rys. 9). W każdym inspeckie umieszczono, 50 nasion *Sinapis alba* w odległości 1 cm. Wskaźnik kiełkowania wyznaczono po 20 dniach.



Rys. 9 Wegetacja *Sinapis alba* na substytutach glebowych

Wyniki badań wykazały, że zasolenie miało decydujący wpływ brak lub nieefektywny proces kiełkowania. Na podstawie odpowiedzi gorczycy białej, za progową dla roślin wrażliwych na zasolone podłoże można było uznać EC równe $6,50 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$. Fitotesty z gorczycą białą wykazały, że najbardziej obiecujące wyniki uzyskano na etapie III. Kiełkowanie w glebie referencyjnej S0 wahało się od 84 do 94 %, co potwierdza, że zastosowano nasiona dobrej jakości i przeprowadzono testy właściwe dla rozwoju gorczycy białej.

Wyniki kiełkowania *S. alba* przedstawiono na rysunku 10. Substytuty glebowe o niskiej zdolności do magazynowania wody i umiarkowanej zawartości składników pokarmowych wykazały najlepsze kiełkowanie dla A3 w III etapie (26%) w porównaniu z A2 (12%) i A1 (0%). Substytuty glebowe o niskiej retencji wody i małej zawartości składników pokarmowych wykazały dobre kiełkowanie dla B3 w etapie III (52%). Najbardziej obiecującym substytutem glebowym o umiarkowanej zdolności zatrzymywania wody i niskiej zawartości składników pokarmowych był C3 na etapie II (46%). Kiełkowanie gorczycy białej w substytutach glebowych o umiarkowanej zdolności zatrzymywania wody i umiarkowanym zakresie składników pokarmowych wykazało dobre wyniki w I i II etapie, tj. odpowiednio 58 i 56% dla D2 oraz 66% dla D3.



Rys. 10 Kiełkowanie *Sinapis alba* na substytutach glebowych (A1-D3) i glebie (S0)

Zależności pomiędzy parametrami przedstawionymi w tabelach 5 i 8 wykazały różne interakcje. Wzrost stężenia wapnia (5,32-8,23%) w mieszankach glebowych (etap III) był przyczyną spadku zawartości siarki (2,66-4,12%) i równocześnie podnosił wartości pH i przewodności właściwej.

Zależność między kiełkowaniem pędów gorczycy białej (GER, %), a parametrami fizykochemicznymi substytutów gleby analizowano za pomocą współczynnika korelacji liniowej Pearsona w programie Statistica 12.0 (Tabela 9). Analiza wykazała ujemną korelację kiełkowania ze zmierzoną wartością przewodnictwa właściwego ($r=-0,46$). Zawartość wilgoci (W), pH oraz zawartości pierwiastków chemicznych (Ca, N, K, Mg, S i Na) wykazały bardzo słabą korelację z kiełkowaniem (od -0,26 do 0,1), a zawartość fosforu i materii organicznej (OM) korelację umiarkowaną odpowiednio -0,31 i 0,32.

Tabela 9 Współczynniki korelacji Pearsona pomiędzy parametrami fizyko-chemicznymi substytutów glebowych, a kiełkowaniem nasion gorczycy białej

Parameter	pH	W	OM	Ca	N	K	Mg	P	S	Na	EC	GER
pH	1,00	0,06	-0,35	0,47	-0,25	-0,02	0,51	0,06	-0,49	0,49	-0,25	0,12
W		1,00	-0,16	0,30	0,52	-0,41	-0,14	-0,25	0,02	-0,04	-0,43	-0,05
OM			1,00	-0,40	0,16	-0,65	-0,69	-0,72	0,28	-0,62	-0,26	0,32
Ca				1,00	0,04	0,05	0,68	0,25	-0,56	0,44	0,14	-0,20
N					1,00	-0,42	-0,30	-0,27	0,11	-0,19	-0,17	-0,12
K						1,00	0,54	0,90	-0,12	0,55	0,58	-0,26
Mg							1,00	0,62	-0,66	0,66	0,43	-0,24
P								1,00	-0,22	0,58	0,55	-0,31
S									1,00	-0,66	0,03	-0,24
Na										1,00	0,05	0,10
EC											1,00	-0,46
GER												1,00

W - wilgotność (%); OM materia organiczna (%); EC-przewodność właściwa ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$); GER–kiełkowanie *Sinapis alba* (%)

5.3.2 Testy z wykorzystaniem roślin siedlisk łąkowych

Substytuty glebowe opracowane w III etapie badań zostały poddane kolejnym fitotestom z zastosowaniem roślin siedlisk świeżych (mesic meadow) i roślin siedlisk kserotermicznych tzw. suchych (dry meadow). Skład gatunkowy mieszanki nasion zestawiono w tabeli 10.

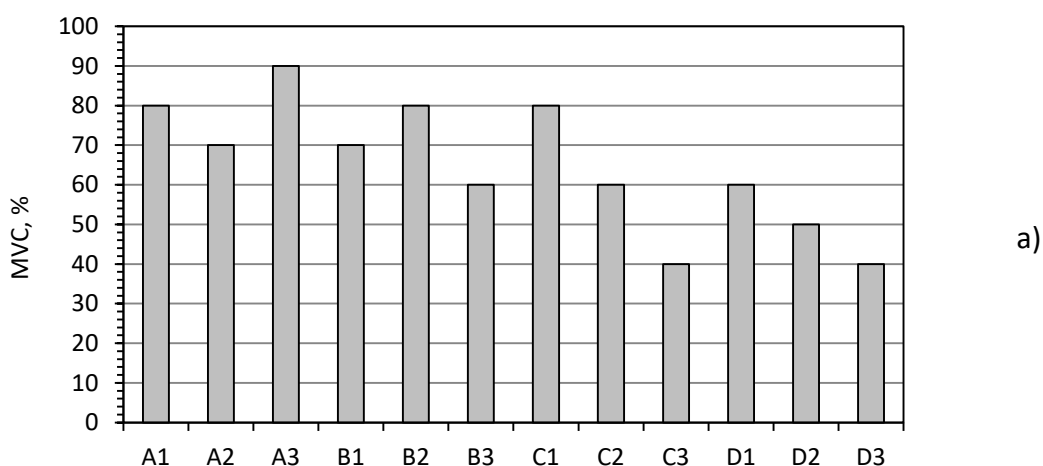
Tabela 10 Gatunki nasion roślin siedlisk suchych (dry meadow) i świeżych (mesic meadow)

Typ roślinności	Gatunek
roślinność zielna siedlisk suchych	- Rośliny kwitnące 75% ilości wagowej mieszanki nasion: <i>Euphorbia cyparissias, Tussilago farfara, Hypericum perforatum, Artemisia vulgaris, Papaver rhoeas, Vicia cracca, Securigera varia, Vicia villosa Vicia grandiflora, Centaurea scabiosa, Knautia arvensis, Echium vulgare, Cichorium intybus, Achillea millefolium, Centaurea jacea, Verbascum thapsiforme, Anthemis tinctoria, Saponaria officinalis, Agrimonia eupatorium, Verbascum nigrum, Succisa pratensis, Leontodon hispidus, Tripleurospermum inodorum, Cynoglossum officinale, Tragopogon pratensis.</i> - Trawy – 25% ilości wagowej mieszanki
roślinność zielna siedlisk świeżych	- rośliny kwitnące 60% ilości wagowej mieszanki nasion: <i>Leucanthemum vulgare, Lotus corniculatus, Lychnis flos-cuculi, Securigera varia, Ranunculus acris, Ranunculus polyanthemos, Knautia arvensis, Vicia cracca, Vicia grandiflora, Tragopogon pratensis, Achillea millefolium, Centaurea phrygia, Centaurea jacea, Daucus carota, Leontodon hispidus, Stachys officinalis, Sanguisroba officinalis, Tripleurospermum inodorum, Campanula patula.</i> - trawy - Trawy – 40% ilości wagowej mieszanki:

Badania wykonano z użyciem 3g nasion na 1kg substytutu glebowego, w trzech powtórzeniach, w warunkach zewnętrznych bez sztucznego stosowania wody i światła. Procent pokrycia roślinnością łąkową (MVC) obliczono po 45 dniach wegetacji z wykorzystaniem równania:

$$MVC = \frac{\text{powierzchnia pokryta roślinnością}}{\text{całkowita powierzchnia}} \times 100$$

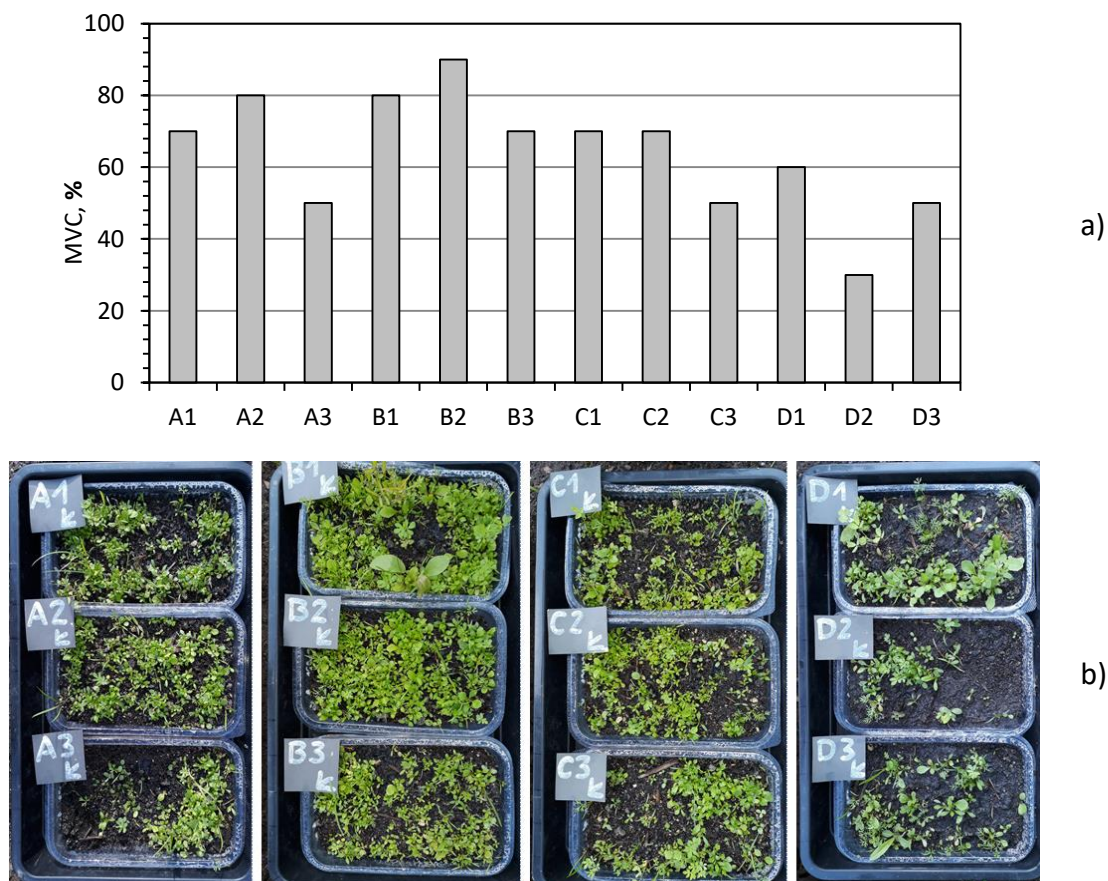
Wyniki wegetacji roślin zbiorowisk łąkowych na substytutach glebowych A1-D3 opracowanych w ostatnim etapie (etap III) przedstawiono na rysunkach 11 i 12.



Rys. 11 Rozwój roślinności siedlisk świeżych (mesic meadow) na substytutach glebowych: a) procent pokrycia (MVC, %); b) widoczne rezultaty

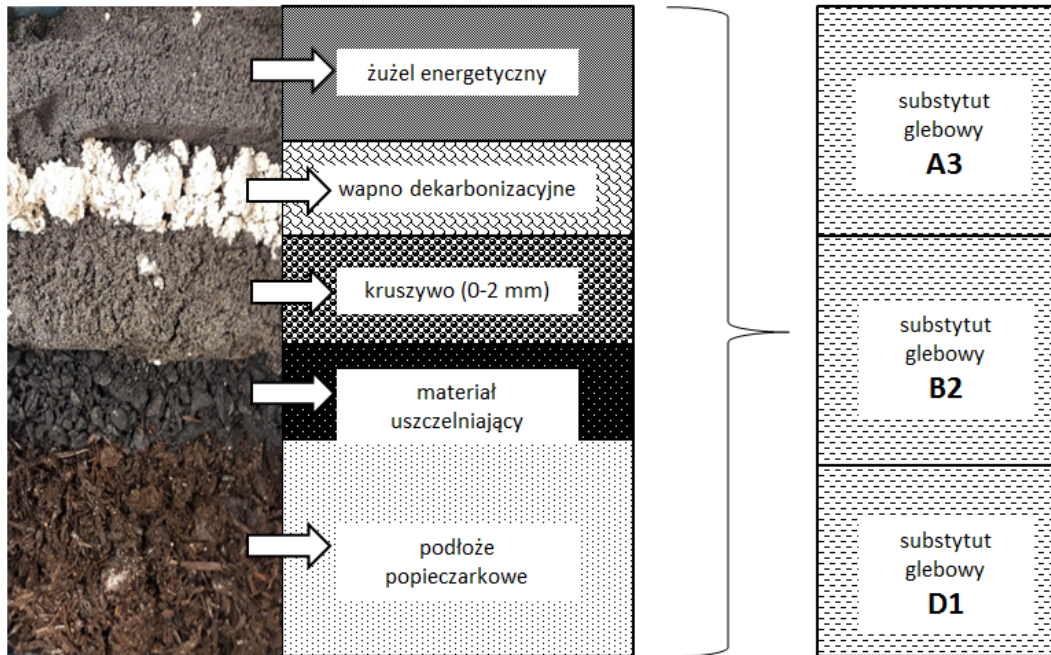
Liczba gatunków na łąkach siedlisk świeżych (rys. 11) wahała się od 5 (dla A1, B1, C2, C3 i D5) do 6 (dla A2, B2, B3, C1 i D2), aż do największej liczby gatunków tj. 7 dla D1, co oznacza, że procesy adaptacji i tolerancji były znacząco wysokie. Szata roślinna, jako dowód adaptacji do nowych środowisk wzrostu, była bardzo zróżnicowana i wyniosła od 40 do 90%.

Liczba gatunków dla roślinności siedlisk suchych (rys. 12) wahała się w dużym przedziale, od 4 (A2, D3) przez 5 (A1, B3, C1, C3, D1, D2) do 6 (A3, B2, C2), sięgając nawet 8 dla B1 (rys. 13). Stopień pokrycia roślinnością był znacznie bardziej zróżnicowany tj.: od 30 do 90%, podczas gdy 30% dotyczyło tylko jednego przypadku (D2).



Rys. 12 Rozwój roślinności siedlisk suchych (dry meadow) na substytutach glebowych: a) procent pokrycia (MVC, %); b) widoczne rezultaty

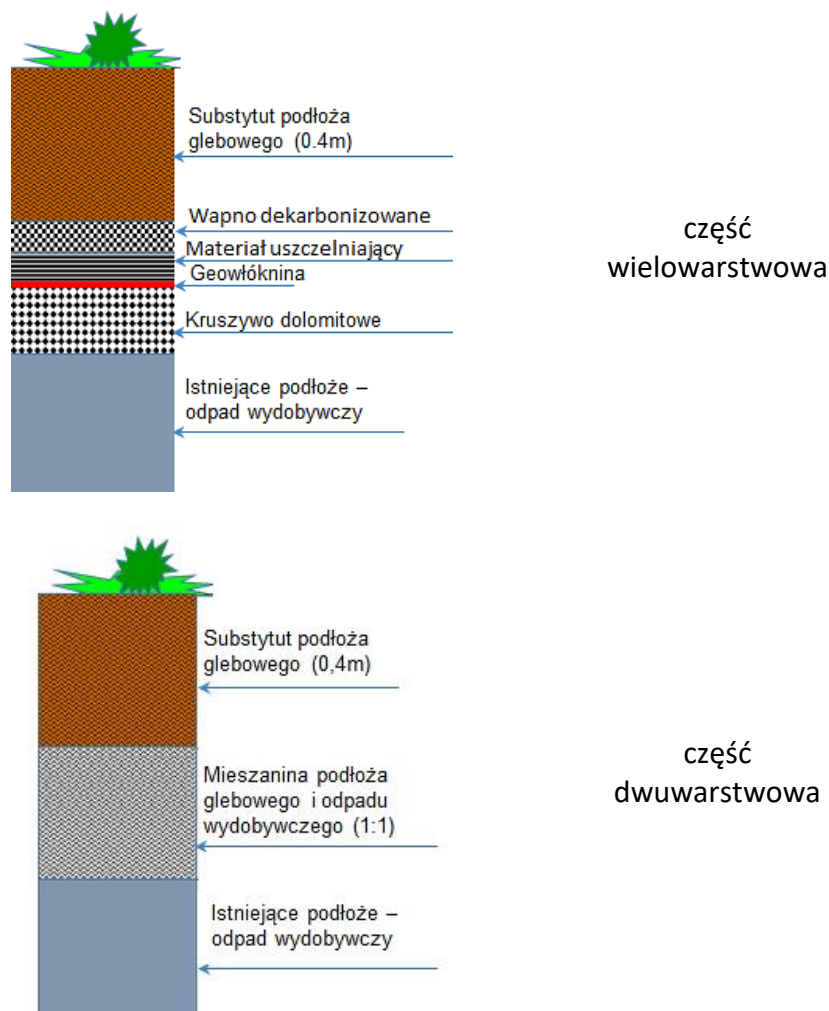
W oparciu o uzyskane wyniki fitotoksyczności wytworzono trzy typy sztucznych mieszanek glebowych przeznaczonych dla trzech typów siedlisk roślinnych: suchych (A), świeżych (B) i wilgotnych (C). Substytuty glebowe stanowiły mieszanek ubocznych produktów spalania (UPS), kruszyw, biomasy i odpadów organicznych (rys. 13).



Rys. 13 Skład mieszanek glebowych użytych na poligonie badawczym ZG Janina

6 Przygotowanie poligonu badawczego

Koncepcja wykonania eksperymentalnej pokrywy rekultywacyjnej, obejmowała fragment OUOW ZG Janina w Libiążu (4000 m²) z wykorzystaniem komponentów tworzących warstwy (rys. 14).



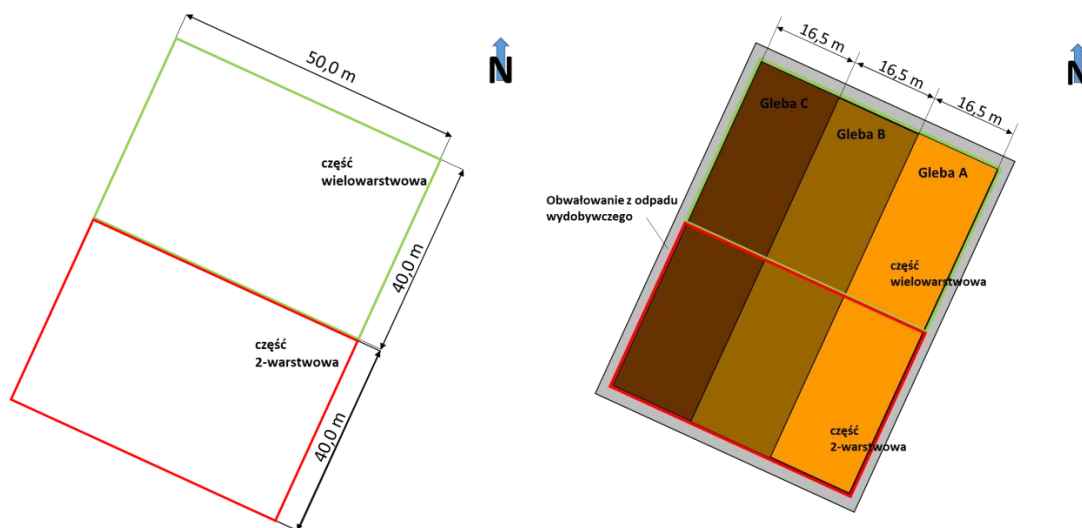
Rys. 14 Profil poligonu badawczego na terenie OUOW ZG Janina

6.1 Formowanie poligonu badawczego

Poligon został podzielony na dwie części, każda o powierzchni 2000 m² (40×50 m), różniące się sposobem aplikacji substytutu glebowego na powierzchnię odpadu wydobywczego. Północna część poligonu została przykryta uszczelnieniem wielowarstwowym, z wykorzystaniem geowłókniny oraz warstwy materiału uszczelniającego, co miało na celu odizolowanie powierzchni OUOW od wpływów atmosferycznych.

W części południowej wykonano dwuwarstwową pokrywą rekultywacyjną: dolną, będącą mieszanką substytutu gleby z odpadem wydobywczym w stosunku objętościowym 1:1 oraz górną, stanowiącą bezpośrednie podłoże dla nasadzeń roślinnych.

Opracowane rozwiązania dla rekultywacji poligonu doświadczalnego OUOW Janina przedstawiono poniżej schematycznie na rysunku 15.



Rys. 15 Podział poligonu badawczego na część wielowarstwową i część 2-warstwową

Prace terenowe w zakresie formowania poligonu badawczego, na terenie OUOW ZG Janina, obejmujące dokładną homogenizację komponentów substytutów glebowych oraz ich równomierne rozłożenie na powierzchni poligonu trwały od października do listopada 2020. Dokumentację fotograficzną z realizacji tych prac przedstawiono na rys. 16.



Rys. 16 Prace terenowe nad wykonanie poligonu badawczego

6.2 Nasadzenia roślinności

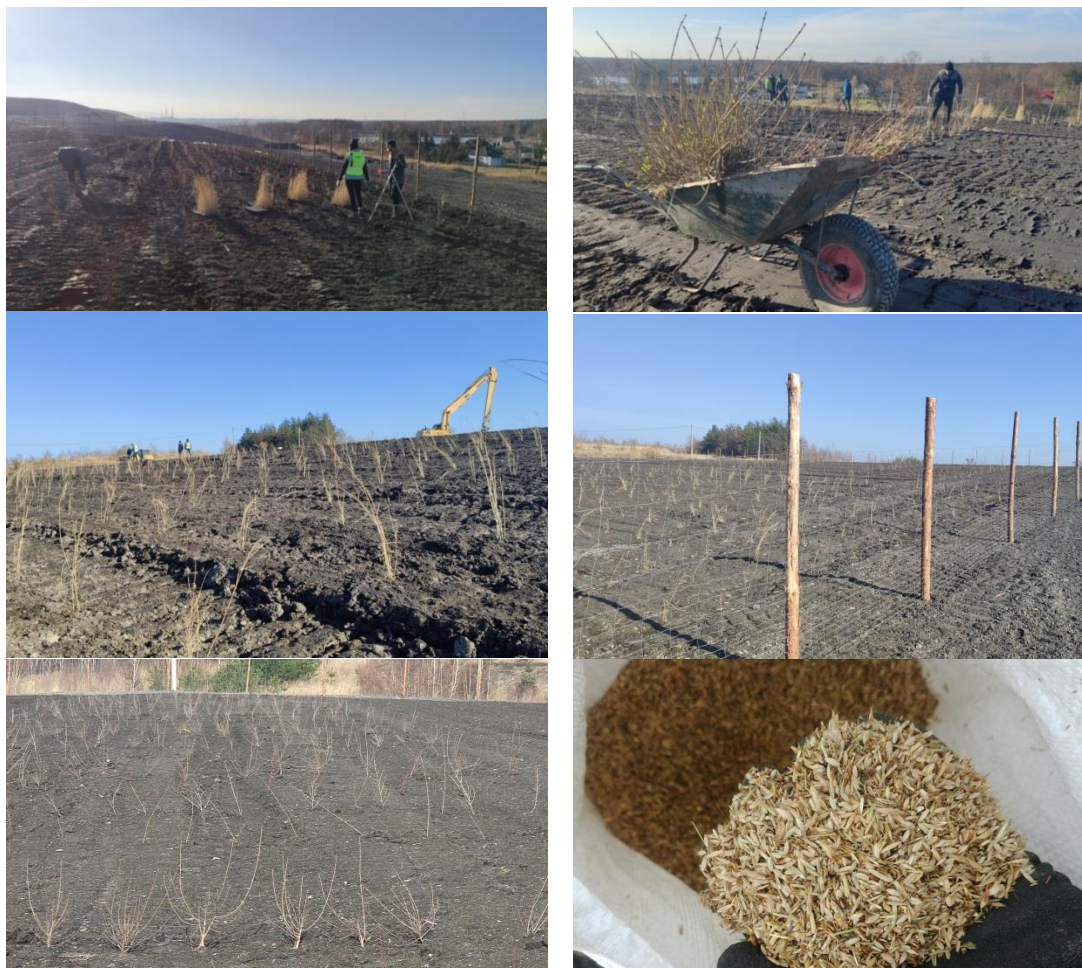
W listopadzie 2020 przeprowadzono nasadzenia roślinności na poligonie badawczym OUOW ZG Janina tj.: 4 gatunków krzewów (ok. 400 sadzonek) oraz jednego gatunku roślin siedlisk wilgotnych (ok 1000 szt. trzciny pospolitej *Phragmites australis*). Dodatkowo przeprowadzono wysiew nasion roślinności łąkowej zbiorowisk suchych (dry meadow) oraz świeżych (mesic meadow). Do nasadzeń wykorzystano sadzonki z odkrytym i nie uszkodzonym systemem korzeniowym. Średnia wysokość sadzonek krzewów mieściła się w przedziale 0,25-0,4 m, a rodzaj gatunków przedstawiono w tabeli 11.

Wysiew traw i roślin kwitnących prowadzono z wykorzystaniem ok. 3g nasion na 1 m² powierzchni.

Tabela 11 Sadzonki roślinności wykorzystane na poligonie doświadczalnym ZG Janina

Gatunek	Substytut glebowy	Wysokość (cm)	Szt.
Ligustr pospolity (<i>Ligustrum vulgare</i>)	B2	40±5	120
Dereń świdwa (<i>Cornus sanguinea</i>)	B2	35±5	120
Rokitnik pospolity (<i>Hippophae rhamnoides</i>)	B2	25±5	120
Głóg jednoszyjkowy (<i>Crataegus monogyna</i>)	B2	25±5	120
Trzcina pospolita (<i>Phragmites australis</i>)	D1	-	1000

Dokumentację fotograficzną z prac obejmujących nasadzenia roślin na poligonie badawczym OUOW ZG Janina przedstawiono na rys. 17.



Rys. 17 Nasadzenia roślinności siedlisk mokrych i krzewiastych na poligonie badawczym

6.3 Koszty materiałów dla rekultywacji poligonu badawczego

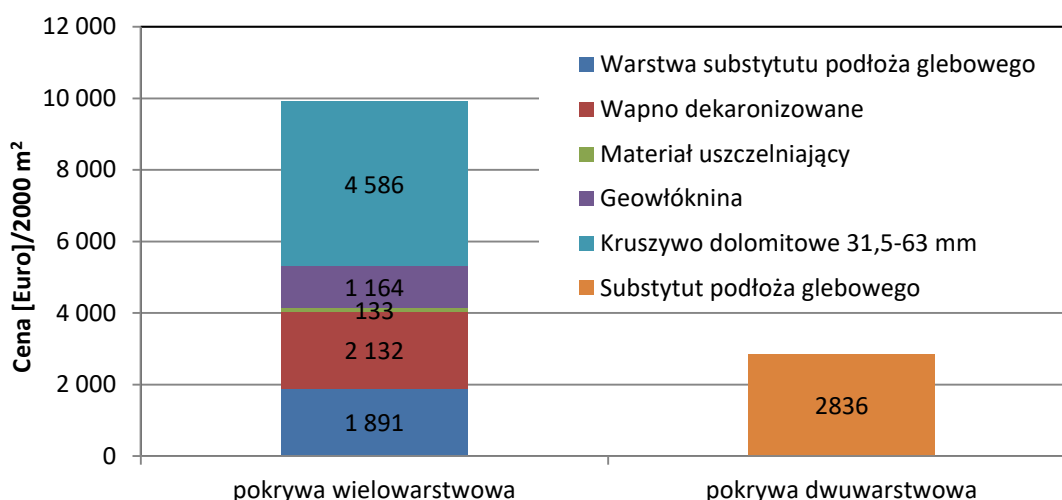
Koszt materiałów zastosowanych przy rekultywacji poligonu badawczego OUOW ZG Janina zależał od zastosowanej pokrywy metodą dwuwarstwową lub wielowarstwową. Koszty oszacowano w Euro (1 Euro = 4,62 PLN na dzień 30.10.2020).

Porównanie kosztów materiałów do rekultywacji terenów zdegradowanych działalnością górniczą zestawiono w tabeli 12 i na rys. 18.

Tabela 12 Porównanie kosztów materiałów do rekultywacji poligonu badawczego

Method	Materials	Koszt jednostkowy Euro/2000 m ²	Koszt całkowity Euro/m ²
Pokrywa wielowarstwowa	Warstwa substytutu podłoża glebowego*	1 891	4,95
	Wapno dekaronizowane	2 132	
	Materiał uszczelniający	133	
	Geowłóknina	1 164	
	Kruszywo dolomitowe 31,5-63 mm	4 586	
Pokrywa dwuwarstwowa	Substytut podłoża glebowego zmieszany z odpadem wydobywczym (50:50)	2836	1,42

* Koszty substytutów obejmują materiały odpadowe z górnictwa (patrz rys. 19)



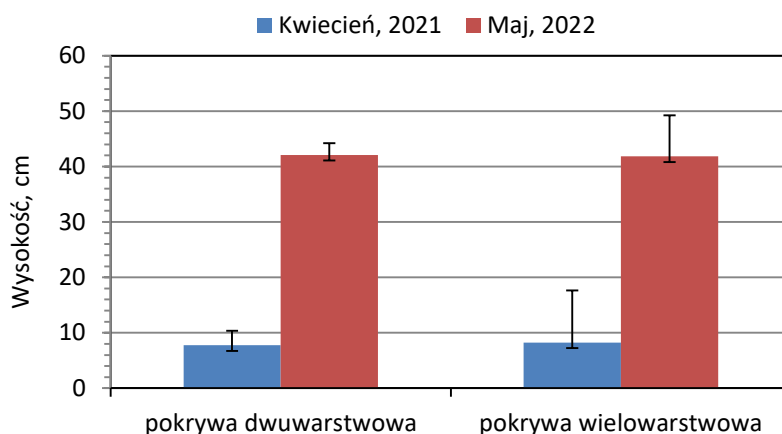
Rys. 18 Porównanie kosztów materiałów do rekultywacji poligonu badawczego dwoma metodami

Na podstawie przedstawionych obliczeń stwierdzono, że koszty rekultywacji terenów pogórnich różnią się od siebie w zależności od zastosowanej metody. Na przykładzie OUOW ZG Janina rekultywacja terenów zdegradowanych działalnością górniczą metodą wielowarstwową jest 3,5 razy droższa od rekultywacji metodą dwuwarstwową.

7 Ocena różnorodności gatunkowej na obszarze po rekultywacji

7.1 Charakterystyka zbiorowisk roślinnych

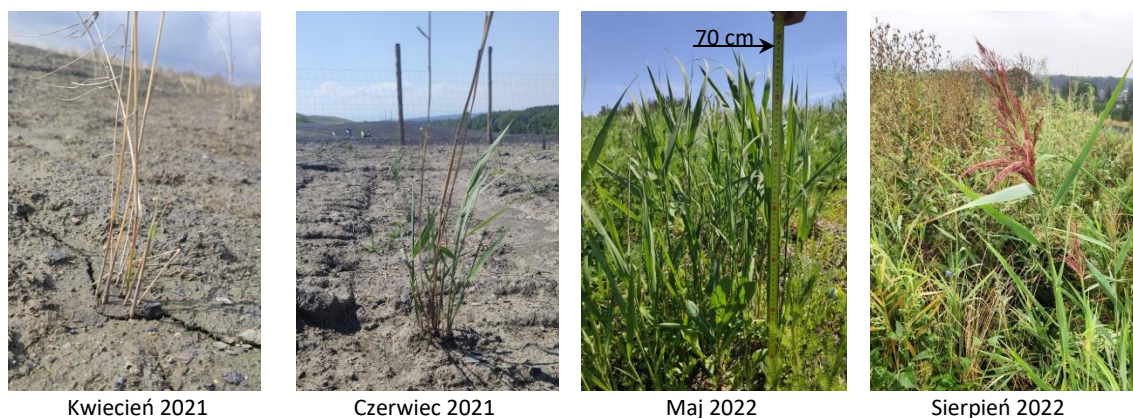
Wyniki badań przyrostu trzciny pospolitej *Phragmites australis* na poligonie badawczym z wykorzystaniem substytutu glebowego, w pierwszych dwóch latach od nasadzenia na glebie D1, przedstawiono na rys 19.



Rys. 19 Średnia wysokość *Phragmites australis* po dwóch latach wegetacji

Średnia wysokość *Phragmites australis* maju 2022 była 5 razy wyższa w porównaniu do kwietnia 2021 i wahała się od 7,7 do 42,1 cm dla pokrywy dwuwarstwowej oraz od 8,25 to 41,8 cm dla pokrywy wielowarstwowej. Nie stwierdzono znaczącej różnicy między średnią wysokością przy pokryciu dwuwarstwowym i wielowarstwowym.

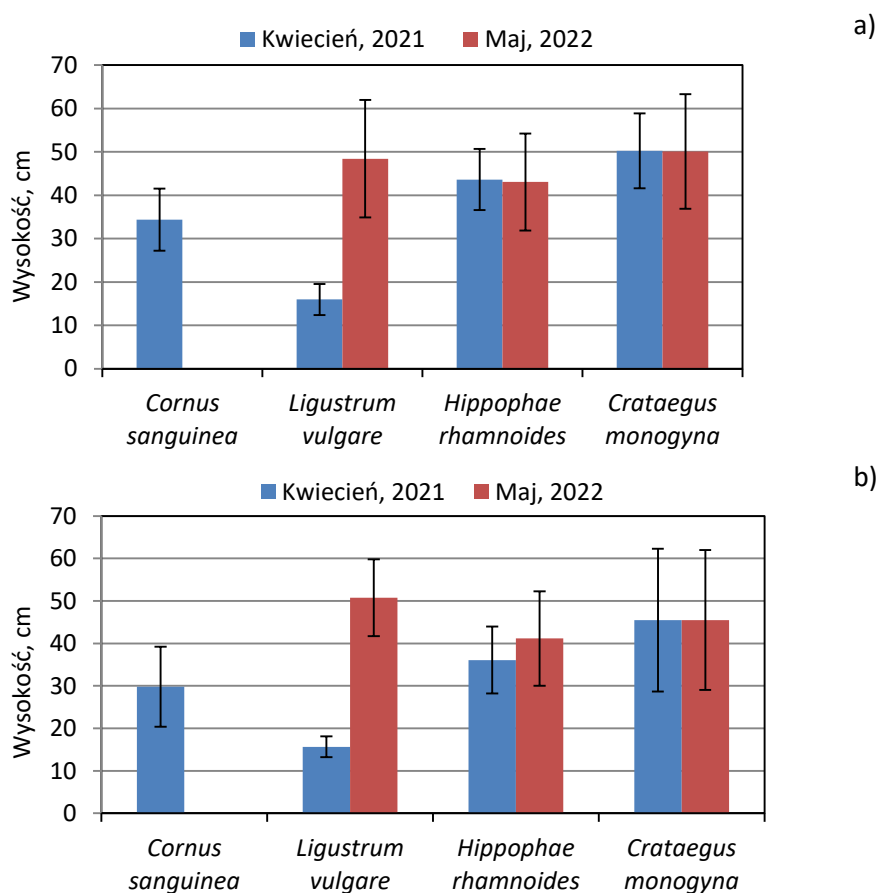
Wizualne wyniki obserwacji wzrostu trzciny pospolitej w okresie od kwietnia 2021 do sierpnia 2022 na glebie D1 przedstawiono na rys. 20.



Rys. 20 Ocena wzrostu *Phragmites australis* na substytucie glebowym D w pierwszym i drugim roku od początku wegetacji

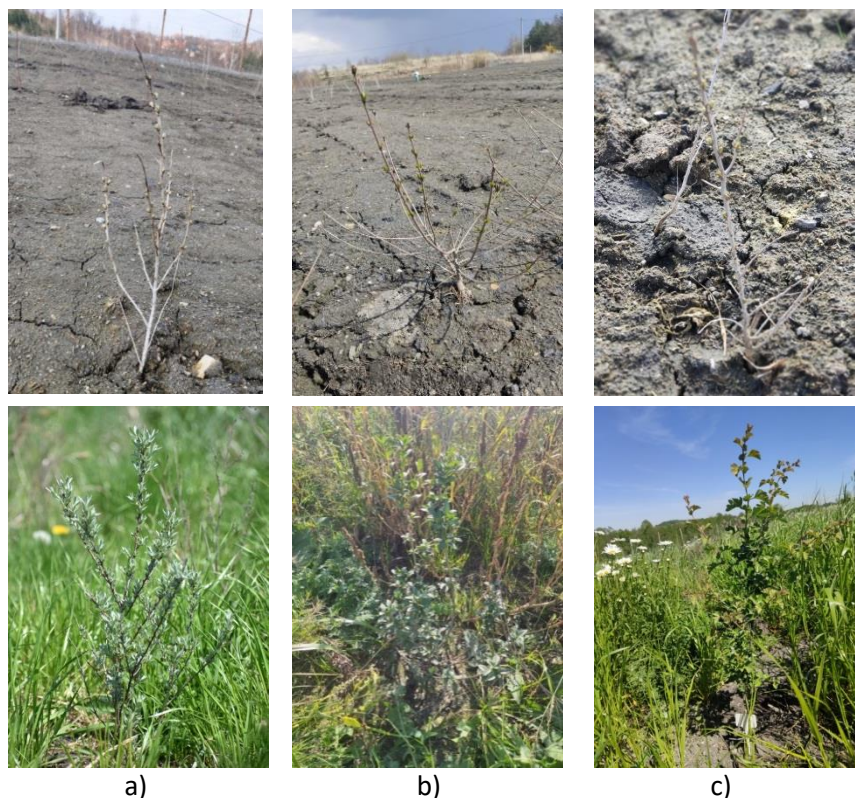
W niniejszej pracy obserwowano cechy wegetacji (wysokość) czterech gatunków zbiorowisk roślinnych oraz ich reakcję na właściwości substytutów glebowych. Dane zebrane w trakcie fitotestów z wykorzystaniem krzewiastych zbiorowisk roślinnych wykazały obiecującą możliwość wdrożenia testowanej pokrywy glebowej B2, jako biologicznej rekultywacji terenów dotkniętych przez działalność górniczą.

Największy wzrost roślin odnotowano dla *Ligustrum vulgare* od 16,0 do 48,4 cm w pokrywie dwuwarstwowej i od 15,7 do 50,7 cm w pokrywie wielowarstwowej. Widoczny wzrost w pokrywie wielowarstwowej gleby, wynoszący od 36,1 do 41,17 cm, zaobserwowano dla *Hippophae rhamnoides*. Średnia wysokość roślin gatunku *Crataegus monogyna* nie uległa zauważalnej zmianie i wynosiła 50,2 cm. Niestety zauważono, że *Cornus sanguinea* nie przystosował się do sztucznych warunków glebowych (brak udatności nasadzeń w drugim roku wegetacji). Wyniki pomiarów wysokościowych zbiorowisk roślinnych przedstawiono na rysunku 21.



Rys. 21 Średnia wysokość roślinności krzewiastej po dwóch latach wegetacji z użyciem substytutu glebowego B2: a) pokrywa dwuwarstwowa, b) pokrywa wielowarstwowa

Wizualne wyniki obserwacji wzrostu roślinności krzewiastej w okresie od kwietnia 2021 do maja 2022 przedstawiono na rys. 22. Po dwóch latach wegetacji nie zauważono deformacji, ani zmiany koloru liści, jak również chlorozy czy nekrozy roślin, co świadczy o prawidłowym bilansie składników odżywczych pobieranych przez roślinny system korzeniowy.

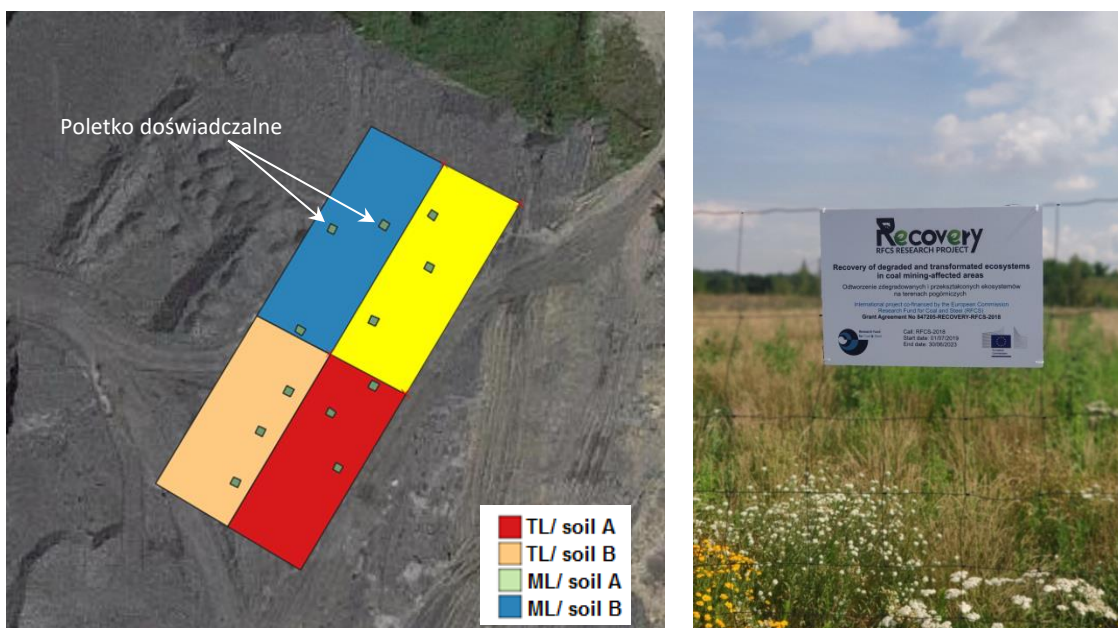


Rys. 22 Ocena wzrostu roślin krzewiastych na substytucji glebowym B2 w pierwszym i drugim roku od początku wegetacji: a) *Hippophae rhamnoides*, b) *Ligustrum vulgare*, c) *Crataegus monogyna*

7.2 Ocena wegetacji roślinności łąkowej

Do analizy wykształconej roślinności łąkowej wykorzystano standardowe metody badania zbiorowisk roślinnych. Obszar badań podzielono na cztery sekcje w oparciu o typy gleb (A3 i B2), ukształtowanie terenu oraz metodę pokrywy (dwuwarstwowa oraz wielowarstwowa). W każdej sekcji założono po 3 pododdziały (łącznie 12 pododdziałów – poletek badawczych) (rys. 23).

Szczegółowe wykazy gatunków roślin naczyniowych na poletkach badawczych o powierzchni 1 m² wykonano w czerwcu 2021 i czerwcu 2022 roku. Procentowe pokrycie każdego gatunku roślin oceniono przy użyciu następującej skali: 1%, 5%, 10%, 20%... 100%. Zarejestrowane gatunki roślin zaklasyfikowano do 4 typów zbiorowisk roślinnych: łąka sucha, łąka mezotroficzna (świeża), roślinność ruderalna i roślinność segetalna, ze względu na preferencje występowania w określonych siedliskach.



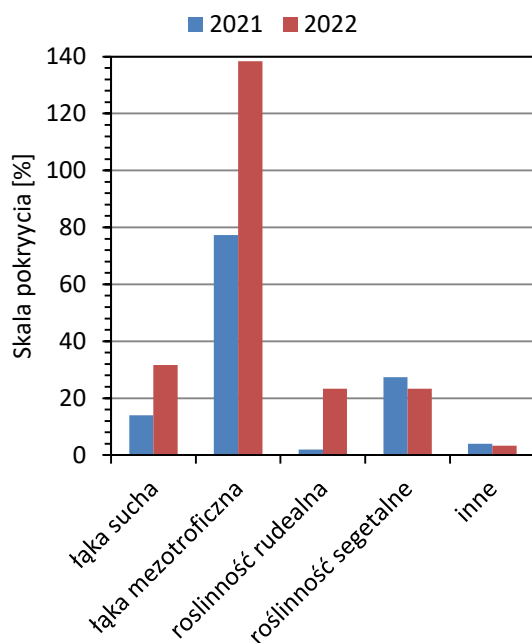
Rys. 23 Lokalizacja poletek doświadczalnych na obszarze badawczym OUOW ZG Janina: TL-pokrywa dwuwarstwowa, ML-pokrywa wielowarstwowa



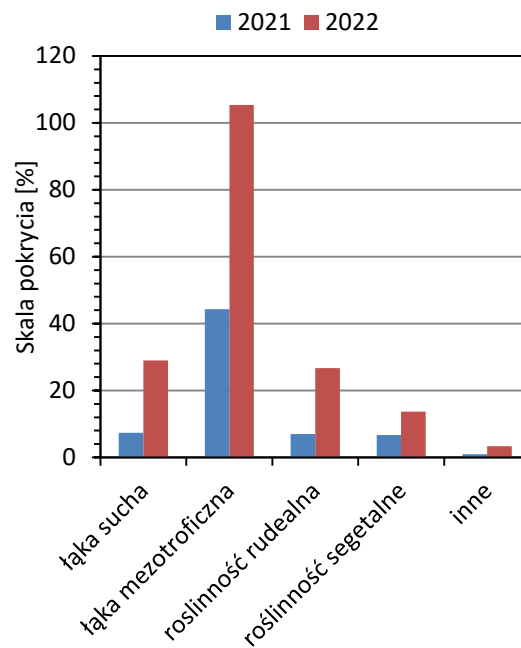
Rys. 24 Przykład poletka doświadczalnego na poligonie badawczym OUOW ZG Janina: a) 2021 rok, b) 2022 rok

Na każdym poletku badawczym zaobserwowano największe pokrycie gatunków charakterystycznych dla roślinności łąki mezotroficznej. Oba typy gleb (A3 i B2) na przekroju 2-warstwowym charakteryzowały się mniejszym pokryciem lub gatunkami roślin łąki mezotroficznej, w porównaniu do przekroju wielowarstwowego (rys. 24 a,b).

Obecność gatunków charakterystycznych dla suchej roślinności łąkowej była najwyższa na dwuwarstwowym ukształtowaniu terenu, z typem gleby A3. Pokrycie gatunków o szerokiej amplitudzie ekologicznej (inne) oraz gatunków charakterystycznych dla roślinności ruderalnej i segetalnej jest typowe dla wczesnych etapów rozwoju zbiorowiska roślinnego. Gatunki te mogą głównie rozprzestrzeniać się na duże odległości i szybko pokrywać tereny otwarte, a ich obecność zmniejszać się w późniejszych etapach sukcesji roślin.

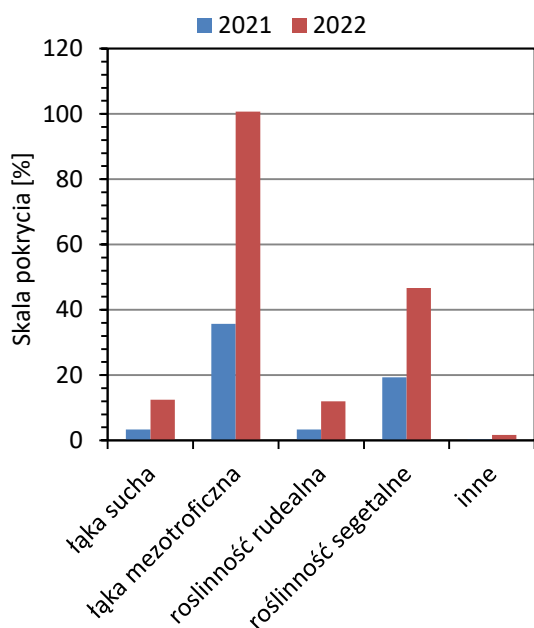


a)

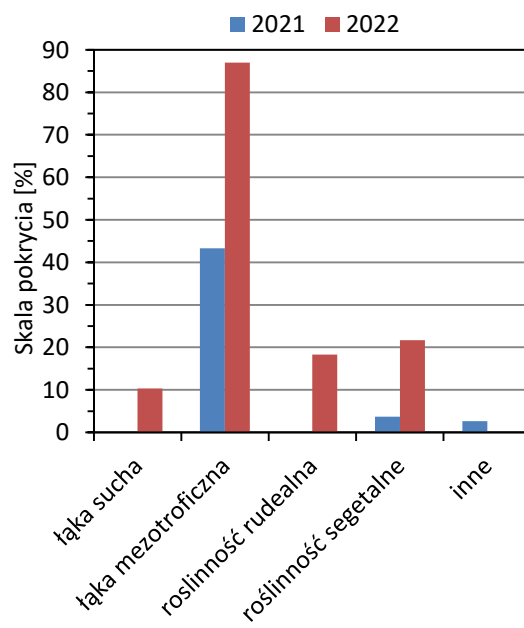


b)

Rys. 25 Skala pokrycia w zależności od siedlisk gatunkowych dla wielowarstwowej pokrywy w roku 2021 i 2022 a) substytut glebowy A3, b) substytut glebowy B2



a)



b)

Rys. 26 Skala pokrycia w zależności od siedlisk gatunkowych dla dwuwarstwowej pokrywy w roku 2021 i 2022 a) substytut glebowy A, b) substytut glebowy B

Obecność wielu gatunków roślin kwitnących posiada wysoką wartość estetyczną, co przedstawiono na rysunku 27. Roślinność łąkowa stała się także siedliskiem zróżnicowanych gatunków owadów (rys. 28).

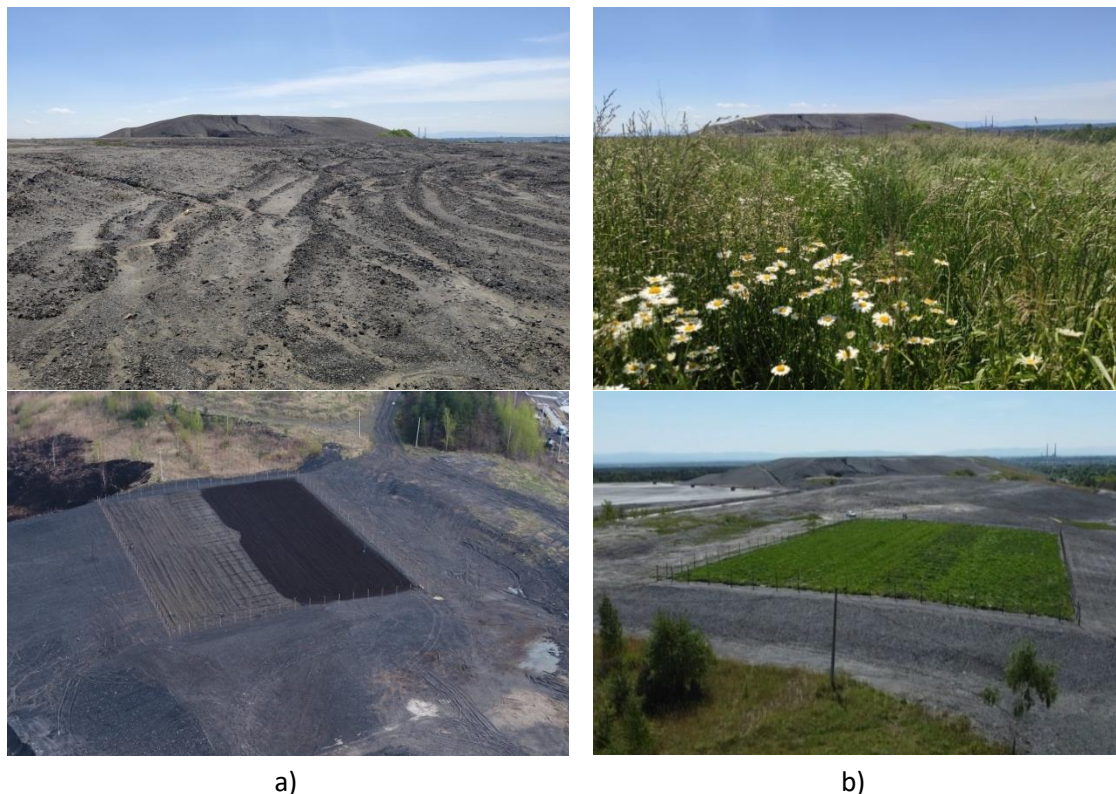


Rys. 27 Rozwój roślinności łąkowej z wykorzystaniem pokrywy substitutów glebowych: (a) łąka mezotroficzna na glebie B2, (b) łąka sucha na glebie A3



Rys. 28 Gatunki owadów zaobserwowane na zrehabilitowanym obszarze OUOW ZG Janina

Pokryty gęstą roślinnością poligon badawczy pozytywnie oddziałuje na lokalny krajobraz (rys. 29).



Rys. 29 Rozwój roślinności łąkowej na obszarze OUOW ZG Janina z wykorzystaniem substytutów glebowych (a) poligon badawczy przed rekultywacją (b) poligon badawczy po 18 miesiącach rekultywacji

7.3 Ocena fizykochemiczna substytutów glebowych

W okresie od kwietnia do sierpnia 2022 roku przeprowadzono pomiary głębokości zalegania zwierciadła wód gruntowych w sześciu piezometrach: TL-1, TL-2 i TL-3 dla pokrywy dwuwarstwowej oraz ML-1, ML-2 i ML-3 dla pokrywy wielowarstwowej. Lokalizację piezometrów na poligonie badawczym przedstawiono na rysunku 30. Średnie głębokości zalegania zwierciadła wody gruntowej poniżej terenu (p.t.) zestawiono w tabeli 13.

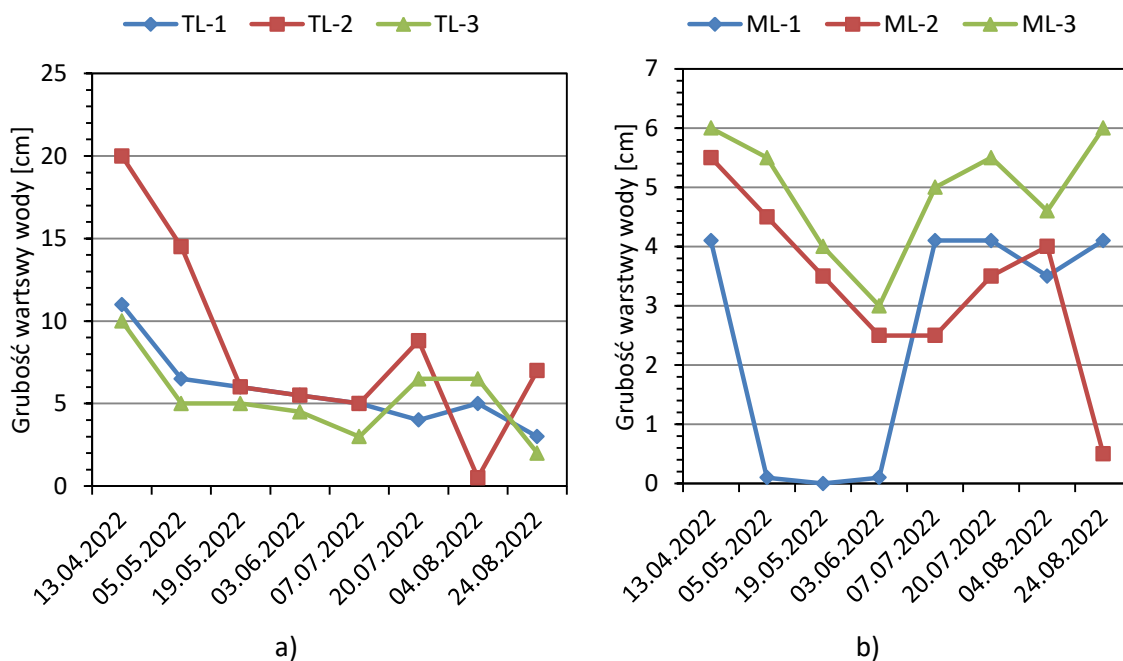


Rys. 30 Lokalizacja piezometrów na poligonie badawczym OUOW ZG Janina

Tabela 13 Charakterystyka piezometrów na poligonie badawczym OUOW ZG Janina

Oznaczenie piezometru	Warstwa pokrywy	Substytut gleby	Głębokość zwierciadła wód gruntowych p.t. [cm]
TL-1	dwuwarstwowa	A3	32,3
TL-2		B2	45,2
TL-3		D1	39,7
ML-1	wielowarstwowa	A3	28,6
ML-2		B2	28,2
ML-3		D1	26,9

Wyniki badań wskazały, że poziom zwierciadła wód gruntowych na obszarze z pokrywą dwuwarstwową jest głębszy niż na terenie z pokrywą wielowarstwową (rys. 31).



Rys. 31 Pomiary wysokości zwierciadła wody gruntowej odczytane z piezometrów a) pokrywa dwuwarstwowa, b) pokrywa wielowarstwowa

Średnia grubość warstwy wód gruntowych w piezometrach TL-1, TL-2 i TL-3 wynosiła odpowiednio 5,7, 9,8 i 5,3 cm. Średnia grubość warstwy wód gruntowych w piezometrach zlokalizowanych w pokrywie wielowarstwowej wynosiła 2,6, 3,1 i 4,8 cm odpowiednio dla ML-1, ML-2 i ML-3.

Parametry fizykochemiczne badanych pokryw glebowych w trakcie wegetacji przedstawiono w tabeli 14. Analizę przeprowadzono w trzech powtórzeniach.

Tabela 14 Analiza fizykochemiczna pokrywy glebowej na poligonie badawczym OUOW ZG Janina

Parametr	Pokrywa glebowa								
	A3			B2			D1		
DM, %	96,90	96,98	97,27	97,21	96,63	96,71	96,57	96,34	96,63
OM, %	24,44	24,66	21,51	23,82	27,48	24,73	28,26	27,86	27,00
Ca, %	3,62	3,71	3,85	4,32	3,42	3,58	3,26	3,52	3,29
K, %	1,81	1,81	1,83	1,73	1,73	1,73	1,69	1,69	1,68
Mg, %	0,62	0,63	0,7	0,62	0,59	0,63	0,60	0,59	0,60
Na, %	0,15	0,16	0,16	0,13	0,14	0,13	0,11	0,14	0,13
N _t , %	0,60	0,49	0,53	0,45	0,45	0,48	0,49	0,46	0,47
P _t , %	0,17	0,14	0,16	0,14	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15
S _t , %	2,62	2,41	2,20	2,15	1,78	2,08	1,89	2,03	2,32
pH	7,5	7,7	7,8	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,6
EC, mS·cm ⁻¹	3,39	2,66	2,71	2,52	2,65	2,64	2,01	2,57	2,56

Uzyskane wyniki wskazały, że zawartość głównych makroskładników w substytutach glebowych A3, B2 i D1 pozwoliła osiągnąć dobre wyniki wegetacji zbiorowisk roślinnych i zmieniała się w kolejności $Ca > K > Mg > Na > N > P > S$. Makroelementy odgrywają zasadniczą rolę w metabolizmie roślin, poprzez zwiększanie wzrostu i plonu oraz ochronę roślin przed stresem i chorobami, a ich niedobór lub nadmiar może ograniczać wzrost roślin (McCauley et al., 2011). Zawartość materii organicznej (OM) mieściła się w zakresie 25,51-28,26 %, a największą ilość OM zaobserwowano dla gleby D1. Ponadto gleba D1 charakteryzowała się niższą koncentracją potasu (1,69-1,68 %) w porównaniu do gleb A3 i B2 (1,73-1,83 %). Poziom wapnia był również najniższy w glebie D1 (3,29-3,52 %), choć różnice te mogą wynikać z błędów pomiarów laboratoryjnych.

Zasadne jest stwierdzenie, że po 18 miesiącach od rozpoczęcia wegetacji pokrywa glebowa charakteryzowała się neutralnym odczynem (7,6-7,8) i niższym przewodnictwem elektrycznym ($2,01-3,39 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$) w porównaniu z wynikami uzyskanymi w warunkach laboratoryjnych (etap III), tj.: pH 8,2 (A3), 8,3 (B2) i 8,6 (D1) oraz EC: $6,63 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ (A3), $5,98 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ (B2) do $5,80 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ (patrz tab. 5). Po tym czasie, stężenie siarki zmniejszyło się (średnio) z 3,49 do 2,16 %. Dwukrotne zmniejszenie stężenia zaobserwowano również w przypadku wapnia z 6,36 do 3,69 % i magnezu z 1,14 do 0,62 %.

8 Podsumowanie i wnioski

Podstawowym celem badań było opracowanie i przetestowanie nowatorskiego podejścia do wykorzystania ubocznych produktów powstających w kopalniach węgla kamiennego i elektrowniach węglowych, jako komponentów do wykonania substytutów gleb.

W badaniach uwzględniono następujące produkty: popioły lotne ze spalania węgla i biomasy, kruszywo z przeróbki odpadów kopalnianych, materiał uszczelniający (z zakładu mechanicznej przeróbki węgla) oraz żużel energetyczny. Dodatkowo przebadano osady ściekowe oraz zużyty kompost pieczarkowy, które włączono do badań wegetacyjnych w fazie laboratoryjnej, jako substraty wzbogacające mieszanki substytutów glebowych w materię organiczną.

W warunkach laboratoryjnych przeprowadzono test fitotoksyczności z wykorzystaniem nasion gorczycy białej (*Sinapis alba*), który wykazał dobre wyniki kiełkowania dla trzech substytutów gleby nie zawierających popiołu lotnego ze spalania biomasy. Należy podkreślić, że niektóre produkty uboczne spalania węgla zwiększają zasolenie, co może utrudniać kiełkowanie roślin. Test fitotoksyczności z wykorzystaniem *Sinapis alba* jest skuteczną metodą weryfikacji toksyczności gleby wpływającą na rozwój roślinności. Z drugiej strony, test z wykorzystaniem gatunków łąkowych jest potrzebny do wyboru najbardziej odpowiednich podłoży glebowych dla rozwoju zróżnicowanej roślinności. Podczas doboru składu nasion niezbędna jest znajomość lokalnych zbiorowisk roślinnych. Należy brać pod uwagę tylko rodzime i odporne gatunki roślin, które tworzą wartościowe i zróżnicowane zbiorowiska.

Wyniki badań wykazały, że ilości materii organicznej i składników pokarmowych (N, P, K, Ca, Mg) w substytutach glebowych były wystarczające do podtrzymania wzrostu roślin. Ponadto stężenia pierwiastków śladowych (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb i Zn) w substytutach glebowych nie przekraczały dopuszczalnych limitów dla gleb zaliczanych do terenów zadrzewionych, zakrzewionych i zielonych. Podczas opracowywania substratów glebowych należało zidentyfikować zakres substancji mogących powodować zagrożenie dla środowiska i sprawdzić je pod kątem lokalnych uwarunkowań prawnych, aby produkty końcowe były przyjazne dla środowiska i mogły być wykorzystane w procesach rekultywacyjnych.

Na podstawie danych zebranych w trakcie fitotestów na poligonie doświadczalnym ZG Janina w Libiążu, uzyskano wyniki wskazujące na obiecujące możliwości zastosowania badanych pokryw glebowych na kwaśnych i silnie zdegradowanych składowiskach odpadów pogórnich. Przeprowadzone badania wykazały, że wykorzystanie materiałów odpadowych do tworzenia substytutów zapewnia możliwości rozwoju zbiorowisk o wysokim stopniu naturalności. Pokryty gęstą roślinnością poligon doświadczalny, z różnymi gatunkami roślin kwitnących, posiada wysokie walory estetyczne i dostarcza siedlisk dla różnorodnych gatunków pożytecznych owadów.

W trakcie badań, testowano dwie metody rekultywacji OUOW tj.: technologię 2-warstwową i technologię wielowarstwową. Wykazano, że koszty materiałów/komponentów zastosowanych w technologii 2-warstwowej (warstwa substytutu gruntu oraz warstwa mieszaniny substytutu gruntu i odpadów kopalnianych 1:1) są 3,5-krotnie niższe od kosztów materiałów zastosowanych w technologii wielowarstwowej (substytut gruntu, kruszywo, materiał uszczelniający, geowłóknina). Nie stwierdzono różnic w kondycji i zagęszczeniu roślin rosnących na dwóch częściach poligonu, które różniły się zastosowaną technologią rekultywacji.

Pólnaturalna roślinność łąkowa rosnąca na poligonie doświadczalnym jest ekosystemem posiadającym zdolność do świadczenia usług ekosystemowych, takich jak wzrost bioróżnorodności, zioła do tradycyjnego użytku leczniczego, obieg składników odżywczych, retencja składników odżywczych i wody, produkcja biomasy, ograniczenie erozji, rekreacja i regulacja klimatu. Eksperyment polowy miał kluczowe znaczenie dla weryfikacji w warunkach naturalnych zarówno opracowanego podłoża glebowego, jak i składu gatunkowego właściwego dla warunków OUOW.

Dane z przeprowadzonych badań wykazały, że wykorzystanie materiałów odpadowych do opracowania substytutów glebowych, przyjaznych środowisku i odpowiednich dla półnaturalnych zbiorowisk łąkowych, jest możliwe. Konieczne są dalsze badania w celu oceny długoterminowego rozwoju półnaturalnych zbiorowisk łąkowych na tego typu rekultywowanych terenach dotkniętych działalnością kopalni węgla kamiennego. Zwałowiska odpadów górniczych wydają się oferować odpowiednie miejsca do rozwoju tych półnaturalnych zbiorowisk.

Wyniki badań, w zakresie zagospodarowania ubocznych produktów działalności wydobywczej i produkcji energii z węgla, mogą być wykorzystane przy opracowywaniu innowacyjnych, przyjaznych środowisku metod rekultywacji terenów po kopalniach węgla kamiennego.

W odniesieniu do badań laboratoryjnych, wysunięto następujące wnioski główne:

- Przed przystąpieniem do opracowania mieszanek substytutów glebowych należy koniecznie zbadać lokalny rynek dostawców produktów ubocznych ze spalania węgla, kopalni węgla oraz materiału bogatego w materię organiczną.
- Pierwszy etap badań laboratoryjnych komponentów można ograniczyć do badania ekstraktów wodnych, przygotowanych dla odpadów zgodnie z normą PN-EN 12457-4:2006.
- Do dalszych badań i analiz powinny być zakwalifikowane odpady o możliwie najniższym pH i najniższej przewodności elektrycznej. Warunek ten spełniają najczęściej żużle z elektrowni, które podczas wytwarzania mają kontakt z wodami procesowymi.

- Przy sporządzaniu mieszanek substytutów glebowych kluczowe jest ograniczenie liczby składników zapewniające:
 - ✓ właściwą strukturę gleby - składniki budujące szkielet (żuźle energetyczne, kruszywo drobne),
 - ✓ zatrzymywanie wody - składniki drobnofrakcyjne tj.: wapno dekarbonizacyjne i materiał uszczelniający (z zakładów przeróbki węgla),
 - ✓ poprawa struktury gleby - składniki organiczne bogate w węgiel (kompost ze zużytych grzybów).
- Stosowanie osadów ściekowych, ze względu na ich mazistą konsystencję i dużą zawartość azotu, nie jest wymagane, a nawet może być niewskazane. Nieproporcjonalnie duży udział tych osadów w mieszaninie utrudnia homogenizację gleby i może powodować nadmierny rozrost biomasy roślinnej.
- W składzie substytutów glebowych należy również unikać popiołów lotnych ze spalania węgla i biomasy. Składniki te wpływają na wzrost pH i zasolenie mieszaniny substytutu glebowego, co wpływa na wystąpienie niekorzystnych warunków wzrostu roślin.

W odniesieniu do fazy budowy poligonu badawczego, jak również przy wprowadzeniu roślin, główne wnioski były następujące:

- Wykonanie warstwy rekultywacyjnej w technologii 2-warstwowej jest łatwiejsze logistycznie i znacznie mniej kosztowne, ale wymaga bardzo precyzyjnej homogenizacji (wymieszania) substytutu gleby z odpadami kopalnianymi w stosunku 1:1.
- Na terenach położonych w strefie klimatu umiarkowanego, przejściowego (chłodna zima, ciepłe lato) poligon i wysiew roślin należy planować późną jesienią, unikając negatywnego wpływu ekstremalnych-letnich zjawisk pogodowych (susza, obfite opady) na teren rekultywowany z kiełkującą młodą roślinnością.
- Zabiegi agrotechniczne powinny być wykonywane prostopadle do zbocza w celu ograniczenia erozji.
- W przypadku sadzenia krzewów konieczne jest zastosowanie ogrodzenia chroniącego przed zgryzaniem młodych sadzonek przez zwierzęta.
- Wokół posadzonych młodych krzewów należy rozłożyć agrowłókninę, aby oddzielić je od zbyt ekspansywnych roślin zielnych.

- Zbiorowiska łąkowe w pierwszych latach wegetacji powinny być koszone raz w roku - jesienią, przed okresem wysiewu roślin niepożądanych. Po pierwszym i drugim koszeniu biomasę można pozostawić na rekultywowanym terenie w celu ograniczenia erozji wodnej.
- Badania botaniczne nie wykazały istotnej różnicy w kondycji roślinności wprowadzonej na poligonie zbudowanym w technologii 2-warstwowej (technologia tańsza) i wielowarstwowej (technologia droższa). Zatem metoda 2-warstwowa może być z powodzeniem zastosowana do rekultywacji OUOW, jako metoda tańsza i równie skuteczna.
- Technologia wielowarstwowa zalecana jest na tej części zwałowiska, gdzie zachodzi intensywny proces infiltracji wód opadowych, a ryzyko pojawienia się kwaśnego drenażu jest duże (np. płaska wierzchovina zwałowiska).

9 Skróty

GIG – Główny Instytut Górnictwa

OUOW – Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Pogórnicznych

EC – Przewodność elektryczna (*electrical conductivity*)

DM- sucha masa (*dry matter*)

OM-materia organiczna (*organic matter*)

CFA–popiół lotny ze spalania węgla (*coal fly ash*)

BFA–popiół lotny ze spalania biomasy (*biomass fly ash*)

DL– wapno dekarbonizowane (*decarbonisation lime*)

AG–kruszywo (*aggregate*)

SL–materiał uszczelniający (*sealing material*)

ES–żużel energetyczny (*energetic slags*)

SWS–osady ściekowe (*sewage sludge*)

CM–zużyte podłoże pieczarkowe (*mushroom compost*)

MVC- pokrywa wegetacyjna (*meadow vegetation cover*)

Mes_Mea- gatunki łąki mezotroficznej (*mesic meadow species*)

Dry_Mea- - gatunki łąki suchej (*dry meadow species*)

ML- pokrywa wielowarstwowa (*multi-layer cover*)

TW- pokrywa dwuwarstwowa (*two-layer cover*)

Literatura

- Asik, B.B., Turan, M.A., Celik, H., Katkat, A.V., 2009. Effects of Humic Substances on Plant Growth and Mineral Nutrients Uptake of Wheat (*Triticum durum* cv. Salihli) Under Conditions of Salinity. *Asian J. Crop Sci.* 1, 87–95. doi:10.3923/ajcs.2009.87.95
- Boroń, M., Ociepińska, M., Żeber-Dzikowska, I., Gworek, B., Kondzielski, I., Chmielewski, J., 2019. Xerothermic pavements – a meadow biodiversity richness. Jaworzno case study. *Environ. Prot. Nat. Resour.* 30, 29–34. doi:10.2478/oszn-2019-0014
- Bruce, R., Rayment, G., 1982. Analytical methods and interpretations used by the Agricultural Chemistry Branch for Soil and Land Use Surveys. Bulletin QB82004. Queensland Department of Primary Industries., Brisbane.
- Çelik, H., Katkat, A.V., Aşık, B.B., Turan, M.A., 2010. Effects of humus on growth and nutrient uptake of maize under saline and calcareous soil conditions. *Žemdirbystė=Agriculture* 97, 15–22.
- George, E., Horst, W.J., Neumann, E., 2011. Adaptation of Plants to Adverse Chemical Soil Conditions, Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition. Chapter 17. Elsevier Ltd. doi:10.1016/B978-0-12-384905-2.00017-0
- Grzebisz, W., Gransee, A., Szczepaniak, W., Diatta, J., 2013. The effects of potassium fertilization on water-use efficiency in crop plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 176, 355–374. doi:10.1002/jpln.201200287
- Guo, W., Nazim, H., Liang, Z., Yang, D., 2016. Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. *Crop J.* 4, 83–91. doi:10.1016/j.cj.2015.11.003
- Hazelton, P., Murphy, B., 2016. Interpreting soil test results. What do all the numbers mean? 3 rd Edition. CSIRO Publishing. doi:10.1111/sum.12402
- Heaton, E., Voigt, T., Long, S.P., 2004. A quantitative review comparing the yields of two candidate C4 perennial biomass crops in relation to nitrogen, temperature and water. *Biomass and Bioenergy* 27, 21–30. doi:10.1016/j.biombioe.2003.10.005
- Hermans, C., Verbruggen, N., 2005. Physiological characterization of Mg deficiency in *Arabidopsis thaliana*. *J. Exp. Bot.* 56, 2153–2161. doi:10.1093/jxb/eri215
- John, H., Dullau, S., Baasch, A., Tischew, S., 2016. Re-introduction of target species into degraded lowland hay meadows: How to manage the crucial first year? *Ecol. Eng.* 86, 223–230. doi:10.1016/j.ecoleng.2015.11.001

- Kang, J., Hesterberg, D., Osmond, D.L., 2009. Soil Organic Matter Effects on Phosphorus Sorption: A Path Analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73, 360–366. doi:10.2136/sssaj2008.0113
- Krull, E.S., Skjemstad, J.O., Baldock, J. a, 2009. Functions of Soil Organic Matter and the Effect on Soil Properties. GRDC Final Rep. CSO 00029 Residue Manag. *Soil Org. Carbon Crop Perform.* 1–128.
- Lee, M.S., Wycislo, A., Guo, J., Lee, D.K., Voigt, T., 2017. Nitrogen fertilization effects on biomass production and yield components of miscanthus × giganteus. *Front. Plant Sci.* 8, 1–9. doi:10.3389/fpls.2017.00544
- Malhotra, H., Sharma, S., Pandey, R., 2018. Phosphorus Nutrition: Plant Growth in Response to Deficiency and Excess, in: *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*. Chapter 7. pp. 1–590. doi:10.1007/978-981-10-9044-8
- McCauley, A., Jones, C., Jacobsen, J., 2011. Plant Nutrient Functions and Deficiency and Toxicity Symptoms. *Nutr. Manag. Modul.* 9, 1–16.
- Miller, R., Donahue, R., 1995. *Soils in our Environment: An Introduction to Soils and Plant Growth*. 7th Revised edition. Prentice-Hall.
- Neitzke, M., 2002. Changes in energy fixation and efficiency of energy capture in above-ground biomass along an environmental gradient in calcareous grasslands. *Flora* 197, 103–117. doi:10.1078/0367-2530-00020
- Shen, Q., Wen, Z., Dong, Y., Li, H., Miao, Y., Shen, J., 2018. The responses of root morphology and phosphorus-mobilizing exudations in wheat to increasing shoot phosphorus concentration. *AoB Plants* 10, 1–11. doi:10.1093/aobpla/ply054
- Tokarczyk, N., 2017. Forest encroachment on temperate mountain meadows - Scale, drivers, and current research directions. *Geogr. Pol.* 90, 463–480. doi:10.7163/GPol.0112
- van Dobben, H.F., Wamelink, G.W.W., Slim, P.A., Kamiński, J., Piórkowski, H., 2017. Species-rich grassland can persist under nitrogen-rich but phosphorus-limited conditions. *Plant Soil* 411, 451–466. doi:10.1007/s11104-016-3021-z
- Venterink, H.O., Güsewell, S., 2010. Competitive interactions between two meadow grasses under nitrogen and phosphorus limitation. *Funct. Ecol.* 24, 877–886. doi:10.1111/j.1365-2435.2010.01692.x
- Weigelt, A., Bol, R., Bardgett, R.D., 2005. Preferential uptake of soil nitrogen forms by grassland plant species. *Oecologia* 142, 627–635. doi:10.1007/s00442-004-1765-2
- Wissuwa, M., Gamat, G., Ismail, A.M., 2005. Is root growth under phosphorus

deficiency affected by source or sink limitations? J. Exp. Bot. 56, 1943–1950.
doi:10.1093/jxb/eri189