

KRZYSZTOF KLIMONT <sup>1</sup>  
AGNIESZKA OSIŃSKA <sup>1</sup>  
GRZEGORZ GRYZIAK <sup>1</sup>  
ZBIGNIEW KOŁTOWSKI <sup>2</sup>  
WŁODZIMIERZ MAJTKOWSKI <sup>3</sup>  
SZYMON SUCHECKI <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin — PIB w Radzikowie, Krajowe Centrum Roślinnych Zasobów Genowych

<sup>2</sup> Instytut Ogrodnictwa — Zakład Pszczelnictwa w Puławach

<sup>3</sup> Instytut Hodowli Aklimatyzacji Roślin — PIB w Radzikowie, Krajowe Centrum Roślinnych Zasobów Genowych, Ogród Botaniczny w Bydgoszczy

<sup>4</sup> Małopolska Hodowla Roślin, Zakład Hodowlano — Produkcyjny w Palikijach

## Możliwość wykorzystania wierzby (*Salix* sp.) do rekultywacji bezglebowych gruntów wapna poflotacyjnego pokrywającego powierzchnię po eksploatacji siarki metodą podziemnego wytopu

**The possibility of using willow (*Salix* sp.) for the reclamation of soil-less land of post-flotation lime covering the surface of the post-exploitation area of bore-hole mining of sulfur deposit**

W latach 2012–2015 badano możliwość wykorzystania wybranych gatunków i mieszańców wierzby do rekultywacji biologicznej bezglebowych gruntów wapna poflotacyjnego pokrywającego tereny poeksploatacyjne Kopalni Siarki „Jeziórko” i użyźnione osadami ścieków komunalnych. Pokrycie terenów po otworowej eksploatacji siarki wapnem poflotacyjnym i użyźnienie osadem ścieków komunalnych stworzyło warunki do wegetacji roślin wierzby i rozwoju gleby. Testowane gatunki i mieszańce wierzby wykazały różnice w przeżywalności (udatności nasadzeń) oraz wysokości roślin, wskazując na możliwość ich wykorzystania do rekultywacji biologicznej tych terenów. Pod względem przeżywalności i bujności wzrostu najbardziej przydatnymi do nasadzeń na tym gruncie okazały się wierzba wiciowa, wierzba IBL-8 i wierzba trójpręcikowa. Wprowadzenie osadów ściekowych wraz z porastającymi wierzbami wpłynęło na intensywny wzrost zawartości węgla organicznego ( $C_{org}$ ) w gruncie wapna jak również przyswajalnego fosforu, a wzrost potasu i

magnezu był mniejszy. Stwierdzono zbyt wysoką zawartość wapnia, niewielkie przekroczenie zawartości potasu, zbyt niską magnezu w materiale roślinnym (pędy) pobranym z roślin wierzby. Zawartość wszystkich badanych metali ciężkich w gruncie doświadczalnym nie przekroczyła dopuszczalnych stężeń natomiast zawartość Fe, Mn, Cd i Zn w pędach wierzby przekroczyła dopuszczalne wartości progowe.

**Słowa kluczowe:** wapno poflotacyjne, rekultywacja, osady ściekowe, wierzba, metale ciężkie, tereny poeksploatacyjne siarki, udatność nasadzeń (przeżywalność roślin), proces glebotwórczy

In years 2012–2015 we studied the possibility of using selected species and hybrids of willow for biological reclamation of soilless lands of post-flotation lime covering the post-exploitation area of “Jeziórko” Sulfur Mine enriched with sewage sludge. Covering of sulfur bore-hole post-exploitation area with post-flotation lime and fertilization with sewage sludge created the conditions for willow vegetation and soil formation. Tested species and hybrids of willow showed differences in survival (rooting rate of plantings) and plant height, indicating the possibility for the use of some forms to biological reclamation of the area. In terms of survival and vigor of growth, osier willow IBL-8 and almond willow proved to be most suitable for planting on the land. Introduction to the reclamation of willows along with the brought sewage sludge influenced the rapid growth of organic carbon (TOC) in the lime soil, as well as assimilable phosphorus, but potassium and magnesium increase was smaller. We found too high content of calcium, slight exceeding of potassium content and too low magnesium in the plant material (shoots) collected from the willow plants. The contents of all of heavy metals in the experimental soil did not exceed acceptable levels, while the content of Fe, Mn, Cd and Zn in the shoots of willow exceeded the acceptable limit values.

**Key words:** post-flotation lime, reclamation, sewage sediments, willow, heavy metals, post-mining sulfur area, success rate plantings (survival of plants), soil formation

## WSTĘP

Grunty zdewastowane przez przemysł i gospodarkę komunalną wymagają koniecznie rekultywacji poprzez wznowienie procesów glebotwórczych, inicjację życia biologicznego w podłożu oraz odtworzenie szaty roślinnej (Góral, 2001; Levyk, Brzezińska, 2007; Klimont, 2004; Klimont, Bulińska-Radomska, 2011). Gatunki roślin przeznaczone do rekultywacji gruntów bezglebowych muszą spełniać szereg określonych warunków umożliwiających ich uprawę na gruntach zróżnicowanych pod względem wilgotności, odczynu, zasobności w składniki pokarmowe i materię organiczną oraz obecności substancji szkodliwych. Rekultywacja terenów poeksploatacyjnych siarki wydobywanej metodą otworową polega na neutralizacji ich zakwaszenia poprzez wapnowanie wapnem poflotacyjnych a potem wzbogacenie osadem ścieków komunalnych i wysadzenie określonych gatunków roślin (Siuta i in., 1996; Siuta, Jońca, 1997; Siuta, Żukowski, 2008; Siuta, 2001; Jońca, 2000; Gorlach, Gambuś, 1999). Zarębski (2014) mówi, że skażenie gleb siarką wymaga zastosowania do rekultywacji gruntu nadmiaru neutralizatora. Badania Siuty i in. (1996) pokazały, że kupkówka pospolita i lucerna są roślinami szczególnie polecanymi do rekultywacji biologicznej wapna poflotacyjnego. Z kolei prace Klimonta (2004, 2007), Klimonta i Bulińskiej-Radomskiej (2010) oraz Klimonta i in. (2002, 2013a, 2014, 2015) wykazały, że do rekultywacji tych gruntów przydatne są m.in. kostrzewa trzciniowa, topinambur, sylfia przerośnięta, wybrane gatunki roślin oleistych i miododajnych jak również gatunki i

mieszkańce wierzby (*Salix* sp.). Wierzby są jednocześnie cenionym pożytkiem pszczelim (Jabłoński, 1994; 2000) i pobierającym duże ilości pierwiastków biogennych (azotu i fosforu) znajdujących się w osadach ściekowych, co pozwoli na ich zagospodarowanie bez obawy zanieczyszczenia produktów żywnościowych (Kalembasa i in., 2003).

Celem prowadzonych badań było określenie możliwości wykorzystania wybranych gatunków i mieszańców wierzby (*Salix* sp.) do rekultywacji bezglebowych gruntów wapna poflotacyjnego pokrywającego powierzchnię po otworowej eksploatacji siarki, użyźnionego osadem ścieków komunalnych.

#### MATERIAŁ I METODY

Badania z gatunkami i mieszańcami wierzby (*Salix* sp.) prowadzono na terenach poeksploatacyjnych Kopalni Siarki „Jeziórko”, gdzie siarkę pozyskiwano metodą otworową, a celem likwidacji niskiego odczynu i wyrównania niecek osiadania gruntu obszary pokryto warstwą wapna poflotacyjnego. Zdeponowano je na powierzchni około 50ha, a jego miąższość wynosiła 1–6 m. W miejscu założenia doświadczenia grubość warstwy wapna była jednolita i wynosiła ok. 1,5 m. Wapno poflotacyjne będące odpadem w procesie otrzymywania siarki z rudy siarkowej z nieodległej odkrywkowej Kopalni Siarki „Machów” przemieszczano na tereny poeksploatacyjne za pomocą hydrotransportu. Według Gołdy (2007) wapno poflotacyjne to gliny średnie pylaste na granicy z glinami lekkimi pylastymi o pH 7,3, zawierające następujące frakcje: piasek (39%) pył (27%) oraz il (34%). Na wiosnę 2001 wapno poflotacyjne użyźniono powierzchniowo zagęszczonym i przefermentowanym (s.m. 29,1%) osadem ścieków komunalnych w dawce  $500 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , które wymieszano ciężką broną talerzową z gruntem na głębokość około 25 cm. Następnie zastosowano nawożenie mineralne w dawkach  $70 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ ,  $75 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1}$ , i  $100 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$ , które stosowano corocznie wiosną. Następnie na tak przygotowanym gruncie, również wiosną 2001, założono doświadczenie metodą bloków losowych w czterech powtórzeniach. Obiekt pojedynczy (powtórzenie) stanowił rząd nasadzeń gatunków i mieszańców wierzby. W pierwszej dekadzie kwietnia dokonano ręcznego nasadzenia zrzędów 11 gatunków i mieszańców wierzby (*Salix* sp.). Wysadzono je w rozstawie  $120 \times 100 \text{ cm}$ , liczba roślin w rzędzie wynosiła 16, a długość rzędu 17 m. Zastosowane w przedmiotowych badaniach formy wierzby opisuje Jabłoński (2000) w charakterystyce roślin zielnych i drzew do uprawy jako pożytki pszczele.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki 4-letnich badań przeprowadzonych w latach 2012–2015, w których oceniano procentowy udział przyjętych roślin w stosunku do posadzonych — udatność nasadzeń, wysokość roślin jak również ich glebotwórcze oddziaływanie wraz z osadami na bezglebowy wapienny grunt. Analizy chemiczne wykonano w akredytowanym laboratorium Okręgowej Stacji Chemiczno-Rolniczej w Kielcach (certyfikat Nr AB333 wydany przez Polskie Centrum Akredytacji). W próbkach podłoża oznaczono zawartość próchnicy metodą miareczkową (Tiurina) i przeliczono na węgiel organiczny ogółem ( $C_{\text{org}}$ ), wartość pH metodą potencjometryczną, zawartość P metodą spektrofotometryczną, zawartość K metodą spektrometrii płomieniowej i zawartość Mg metodą płomieniowej absorpcyjnej spektrometrii atomowej. W materiale

roślinnym oznaczano zawartość P metodą spektrofotometryczną, zawartość K metodą fotometrii płomieniowej oraz zawartość Mg i Ca metodą płomieniowej absorpcyjnej spektrometrii atomowej. Zawartość metali ciężkich Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn i As, tak w podłożu jak również w materiale roślinnym, oceniano metodą płomieniowej absorpcyjnej spektrometrii atomowej (FAAS), a Hg metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej z amalgamacją par rtęci. Wariant kontrolny stanowiło wapno bez użyczenia osadem ściekowym i bez nawozów mineralnych, nie porośnięte żadną roślinnością. Obliczeń statystycznych dokonano metodą analizy wariancji poprzez syntezę wyników z poszczególnych lat badań, a różnice między średnimi oceniano testem Tukeya przy  $NIR\alpha = 0,05$ .

## WYNIKI I DYSKUSJA

Warunki pogodowe w latach badań były zmienne i wpływały na przebieg wegetacji oraz wartości cech ocenianych gatunków (tab. 1).

Tabela 1

**Suma opadów miesięcznych oraz średnia miesięczna temperatura powietrza w latach 2012–2015**  
**Monthly rainfall and mean temperature in years 2012–2015**

Miesiąc Month	Lata Years							
	2012		2013		2014		2015	
	suma opadów rainfall (mm)	temperatura temperature (°C)	suma opadów rainfall (mm)	temperatura temperature (°C)	suma opadów rainfall (mm)	temperatura temperature (°C)	suma opadów rainfall (mm)	temperatura temperature (°C)
Styczeń — January	34,2	-1,8	48,1	-3,4	54,1	-1,9	25,2	0,8
Luty — February	11,3	-7,2	25,2	-0,8	12,3	1,7	7,7	0,9
Marzec — March	23,0	4,9	56,6	-1,5	37,2	6,9	41,1	5,1
Kwiecień — April	29,2	9,9	31,8	9,0	33,3	10,4	21,9	8,7
Maj — May	41,2	16,2	88,6	15,1	153,9	14,1	68,0	13,2
Czerwiec — June	76,5	17,9	111,2	18,3	57,0	16,5	38,5	17,0
Lipiec — July	53,6	21,2	33,4	19,5	74,1	20,5	99,8	20,2
Sierpień — August	38,8	19,1	14,9	19,5	87,2	17,9	5,6	22,3
Wrzesień — September	39,6	14,9	73,6	12,2	41,8	14,9	96,2	15,2
Październik — October	124,0	8,2	5,4	10,3	37,0	9,4	36,8	7,3
Listopad — November	21,7	5,4	73,7	5,3	6,5	5,0	39,2	4,9
Grudzień — December	24,0	-3,3	11,0	1,4	17,3	0,5	8,3	3,5
Roczna suma opadów i średnia roczna temperatura powietrza Annual amount of rainfall and average temperature	517,1	8,7	573,5	8,7	611,7	9,6	488,3	9,9

Pierwszy rok badań (2012) charakteryzował się niezbyt wysokimi opadami, szczególnie w miesiącach wiosennych oraz upalnym i suchym latem. W drugim roku badań (2013) odnotowano późną i początkowo chłodną wiosnę, co opóźniło wegetację roślin, oraz niedobory wilgoci w miesiącach letnich, które nie sprzyjały wzrostowi i rozwojowi roślin. Trzeci rok (2014) charakteryzował się ciepłą i obfitującą w opady wiosną, jak

również wilgotnym i ciepłym latem, co sprzyjało vegetacji roślin. Czwarły (2015), ostatni rok badań był mniej korzystny od poprzedniego pomimo względnie korzystnych warunków do vegetacji wiosną. W drugiej połowie lata wystąpiła długotrwała susza i upały, które nie sprzyjały wzrostowi i rozwojowi roślin. Wyniki analiz osadów ściekowych, zaprezentowane w tabeli 2, pokazują znaczną zawartość składników pokarmowych w suchej masie, w postaci azotu, fosforu i wapnia, oraz mniejszą magnezu (potasu nie oznaczono).

Tabela 2

**Skład chemiczny i sanitarny osadów ściekowych z Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Stalowej Woli**  
**Chemical composition and sanitary condition of sewage sludge from Stalowa Wola City treatment plant**

Składniki Components	Zawartość — Content	
	osady ściekowe <sup>1)</sup> — sewage sludge <sup>1)</sup>	
Sucha masa — Dry matter	29,1	
pH	7,1	
Zawartość s.m. — Content in dm (%)		
Azot ogólny (N)	3,400	
Azot amonowy (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	0,400	
Fosfor ogólny (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	1,690	
Wapń (CaO)	0,640	
Magnez (MgO)	0,160	
Substancja organiczna — Organic matter	72,580	
Zawartość s.m. — Content in dm (mg·kg <sup>-1</sup> )		
Cynk (Zn)	1257,730	
Ołów (Pb)	68,730	
Kadm (Cd)	< 6,870	
Miedź (Cu)	30,930	
Chrom ogólny (Cr)	< 20,620	
Nikiel (Ni)	68,730	
Rtęć (Hg)	0,060	
Badania bakteriologiczne i parazytologiczne — Bacteriological and parasitological tests		
Obecność Salmonelli — Presence of Salmonella	nie stwierdzono	
Liczba żyjących jaj <i>Ascaris</i> sp., <i>Toxocara</i> sp., <i>Trichuris</i> sp. Number of live eggs of <i>Ascaris</i> sp., <i>Toxocara</i> sp., <i>Trichuris</i> sp.	not detected 2	

<sup>1)</sup> Według opinii wydanej przez SANEPID w Tarnobrzegu (1995), przebadane partie osadów ściekowych pod względem chemicznym, bakteriologicznym i parazytologicznym są zgodne z obowiązującymi przepisami prawa i mogą być wykorzystywane rolniczo

<sup>1)</sup> According to the statement of SANEPID in Tarnobrzeg (1995), the sewage sludge tested for chemical compositions as well as bacteriologically and parasitologically were in agreement with the current standards and were allowed to be utilized in agriculture

Źródło: wyniki własne; Source: own study

Wprowadzając do podłoża dawkę 500 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> osadu ściekowego, wnosi się wraz z nim ok. 5,60 t azotu, 2,50 t fosforu, 0,95 t wapnia i 0,25 t magnezu, jak również ponad 61 t węgla organicznego (tab. 3). Prowadzone czteroletnie badania gatunków i mieszańców wierzby (*Salix* sp.) testowanych jako rośliny rekultywacyjne na terenach poeksploatacyjnych siarki, pokrytych wapnem poflotacyjnym i użyźnionym osadem ścieków komunalnych pokazały, że spośród badanych form najczęściej przetrwało w porównaniu do liczby posadzonych roślin wierzby wiciowej (84,2%) dalej wierzby IBL-3 (62,2%) (tab. 4). Mniej przetrwało osobników wierzby trójpręcikowej, IBL-8, wierzby Smitha i wawrzynkowej — odpowiednio 44,4, 42,3, 38,9 i 37,9%.

Tabela 3

**Ilość składników pokarmowych i C<sub>org</sub> wnoszona wraz z osadem ściekowym do bezglebowego gruntu wapna poflotacyjnego**

**Amounts of the nutrients and TOC brought in with sewage sludge into soilless postflotation lime ground**

Dawka osadu ściekowego Dose of sewage sludge (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	Ilość składników pokarmowych Amount of nutrients (t)					
	azot ogólny total nitrogen (N)	azot amonowy ammonium nitrogen (NH <sub>4</sub> )	fosfor ogólny total phosphorus (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	wapń calcium (CaO)	magnez magnesium (MgO)	C <sub>org</sub> (TOC)
500	4,990	0,580	2,458	0,950	0,250	61,256

Tabela 4

**Przydatność różnych gatunków i form wierzby (*Salix* sp.) do rekultywacji obszarów poeksploatacyjnych siarki wzbogacanych osadami ścieków komunalnych w dawce 500 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> (2012-2015)**

**Usability of various willow (*Salix* sp.) forms for reclamation of sulphur postexploitation terrains enriched with municipal sewage sludge at dose of 500 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> (2012-2015)**

Gatunek Species	Cechy — Traits							
	2012		2013		2014		2015	
	udatność nasadzeń root-taking (%)	wysokość roślin plant height (cm)	udatność nasadzeń root-taking (%)	wysokość roślin plant height (cm)	udatność nasadzeń root-taking (%)	wysokość roślin plant height (cm)	udatność nasadzeń root-taking (%)	wysokość roślin plant height (cm)
IBL-7 ( <i>Salix</i> × sp.)	23,8	401,3	23,8	419,3	23,8	442,3	23,8	453,0
Wierzba trójpręcikowa ( <i>Salix amygdalina</i> L.)	44,4	492,4	44,4	510,4	44,4	545,4	44,4	556,1
Wierzba wawrzynkowa ( <i>Salix daphnoides</i> Vill.)	43,7	529,9	39,2	566,3	39,2	575,2	37,9	580,0
IBL-3 ( <i>Salix</i> × sp.)	62,2	321,2	62,2	365,6	62,2	386,3	62,2	397,2
Wierzba sadłowicka ( <i>Salix</i> × <i>smithiana</i> var. <i>Kübleri</i> )	21,1	325,2	21,1	345,5	21,1	368,9	21,1	381,0
Wierzba Smitha ( <i>Salix</i> × <i>smithiana</i> Willd.)	40,9	343,4	40,9	358,4	40,9	375,5	38,9	385,2
IBL-8 ( <i>Salix</i> × <i>erdingeri</i> J. Kern.)	42,3	515,5	42,3	556,2	42,3	572,2	42,3	583,3
Wierzba laurowa ( <i>Salix pentandra</i> L.)	33,3	381,8	33,3	402,2	33,3	420,1	33,3	435,0
Wierzba Lipińskiego ( <i>Salix</i> × <i>erdingeri</i> J. Kern.)	18,9	512,2	18,9	555,2	18,9	570,3	18,9	581,1
Wierzba wiciowa ( <i>Salix viminalis</i> L.)	84,2	398,6	84,2	417,7	84,2	423,3	84,2	437,2
Wierzba ostrolistna ( <i>Salix acutifolia</i> Willd.)	13,3	310,3	13,3	332,3	13,3	358,8	13,3	369,2
NIR <sub>0,05</sub> — LSD <sub>0,05</sub>	8,4	41,2	8,4	41,2	8,4	41,2	8,4	41,2
Średnio — Mean	-	412,0	-	439,0	-	458,0	-	468,9
NIR <sub>0,05</sub> dla porównania w wierszach dla wysokości roślin = 18,4 LSD <sub>0,05</sub> for data in lines for height of plants = 18.4								

Zdecydowanie mniej wierzby IBL-7 (23,8%), wierzby sadłowskiej (21,1%) i wierzby Lipińskiego (18,9%) a najmniej wierzby ostrolistnej, której pozostało tylko 13,3%. Najbardziej bujnym wzrostem charakteryzowały się wierzba IBL-8 (583,3 cm), wierzba Lipińskiego (581,1 cm), wierzba wawrzynkowa (580,0cm) i wierzba trójpręcikowa (556,1 cm), co wskazywałoby, że wymienione formy najlepiej wykorzystują składniki pokarmowe zawarte w osadach ściekowych do wzrostu i rozwoju oraz dobrze znoszą zlewne i zaskorupiające się podłoże, a także długotrwałe okresy letniej suszy i upału. Z kolei najmniej bujny wzrost wykazały wierzba sadłowska i ostrolistna – odpowiednio 381,0 i 369,2 cm. Rozpatrując przydatność do rekultywacji biologicznej ocenianych form pod względem przeżywalności i bujności wzrostu najbardziej przydatna wydaje się wierzba wiciowa (*Salix viminalis* L.) — najwyższa ze wszystkich badanych form przeżywalność i bujny wzrost, a potem wierzba IBL-8 (*Salix × erdingeri* J. Kern.) i trójpręcikowa (*Salix amigdalina* L.). Warunki pogodowe w latach badań wyraźnie wpływały na wartość ocenianych cech, szczególnie widoczne było ograniczenie przyrostów pędów wierzby na skutek długotrwałej letniej suszy i upałów w 2015 roku (tab. 1, 4). Wcześniejsze wyniki badań prowadzonych przez autora wykazały, że bardzo dobrze na wapnie poflotacyjnych użyźnionym osadem ściekowym rozwija się wierzba wiciowa (*Salix viminalis* L.) (Klimont i in., 2002) a kolejne prace (Klimont, 2007; Klimont, Bulińska-Radomska, 2010; Klimont i in., 2013 a) pokazały istnienie wyraźnych różnic w wysokości i udatności nasadzeń testowanych form wierzby, wskazując wpływ warunków pogodowych na roczne przyrosty pędów w latach badań, szczególnie letnich okresów upałów i suszy powodujących zaskorupianie wapiennego podłoża. Wyniki badań Szczukowskiego i in. (1998) oraz Sicińskiego (2009) wykazały, że wierzby mogą być przydatne do rekultywacji biologicznej terenów zdewastowanych przez przemysł i gospodarkę komunalną. Badania Kalembasy i in. (2005) pokazały, że plon suchej masy pędów wierzby rośnie wraz ze wzrostem dawki azotu w osadach ściekowych, a testowane klony różniły się między sobą reakcją na nawożenie. Z kolei Kopeć i Gonddek (2002) donoszą, że nawożenie wierzby krzewiastej osadem ściekowym wpływa na zwiększenie ilości biomasy. Zamieranie i wypadanie roślin wierzby uprawianej na glebie organicznej Szczukowski i Tworowski (2000) tłumaczą samoregulacją ładu oraz wzrastającym zachwaszczeniem. Badania Majtkowskiego i in. (2010) oraz Kusia i in. (2008) wykazały, że do najważniejszych czynników wpływających na wzrost i rozwój wierzby, w tym wysokość, liczbę pędów i plon jest zawartość wody w podłożu. Także wyniki niniejszych badań wskazują, że woda jest czynnikiem decydującym o przeżyciu wierzby na wapiennym gruncie.

Osady ściekowe wprowadzone do bezglebowego gruntu wapna poflotacyjnego zainicjowały w nim życie biologiczne i procesy glebotwórcze w kierunku tworzenia zaczątków warstwy próchnicznej w jego wierzchniej części. Wprowadzenie osadów ściekowych do bezglebowego wapiennego gruntu wraz z porastającymi wierzabami wpłynęło bardzo korzystnie na zmianę składu chemicznego gruntu. Odnotowano zwiększenie zawartości węgla organicznego ( $C_{org}$ ) w warstwie organiczno-próchnicznej do  $33,4g \cdot kg^{-1}$  (kontrola  $5,7g \cdot kg^{-1}$ ) (tab. 5).

Tabela 5

**Zawartość składników pokarmowych i materii organicznej w złożu wapna poflotacyjnego wzbogaconego osadem ściekowym oraz w materiale roślinnym pobranym z tego podłoża (2012–2015)**  
**Contents of nutrients and organic matter in the post-flotation lime deposit, fertilized with municipal sewage sludge and in plant material (2012–2015)**

Gatunek rośliny Plants group	Dawka osadów ściekowych Dose of sludge (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	Poziom glebowy Soil level	Cechy — Traits				
			podłoże — substrate				
			pH w M KCl pH in M KCl	P (mg·kg <sup>-1</sup> )	K (mg·kg <sup>-1</sup> )	Mg (mg·kg <sup>-1</sup> )	C <sub>org</sub> TOC (g·kg <sup>-1</sup> )
Kontrola Control	0	OA C	7,3 7,4	6,2 5,6	14,9 10,9	7,2 6,0	5,7 3,0
Wierzby Willows	500	OA C	7,1 7,3	109,1 29,6	101,9 34,6	53,6 20,6	33,4 7,9
NIR $\alpha$ = 0,05			r.n.	16,2	14,5	8,2	10,3
LSD $\alpha$ = 0,05			n.s.				
Pędy — Shots							
			pH w M KCl pH in M KCl	P (g·kg <sup>-1</sup> )	K (g·kg <sup>-1</sup> )	Mg (g·kg <sup>-1</sup> )	Ca (g·kg <sup>-1</sup> )
Wierzby Willows (plant material)			-	3,4	20,7	2,2	20,4
Graniczna zawartość makroelementów w materiale roślinnym							
Limiting contents of macroelements in plant material				2,6-3,5	10-20	3,0-3,2	4,5-9

(Wiśniewska-Kielian, Lipiński, 2007) (g·kg<sup>-1</sup>)

r.n. — różnica nieistotna; n.s. - non significant differences

OA — warstwa organiczno-próchnicza; organic-humus layer

C — warstwa wapna; layer of lime

Potwierdzają to badania Martyna i in. (2001 a; 2001 b), które mówią, że osady ściekowe zastosowane na wapnie poflotacyjnym wywołują w nim dużą dynamikę procesów glebotwórczych i aktywność biologiczną. Średnia zawartość przyswajalnego fosforu w warstwie organiczno-próchnicznej wynosiła 109,1, potasu 101,9 i magnezu 53,6 mg·kg<sup>-1</sup>, podczas gdy zawartość tych składników w gruncie bezglebowym była istotnie niższa i wynosiła odpowiednio 6,2, 14,9 i 7,2 mg·kg<sup>-1</sup>. Zawartość przyswajalnego fosforu, potasu i magnezu w warstwie organiczno-próchnicznej gruntu była istotnie wyższa niż w gruncie wapna, co łączy się z istotnie większą zawartością węgla organicznego w warstwie próchnicznej. Osady ściekowe zastosowane do użyźnienia gruntu wapna poflotacyjnego wraz z porastającą roślinnością wpłynęło na nieznaczne ale zauważalne obniżenie odczynu w obydwu warstwach wapiennego gruntu. Podobny przyrost zawartości węgla organicznego (C<sub>org</sub>) oraz przyswajalnych składników pokarmowych w wapiennym gruncie użyźnionym osadem ścieków komunalnych odnotowano w przypadku zastosowania do rekultywacji biologicznej kostrzewy trzciniowej, topinamburu, wybranych roślin miododajnych i oleistych, ślazuwca pensylwańskiego i roznika przerośniętego (Klimont, 2007; Klimont i in., 2015; Klimont i in., 2014; Klimont i in., 2013 a). Odnotowano zbyt wysoką zawartość wapnia i niewielkie przekroczenie zawartości potasu w materiale roślinnym (pędy wierzby) w porównaniu do granicznych zawartości makroelementów w runi (Wiśniewska-Kielian, Lipiński, 2007), ale należy to



tłumaczyć tym, iż doświadczenie założono na gruncie wapiennym i nawieziono osadem ściekowym bogatym w potas. Zawartość fosforu była w normie a zawartość magnezu zbyt niska (tab. 5), ale wynika to być może z niskiej zawartości tego składnika w wapiennym gruncie (Gouda, 2007).

Zawartość wszystkich badanych metali ciężkich w gruncie doświadczalnym nie przekroczyła dopuszczalnych wartości, ale była istotnie wyższa niż w wariancie kontrolnym (tab. 6). Uzyskane wyniki korespondują z rezultatami uzyskanymi przez Majtkowskiego i Majtkowską (2012), Klimonta i in. (2013 b) oraz Bajora i in. (2014) w badaniach prowadzonych na składowisku popiołów paleniskowych i odpadów komunalnych, a także Klimonta i in. (2014; 2015) na wapnie poflotacyjnym oraz Grzywnowicz i Strutyński (2000) na glebie mineralnej. Zawartość metali ciężkich (Zn, Cd, Pb, Mn i Cu) w glebach z terenów rolniczych nie zanieczyszczonych przez przemysł nie przekracza dopuszczalnych stężeń tych pierwiastków na terenach południowej Polski, ale jest zróżnicowana i zależy od rodzaju gleby i jej odczynu, o czym mówi Poedniok i Kita (2005). Możliwość wykorzystania składników pokarmowych zawartych w osadach ściekowych do nawożenia wierzby, oraz tani sposób ich utylizacji zalicza Gostomezyk (2014) do zalet ich wykorzystania, a wysoka zawartość patogenów i szkodliwych organizmów oraz uwalnianie odorów zalicza do wad.

Chemiczna analiza materiału roślinnego wykazała prawie 3-krotne przekroczenie dopuszczalnych stężeń Cd ( $1,445 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  przy normie  $\leq 0,5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), prawie 2-krotne Fe ( $86,74 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  przy normie  $20\text{--}50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), prawie 6-krotne Mn ( $344,29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  przy normie  $20\text{--}60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) i 2,5-krotne Zn ( $242,07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  przy normie  $\leq 100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) (tab. 6). Wynika to przypuszczalnie z wysokiej (choć mieszczącej się w normie) koncentracji tych pierwiastków w podłożu, dotyczy to szczególnie Fe, Mn i Zn (tab. 6). Zawartość pozostałych metali ciężkich w pędach badanych form wierzby nie przekroczyła wartości stężeń w roślinach jako paszy dla zwierząt, ani też wartości krytycznych metali ciężkich przyjętych do oceny roślin pod względem przydatności paszowej. Podobne wyniki uzyskał Klimont i in. (2013) na składowisku odpadów komunalnych pokrytych popiołem i wzbogaconych osadem ściekowym, Bajor i in. (2014) na składowisku popiołów paleniskowych oraz Klimont i in. (2014; 2015) na zrekultywowanych terenach posiarkowych pokrytych wapnem użyźnionym osadem ściekowym, obsianym roślinami oleistymi i obsadzonym różnikiem przerośniętym. Także badania Majtkowskiego i Majtkowskiej (2012) wykazały zwiększoną zawartość kilku metali ciężkich w pędach drzew i krzewów zastosowanych do rekultywacji hałdy popiołów paleniskowych nawożonych osadami ściekowymi. Wyższą zawartość metali ciężkich odnotował Siuta (2004) w pędach roślin porastających podłoże lagun osadowych, a badania Gorlacha i Gambusia (1999) pokazały, że ilości metali ciężkich pobrane przez rośliny nie korelują z ich zawartością w osadach ściekowych. O tym, że wierzby kumulują metale ciężkie donosi Baran i in. (2001) oraz Zarębski (2014), z kolei Majkowski i Majtkowska (2012) do roli roślin przydatnych do fitoremediacji zanieczyszczonych podłoży typują: spartinę preriową, wydmuchrzycę wydłużoną i topinambur. Jony metali ciężkich nie ulegają biodegradacji, krążąc w środowisku kumulują się w tkankach organizmów żywych i szkodliwie oddziałują na ich stan zdrowia (Sadowska i in., 2000; Kabata-Pendias, Szteke, 2012).

Tabela 6

**Zawartość metali ciężkich w złożu wapna poflotacyjnego wzbogaconego osadem ścieków komunalnych oraz w materiale roślinnym (2012–2015)**  
**Contents of heavy metals in the post-flotation lime deposit enriched with municipal sludge and in plant material (2012–2015)**

Gatunek rośliny Plant group	Dawka osadów ściekowych Dose of sewage sludge (t·ha <sup>-1</sup> )	Poziom glebowy Soil level	Zawartość — Content (mg·kg <sup>-1</sup> )									
			Cd	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	As	Cr	Hg
			podłoże — substrate									
Kontrola Control	0	OA	0,120	9,54	2577,2	541,36	7,87	10,40	17,25	2,39	3,98	0,009
		C	0,100	8,52	2258,0	439,82	7,45	9,31	12,14	2,18	3,46	0,008
Wierzby Willows	250	OA	0,628	19,31	5009,2	653,81	15,71	11,57	123,96	2,73	8,12	0,138
		C	0,164	13,39	3756,2	539,57	15,22	7,53	50,23	2,02	3,26	0,083
	NIR <sub>α</sub> = 0,05 LSD <sub>α</sub> = 0,05		0,020	0,50	112,2	50,51	0,62	0,45	3,25	0,12	0,25	0,003
			Pędy — Shots									
Wierzby Willows (plant material)			1,445	8,64	86,74	344,29	10,544	1,307	242,07	0,050	0,603	0,013
Dopuszczalne zawartości w glebie oraz w ziemi <sup>1)</sup>			2	100	5700 *)	1500	100	100	300	10	150	2
Wartość dopuszczalnych stężeń w roślinach jako paszy dla zwierząt <sup>2)</sup>			–	–	20-50	20-60	–	–	–	1	3-12	0,03
Wartości krytyczne metali śladowych przyjęte do oceny roślin pod względem ich przydatności paszowej <sup>3)</sup>			≤0,5	25-50	–	–	≤50,0	≤10,0	≤100,0	–	–	–

\*) średnia zawartość w glebie piaszczystej; average content in sandy soil

<sup>1)</sup> zał. do rozp. Ministra Środowiska z dn. 01.09.2016r.; appendix to the of Ministry of Environment of 01.09.2016 (Dz.U. z 2016r., poz.1395)

<sup>2)</sup> Baran S., Turski R. Degradacja, ochrona i rekultywacja gleb. Wyd. AR Lublin 1996: 223 ss.

<sup>3)</sup> Kabata-Pendias A., Motowicka-Terelak T., Piotrowska M. Terelak H., Witek T. Ocena stopnia zanieczyszczenia gleb i roślin metalami ciężkimi i siarką. IUNG Puławy 1993: 20 ss.

## WNIOSKI

1. Osady ściekowe wprowadzone do gruntu wapna poflotacyjnego wpłynęły na prawie sześciokrotny wzrost zawartości węgla organicznego (C<sub>org</sub>) a także kilkunastokrotny przyswajalnych form fosforu, a przyrost potasu i magnezu był mniejszy.
2. Przeprowadzone analizy wykazały zbyt wysoką zawartość wapnia i potasu, zawartość fosforu była w normie, a magnezu zbyt niska w analizowanych pędach wierzby, co wiąże się z zawartością tych składników w gruncie i osadach ściekowych.
3. Zawartość wszystkich badanych metali ciężkich w gruncie doświadczalnym nie przekroczyła wartości dopuszczalnych stężeń, ale była wyższa niż w wariancie kontrolnym.

4. Analiza chemiczna wykazała wysoką koncentrację i przekroczenie dopuszczalnych wartości stężeń Cd, Fe, Mn i Zn w pędach wierzby (*Salix* sp.), dlatego wydaje się, że gatunek ten można zastosować do fitoremediacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi.
5. Pokrycie terenów po otworowej eksploatacji siarki wapnem poflotacyjnym i użyżnienie osadem ścieków komunalnych stworzyło warunki do wegetacji roślin wierzby i kształtowania właściwości fizyko-chemicznych gleby.
6. Wybrane formy wierzby (*Salix* sp.) wykazały wysoką przydatność i z powodzeniem mogą być zastosowane do rekultywacji biologicznej wapna poflotacyjnego użyżnionego osadem ściekowym na powierzchni po otworowej eksploatacji siarki.
7. Testowane gatunki i mieszańce wierzby wykazały różnice w przeżywalności (udatność nasadzeń) oraz wysokości roślin, wskazując na możliwość ich wykorzystania do rekultywacji biologicznej tych terenów.
8. Uwzględniając ocenę przeżywalności i bujności wzrostu najbardziej przydatnymi do nasadzeń na bezglebowym gruncie wapna poflotacyjnego okazały się wierzba wiciowa, wierzba IBL-8 i wierzba trójpręcikowa.

#### LITERATURA

- Bajor P., Bulińska-Radomska Z., Klimont K., Osińska A. 2014. Ocena rozwoju roślinności na składowisku popiołów paleniskowych użyżnionych osadem ściekowym. *Problemy Inżynierii Rolniczej* 2(84): 51 — 61.
- Baran S., Wójcikowska-Kapusta A., Jaworska B. 2001. Przydatność wikliny do sanitacji gleb zanieczyszczonych miedzią i ołowiem. *Zesz. Prob. Post. Nauk. Rol.* 477: 187 — 193.
- Gołda T. 2007. Roślinność zielna w ochronie i rekultywacji gruntów. *Inżynieria Ekologiczna* 19. PTIE Warszawa: 79 — 88.
- Gorlach E., Gambuś F. 1999. Wpływ osadów ściekowych na zawartość metali ciężkich w glebie i roślinach oraz ich przemieszczanie w profilu glebowym. *Zesz. Prob. Post. Nauk. Rol.* 467: 505 — 511.
- Gostomczyk W. 2014. Osady ściekowe alternatywą dla nawozów sztucznych w uprawie wierzby. *Zeszyty Naukowe Wydziału Nauk Ekonomicznych* 18. Politechnika Koszalińska. Koszalin: 35 — 46.
- Góral S. 2001. Roślinność zielna w ochronie i rekultywacji gruntów. *Inżynieria Ekologiczna* 3, PTIE Bydgoszcz, 161 — 178.
- Grzywnowicz I., Strutyński J. 2000. Rolnicze zagospodarowanie osadów ściekowych jako źródło zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi. *Zesz. Prob. Post. Nauk. Rol.* 472: 297 — 304.
- Jabłoński B. 1994. Ogródek Pszczelarski. Oddz. Pszczelnictwa ISiK Puławy: 5 — 53.
- Jabłoński B. 2000. Krótka charakterystyka roślin wybranych do uprawy pożytków pszczelich. W: O potrzebie i możliwościach poprawy pożytków pszczelich. Oddz. Pszczelnictwa ISiK Puławy: 24 — 71.
- Jońca M. 2000. Zastosowanie osadów ściekowych w rekultywacji gruntów. *Inżynieria Ekologiczna* 3. PTIE Bydgoszcz: 192 — 198.
- Kabata-Pendias A., Szteke B. 2012. Pierwiastki śladowe w geo- i biosferze. Puławy. IUNG-PIB: 270 ss.
- Kalembasa D., Szczukowski S., Cichuta R., Wysokiński A. 2005. Wpływ zróżnicowanych dawek azotu w osadzie ściekowym na plon biomasy i zawartość azotu w dwóch klonach wierzby krzewiastej. IX Konferencja Naukowa — Efektywne i Bezpieczne Technologie Produkcji Rolniczej. IUNG Puławy: 181 — 182.
- Kalembasa S., Szymanowicz B., Kalembasa D., Malinowska E. 2003. Możliwość pozyskiwania i przeróbki biomasy z roślin szybko rosnących (energetycznych). W: Nowe spojrzenie na osady ściekowe — odnawialne źródła energii. Wyd. Politechnika Częstochowska Cz. I: 358 — 364.

- Klimont K. 2004. Przydatność wybranych gatunków roślin użytkowych do rekultywacji terenów zdewastowanych. Zesz. Prob. Post. Nauk Rol. 497: 673 — 684.
- Klimont K., Bulińska-Radomska Z. 2011. Wpływ wybranych gatunków roślin na procesy glebotwórcze i ich przydatność do rekultywacji bezglebowych utworów wapna poflotacyjnego na powierzchni po otworowej eksploatacji siarki. Roczniki Gleboznawcze. Tom LXII (2) Warszawa: 204 — 211.
- Klimont K. 2007. Ocena przydatności wybranych gatunków roślin użytkowych do rekultywacji terenów zdewastowanych przez przemysł i gospodarkę komunalną. Problemy Inżynierii Rolniczej 2: 27 — 36.
- Klimont K., Bulińska-Radomska Z. 2010. Ocena przydatności wybranych gatunków roślin miododajnych oraz różnych form wierzby (*Salix* spp.) do rekultywacji terenów zdewastowanych przez przemysł siarkowy. Zesz. Prob. Post. Nauk Rol. 555: 517 — 528.
- Klimont K., Bulińska-Radomska Z., Górka J., Osińska A. 2015. Badanie przydatności roznika przerośniętego (*Silphium perfoliatum* L.) do rekultywacji terenów po otworowej eksploatacji siarki. Problemy Inżynierii Rolniczej 2(88): 61 — 73.
- Klimont K., Bulińska-Radomska Z., Górka J., Woś H. 2014. Ocena przydatności wybranych gatunków jarchy roślin oleistych do uprawy na rekultywowanym gruncie wapna poflotacyjnego. Biul. IHAR 274: 153 — 164.
- Klimont K., Bulińska-Radomska Z., Górka J. 2013a. Ocena przydatności różnych form wierzby (*Salix* sp.) do rekultywacji terenów poeksploatacyjnych kopalni siarki. Biul. IHAR 269: 161 — 168.
- Klimont K., Bulińska-Radomska Z. 2013. Możliwość wykorzystania ślazuwca pensylwańskiego (*Sida hermaphrodita* Rusby.) do rekultywacji terenów po otworowej eksploatacji siarki. Problemy Inżynierii Rolniczej 1: 125 — 132.
- Klimont K., Bulińska-Radomska Z., Osińska A., Bajor P. 2013b. Kształtowanie się składu gatunkowego roślin wprowadzonych i spontanicznie zasiedlających użyźnione składowisko odpadów komunalnych. Biul. IHAR 270: 109 — 121.
- Klimont K., Góral S., Jońca M. 2002. Rekultywacyjna efektywność osadów ściekowych na podłożu wapna poflotacyjnego. Biul. IHAR 223/224: 415 — 425.
- Kopec M., Gondek K. 2002. wykorzystanie osadów garbarskich w uprawie wikliny. Acta Agrophysica 73: 167 — 173.
- Kuś I., Faber A., Stasiak M., Kawalec A. 2008. Plonowanie wybranych gatunków roślin uprawnych na cele energetyczne na różnych glebach. Problemy Inżynierii Rolniczej 1(59): 79 — 86.
- Levyk V., Brzezińska M. 2007. Stan środowiska glebowego na terenie byłej Kopalni Siarki „Jaworów” (Ukraina) i Machów (Polska) w świetle aktualnych badań. Acta Agrophysica 10(4): 149 — 157.
- Majtkowski W., Majtkowska G., Tomaszewski B. 2010. Dynamika wzrostu roślin energetycznych oraz potencjał biomasy. W: Modelowanie energetycznego wykorzystania biomasy. Wydawnictwo ITP Falenty-Warszawa: 114 — 126.
- Majtkowski W., Majtkowska G. 2012. Fitosanitarna rola szaty roślinnej na zrehabilitowanej hałdzie popiołów w Sowlanach k. Białegostoku. Biul. IHAR 263: 55 — 63.
- Martyn W., Buczek Z., Jońca M., Sowińska J. 2001a. Zastosowanie osadów ściekowych w rekultywacji terenów pogórnich w Kopalni Siarki „Jeziórko”. Inżynieria Ekologiczna 3. PTIE Bydgoszcz: 99 — 105.
- Martyn W., Gardiasz Z., Skwaryło-Bednarz B. 2001b. Aktywność biologiczna gleb rekultywowanych osadami ściekowymi z terenu Kopalni Siarki „Jeziórko”. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 475: 335 — 340.
- Poedniok J., Kita A. 2005. Zawartość cynku, kadmu, ołowiu, magnezu i miedzi w glebach południowej Polski. Inżynieria Ekologiczna 16. PTIE Warszawa: 52 — 53.
- Sadowska A., Obidoska G., Rumowska M. 2000. Ekotoksykologia. Toksyczne czynniki środowiskowe i metody ich wykrywania. Warszawa, SGGW: 176 ss.
- Siciński I. T. 2009. Zachwaszczenie plantacji wierzby (*Salix viminalis* L.) w rejonie Łodzi. Pamiętnik Puławski 150: 247 — 254.
- Siuta J. 2001. Rekultywacja gruntów w górnictwie siarkowym. Inżynieria Ekologiczna 3. PTIE Bydgoszcz: 192 — 198.

- Siuta J., Jońca M. 1997. Rekultywacyjne działanie osadu ściekowego na wapnie poflotacyjnym w Kopalni Siarki „Jeziórko”. Mat. Konf. „Przyrodnicze użytkowanie osadów ściekowych”. IOS Puławy-Lublin-Jeziórko, 26-28 V 1997: 39 — 48.
- Siuta J. 2004. Uwarunkowania i sposoby przyrodniczego użytkowania osadów ściekowych. Inżynieria Ekologiczna 9. PTIE Warszawa: 7 — 42.
- Siuta J., Wasiak G., Chłopecki K., Kazimierzczuk M., Jońca M., Mamełka D., Sułek S. 1996. Przyrodniczo-techniczne przetwarzanie osadów ściekowych na kompost. Synteza wyników programu KBN. Warszawa. Instytut Ochrony Środowiska: 40ss.
- Siuta J., Żukowski B. 2008. Degradacja i rekultywacja powierzchni ziemi w Polsce. Warszawa. Dział Wydawnictw IOS: 238 ss.
- Szczukowski S., Tworkowski I. 2000. Produktynność wierzb drzewiastych (*Salix* sp.) na glebie organicznej. Inżynieria Ekologiczna 1. Baranów Sandomierski: 138 — 144.
- Szczukowski S., Tworkowski I., Wiwart M., Przyborowski I. 1998. Wiklina (*Salix* sp.). Uprawa i możliwości wykorzystania. Wyd. ART, Olsztyn: 60ss.
- Wiśniewska-Kielian B., Lipiński W. 2007. Ocena składu chemicznego roślin. Oddz. Krakowski PTIE, Krajowa Stacja Chemiczno-Rolnicza, Kraków-Warszawa-Wrocław: ss. 77.
- Zarębski P. 2014. Znaczenie wierzby energetycznej w rekultywacji wysypisk śmieci oraz hałd i wyrobisk pogórnictwa. Zeszyty Naukowe Wydziału Nauk Ekonomicznych 18. Politechnika Koszalińska. Koszalin: 67 — 76.