

## WPŁYW KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH NA ZAWARTOŚĆ METALI CIĘŻKICH W PĘDACH KLONÓW WIERZBY KRZEWISTEJ (*SALIX VIMINALIS* L.)

Anna Jama-Rodzeńska<sup>1</sup>, Jan Bocianowski<sup>2</sup>, Władysław Nowak<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

<sup>2</sup> Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

**Streszczenie.** Wykorzystanie osadu ściekowego do użyzniania gleby na plantacjach roślin energetycznych wydaje się być najbardziej racjonalną metodą jego użycia. Obok cennych składników biogennych, takich jak N, P, Mg czy K, osad ściekowy w swoim składzie zawiera także substancje toksyczne i szkodliwe. Obecność metali ciężkich w niektórych osadach stanowi czynnik ograniczający ich wykorzystanie w rolnictwie. Wierzba wiciowa (*Salix viminalis* L.) jest przykładem wieloletniej rośliny energetycznej, która ma duże zdolności pobierania i akumulowania metali ciężkich. W pracy przedstawiono wyniki dotyczące wpływu komunalnych osadów ściekowych na zawartość metali ciężkich w pędach wierzby. Doświadczenie z użyznianiem klonów wierzby krzewiastej osadem ściekowym prowadzono w latach 2009–2010 w Stacji Badawczo-Dydaktycznej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Eksperyment został założony metodą split-plot z dwoma czynnikami zmiennymi: pierwszym czynnikiem były dwie dawki osadu ściekowego na tle kontroli: 14,3 Mg·ha<sup>-1</sup> i 28,5 Mg·ha<sup>-1</sup> s.m., a drugim czynnikiem były cztery klony wierzby krzewiastej. Analiza statystyczna wykazała, że zawartości metali ciężkich Fe i Ni ( $r = 0,6793$ ) oraz Ni i Pb ( $r = 0,7046$ ) były istotnie statystycznie skorelowane. Analiza składowych głównych okazała się skutecznym narzędziem do czytelnej oceny zróżnicowania kombinacji klonów i dawek osadu ściekowego. Celem pracy było wyselekcjonowanie klonów o największej zawartości metali ciężkich w pędach.

**Słowa kluczowe:** wierzba krzewiasta, klony, pędy, metale ciężkie, osady ściekowe

## WSTĘP

Osad ściekowy stanowi nieodłączny element oczyszczania ścieków. Zgodnie z ustawą o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 roku, osad ściekowy jest to pochodzący z oczyszczalni ścieków osad z komór fermentacyjnych oraz innych instalacji służących do oczyszczania ścieków komunalnych oraz ścieków o składzie zbliżonym do składu ścieków komunalnych. Stosowanie osadów ściekowych zgodnie z powyższą ustawą to rozproszanie na powierzchni ziemi lub wprowadzenie komunalnych osadów ściekowych do gleby w celu ich wykorzystania. Oprócz składników biogennych (azot, fosfor, potas czy wapń) osady mogą zawierać zanieczyszczenia organiczne, takie jak wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, polifenole, dioksyny, a także inne związki ograniczające ich zastosowanie w rolnictwie, w tym metale ciężkie. Problem wykorzystania osadów ściekowych w „nawożeniu” roślin wzbudza wiele kontrowersji, ale jest jedną z racjonalnych metod ich wykorzystania. Nieliczne tylko gatunki roślin mają zdolność do wzrostu i rozwoju w środowisku zanieczyszczonym metalami ciężkimi, dając przy tym wysokie plony. Wierzbę wykorzystuje się w oczyszczaniu środowiska, co ma zastosowanie w procesie fitoremediacji. Jest rośliną o stosunkowo małych wymaganiach pod względem środowiska [Kaniuczak i in. 2000, Szczukowski i in. 2000, 2002, 2004a, 2004b, Kalembasa i in. 2006, Kisiel i in. 2006], a uprawiana na osadzie ściekowym wynosi z gleby najwięcej substancji szkodliwych, dlatego szczególnie się ją poleca do zagospodarowania gleb o nadmiernej zawartości metali ciężkich [Kaniuczak i in. 2000, Michałowski i Gołas 2001, Mertens i in. 2006, Meers i in. 2007]. Problematyka pobierania i akumulacji metali ciężkich z osadów przez wierzbę oraz ich reakcji na zanieczyszczone środowisko życia jest tematyką ciągle aktualną. Dotychczasowe badania dotyczą zawartości głównie metali ciężkich w liściach, korze i drewnie wierzby. Ze względu na spalanie surowca wierzbowego (jako surowca energetycznego alternatywnego do spalania węgla) należałoby zbadać zawartość tych pierwiastków w całym pędzie. Stwierdzono, że spalanie pędów wierzbowych jest korzystniejsze dla środowiska naturalnego w porównaniu ze spalaniem paliw kopalnych, ze względu na mniejszą emisję substancji toksycznych do atmosfery. Pędy wierzbowe zawierają najmniejszą ilość azotu, fosforu, metali ciężkich, dlatego można je wykorzystać podczas spalania bez obaw o emisję substancji szkodliwych [Michałowski i Gołas 2001, Mertens i in. 2006, Ociepa i in. 2008, Ohlsson i in. 2008].

Celem pracy było wytypowanie klonów charakteryzujących się największą zawartością metali ciężkich w pędach, a w dalszym etapie ich wykorzystanie do spalania biomasy jako alternatywa do spalania węgla, jak również wielocechowa charakterystyka zmienności. Zastosowano metodę składowych głównych.

## MATERIAŁ I METODY

W latach 2009–2010 na założonym w 2003 roku doświadczalni przeprowadzono badania nad wpływem „nawożenia” komunalnymi osadami ściekowymi na zawartość metali ciężkich w kilku klonach wierzby krzewiastej. Doświadczenie przeprowadzono na glebie brunatnoziemnej, typu płowego, podtypu opadowo-glejowego w Stacji Badawczo-Dydaktycznej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (tab. 1). Sadzonki

Tabela 1. Skład granulometryczny gleby (poziom A 0–20 cm) wykonany metodą areometryczną Bouyoucosa-Casagrande w modyfikacji Prószyńskiego (według PTG)

Table 1. Granularity of soil (level A 0–20 cm) made up using aerometric method Bouyoucosa – Casagrande in Prószyński's modification

Próbka glebowa Soil sample	Udział frakcji – Fraction [mm]			Grupa granulometryczna według PTG 2008 Granulometric group according to Polish Society of Soil Science
	2–0,05	0,05–0,02	< 0,02	
Poziom A [0–20 cm] Level A [0–20 cm]	64	26	10	glina lekka light clay of loam

zdrewniałe wierzby wysadzono wiosną 2003 roku w rozstawie  $0,7 \times 0,4$  m w liczbie 35 714 sztuk na hektar. Osady ściekowe zastosowano jednorazowo wiosną w 2008 roku, powierzchniowo, po czym badano następcze działanie osadu. Wpływ osadu ściekowego na zawartość metali ciężkich w pędach wierzby wykonano w latach 2009–2010. Doświadczenie założono w układzie split-plot z dwoma czynnikami różnicującymi w trzech powtórzeniach. Czynniki badanymi były w kolejności:

- I – dawki osadu ściekowego pochodzącego z Wrocławskiej Oczyszczalni Ścieków Janówek: 1 – bez osadu (kontrola), 2 – dawka pierwsza:  $14,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  s.m. osadu, 3 – dawka druga:  $28,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  s.m. osadu.

Wielkość dawki osadu ściekowego została ustalona na podstawie załącznika 1 do Rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie komunalnych osadów ściekowych z dnia 1 sierpnia 2002 roku (obowiązująca wersja z dnia 13 lipca 2010 roku) z przeznaczeniem do rekultywacji na cele nierolne [Rozporządzenie 2010]. Przy ustalaniu dawek osadów ściekowych wzięto pod uwagę zapotrzebowanie wierzby na azot i fosfor (tab. 2).

Tabela 2. Właściwości fizykochemiczne komunalnego osadu ściekowego

Table 2. Physicochemical properties of communal sewage sludge

Wyszczególnienie – Specification	Jednostka – Unit	Osad higienizowany Communal sewage sludge
Odczyn pH – Reaction	–	12
Sucha masa – Dry mass		220
Substancja organiczna – Organic matter		450
Azot ogólny – Nitrogen	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	36
Fosfor ogólny – Phosphorus		28
Wapń – Calcium		100
Magnez – Magnesium		7
Ołów – Lead		59
Kadm – Cadmium		2
Chrom – Chromium	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	108
Miedź – Copper		415
Nikiel – Nickel		50
Rtęć – Mercury		0,05

- II cztery klony wierzby krzewiastej oznaczone w kolekcji następującymi liczbami: 1001 *Salix viminalis dasycladis ss Baltica*, 1047 *Salix viminalis var gigantea*, 1053 *Orm Valne*, 1054 *Salix viminalis* 082.

Gleba charakteryzowała się bardzo wysoką zawartością przyswajalnego fosforu (90–191 mg·kg<sup>-1</sup>), potasu (151–210 mg·kg<sup>-1</sup>) oraz średnią i wysoką zawartością magnezu (29–34 mg·kg<sup>-1</sup>). Glebę zaliczono do gliny lekkiej (tab. 1) [Ostrowska i in. 1991, Drozd i in. 2002].

Skład chemiczny komunalnych osadów wskazuje, że był on zasobny w składniki nawozowe. Charakteryzował się odczynem alkalicznym, dużą zawartością substancji organicznej, azotu, fosforu, wapnia i niską zawartością metali, spełniał więc wymagania Rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie komunalnych osadów ściekowych z dnia 13 lipca 2010 roku przy stosowaniu ich w rolnictwie (tab. 2).

Analizy składu chemicznego osadu ściekowego wykonano z wykorzystaniem następujących standardów w laboratorium:

- suchą masę – metodą suszarkową,
- substancję organiczną – poprzez wyrzżanie,
- azot – metodą Kjehdala,
- wapń – metodą kolorymetryczną z żółcieniem tytanową,
- fosfor – kolorymetrycznie metodą wanadomolibdenową,
- metale ciężkie – metodą ASA.

Próbki pędów pobrano z 10 losowo wybranych roślin z każdego klonu i obiektu nawożenia. Metale ciężkie w materiale roślinnym oznaczono metodą ASA po suchej mineralizacji próbek roślinnych.

## Metody statystyczne

Normalność rozkładu zawartości badanych metali ciężkich (Fe, Cu, Zn, Ni, Mn, Pb) była testowana z użyciem testu Shapiro-Wilka [Shapiro i Wilk 1965]. Obliczono i testowano współczynniki korelacji prostej Pearsona [Kozak i in. 2010]. W celu przedstawienia wielo cechowej oceny podobieństwa badanych obiektów w mniejszej liczbie wymiarów z możliwie jak najmniejszą stratą informacji zastosowano analizę składowych głównych. Umożliwia ona zobrazowanie zróżnicowania obiektów pod względem zawartości sześciu metali ciężkich łącznie w formie graficznej. Ułatwia to grupowanie oraz charakterystykę wielo cechową badanych obiektów. Oszacowano wartości współczynników korelacji prostej między wartościami dwu pierwszych składowych głównych a średnimi wartościami zawartości poszczególnych metali ciężkich w celu określenia względnego udziału każdej cechy w wielo cechowym zróżnicowaniu badanych obiektów. Odległości Euklidesa zostały użyte jako współczynnik zróżnicowania dla wszystkich możliwych kombinacji klonów i dawek osadu ściekowego w poszczególnych latach prowadzenia obserwacji (kombinacje nazywane są dalej obiektami). Uzyskane współczynniki zróżnicowania fenotypowego posłużyły do hierarchicznego grupowania obiektów metodą średnich połączeń. Wyniki przeprowadzonego grupowania przedstawiono w formie dendrogramu. Wszystkie obliczenia w analizie danych wykonano za pomocą pakietu statystycznego GenStat 15.

## WYNIKI I DISKUSJA

Porównując badane obiekty ze względu na pojedyncze cechy dochodzi się zazwyczaj do różnych wniosków nieinformujących w pełni o danym obiekcie. Można uniknąć tego problemu, stosując metody wielowymiarowe. Zastosowanie w niniejszej pracy wielowymiarowych metod statystycznej analizy wyników doświadczeń uzasadnione było stosunkowo niewielką liczbą istotnych korelacji, a więc analizowanie poszczególnych cech oddzielnie byłoby niewskazane. Brak istotnych korelacji oznacza m.in. różne uporządkowanie obiektów pod względem poszczególnych cech. Wybór obiektów najlepszych pod względem jednej cechy może być równocześnie wyborem obiektów przeciętnych pod względem innej cechy. Wartości współczynników korelacji badanych cech przedstawiono w tabeli 3. Zawartości metali ciężkich Fe i Ni ( $r = 0,6793$ ) oraz Ni i Pb ( $r = 0,7046$ ) były istotnie statystycznie skorelowane (tab. 3).

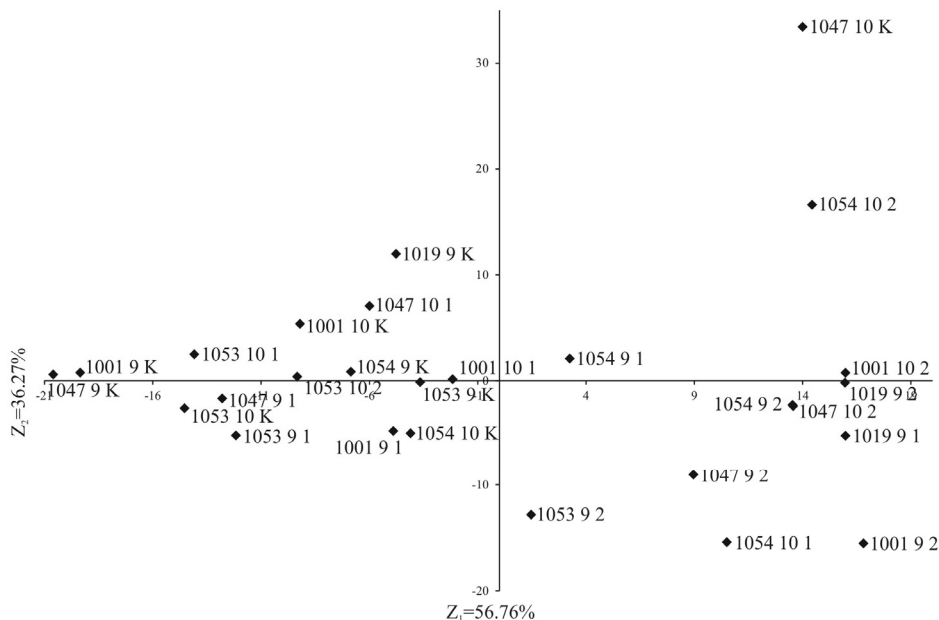
Tabela 3. Współczynniki korelacji prostej Pearsona pomiędzy zawartościami metali ciężkich  
Table 3. Correlation coefficient of Pearson between the content of heavy metals

Cecha Feature	Fe	Cu	Zn	Ni	Mn	Pb
Fe	1					
Cu	0,1211	1				
Zn	-0,1247	0,2527	1			
Ni	0,6793***	0,2623	-0,2443	1		
Mn	0,113	-0,0247	0,0874	0,0483	1	
Pb	0,3347	0,263	0,0377	0,7046***	-0,0483	1

\*\*\*  $P < 0,001$

Wyniki analizy wielowymiarowej pozwalają stwierdzić, iż dwie pierwsze składowe główne wyjaśniają w sumie 93,03% ogólnej zmienności. Na rysunku 1 przedstawiono kombinacje klonów i dawek osadu ściekowego w poszczególnych latach prowadzenia doświadczenia (obiekty) w układzie dwu pierwszych składowych głównych. Na wykresie współrzędne punktu danego obiektu stanowią wartości odpowiednio pierwszej i drugiej składowej głównej. Pierwsza składowa główna (PC1) jest dodatnio skorelowana z zawartością Ni ( $r = 0,3893$ ) oraz ujemnie skorelowana z zawartością Zn ( $r = -0,973$ ) (tab. 4). Druga składowa główna (PC2) jest dodatnio skorelowana z zawartością Fe ( $r = 0,9362$ ) oraz zawartością Ni ( $r = 0,5814$ ) (tab. 4). Cechy statystycznie istotnie skorelowane z pierwszą i/lub drugą składową główną posiadają największą moc dyskryminacyjną.

Analiza grupowania bazująca na odległościach Euklidesa oszacowanych na podstawie zawartości sześciu metali ciężkich pozwoliła na rozdzielenie badanych kombinacji klonów i dawek osadu ściekowego w poszczególnych latach prowadzenia obserwacji na dwie grupy: A i B (rys. 2). W pierwszej grupie zlokalizowane zostały klony numer 1001, 1053 i 1047 traktowane wszystkimi trzema dawkami osadu ściekowego i badane w pierwszym roku prowadzenia doświadczenia (rys. 2). Najmniejszą odległością Euklidesa charakteryzowały się obiekty 1053 9 2 i 1047 9 2 (0,010), a największą – 1053 9 2 i 1047 9 K (0,433) (tab. 5).



Rys. 1. Położenie kombinacji klonów i dawek osadu ściekowego w poszczególnych latach prowadzenia obserwacji w układzie dwu pierwszych składowych głównych [zapis obiektu 'XYZ' oznacza: X – klon, Y – rok (9 – 2009, 10 – 2010), Z – dawka osadu ściekowego (K – kontrola, 1 – pojedyncza, 2 – podwójna)]

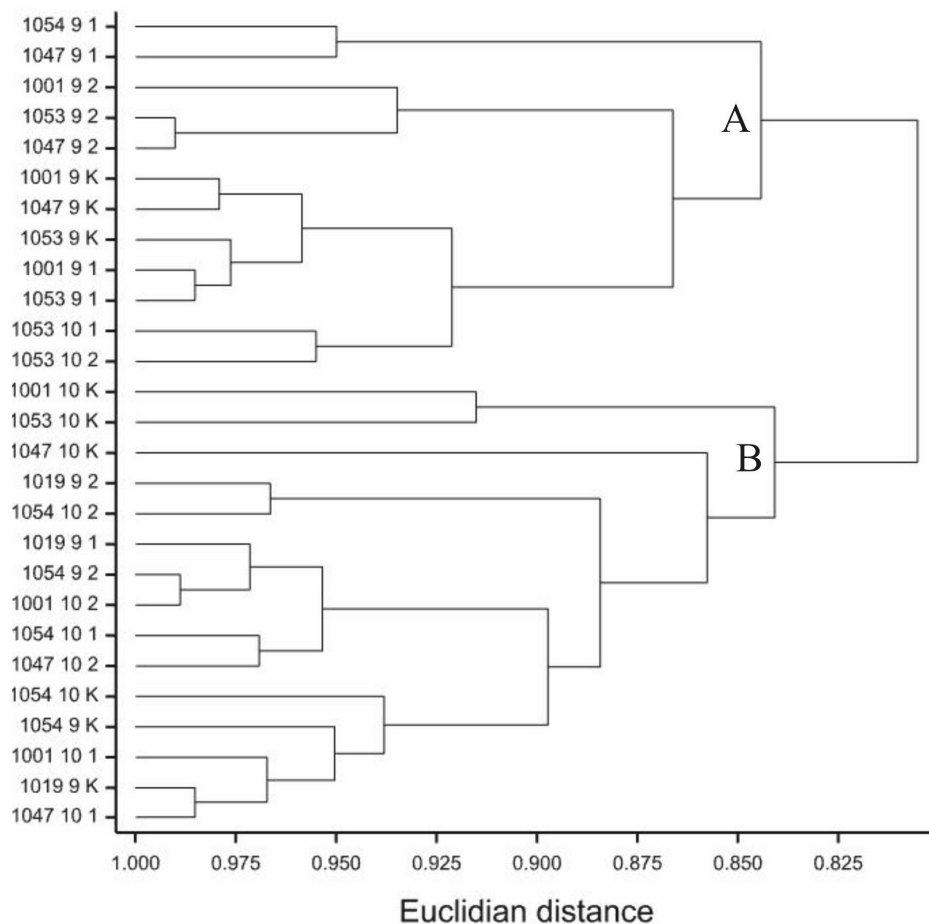
Fig. 1. The location of combinations of clones and doses of sewage sludge in following years of observation in the setting two main components [object notation 'XYZ' means: X – clone, Y – year (9 – 2009, 10 – 2010), Z – dose of sewage sludge (K – control, 1 – single, 2 – double)]

Tabela 4. Współczynniki korelacji między dwiema pierwszymi składowymi głównymi a zawartościami badanych metali ciężkich

Table 4. Correlation coefficients between two visible main components and the content of heavy metals

Metale ciężkie Heavy metals	Składowe główne Main components	
	PC1	PC2
Fe	0,3503	0,9362***
Cu	-0,2099	0,207
Zn	-0,973***	0,2304
Ni	0,3893*	0,5814**
Mn	-0,0638	0,1736
Pb	0,0435	0,3407
Wartość własna	149,23	95,36
Procent zmienności wyjaśnianej przez PC	56,76%	36,27%

\*  $P < 0,05$ ; \*\*  $P < 0,01$ ; \*\*\*  $P < 0,001$



Rys. 2. Dendrogram przedstawiający hierarchiczne grupowania kombinacji klonów i dawek osadu ściekowego w poszczególnych latach prowadzenia obserwacji metodą średnich połączeń [zapis obiektu 'X Y Z' oznacza: X – klon, Y – rok (9 – 2009, 10 – 2010), Z – dawka osadu ściekowego (K – kontrola, 1 – pojedyncza, 2 – podwójna)]

Fig. 2. Dendrogram showing the hierarchical clustering combination of clones and doses of sewage sludge in different years of observation by the average call [object notation 'XYZ' means: X – clone, Y – year (9 – 2009, 10 – 2010), Z – dose of sewage sludge (K – control, 1 – single, 2 – double)]

Na ogół nie stwierdzono istotnego wpływu osadu ściekowego na zawartość metali ciężkich w pędach wierzby. Większość wyników zawartości metali ciężkich w wierzbie dotyczy osobno liści, kory i drewna, mniej jest badań dotyczących pędów. W badaniach Kalembasy [2009] największe zawartości miedzi, cynku i ołowiu stwierdzono na obiekcie z najwyższą dawką osadów ściekowych, tj. 200 kg N·ha<sup>-1</sup>. W większości przeprowadzonych badań, jak i w badaniach własnych, nie została przekroczona granica zawartości fizjologicznej metali ciężkich [Brzozowska i in. 1995, Jakubiak i Śliwka 2010]. Według Barana [2001], organ rośliny i dawka osadu nie miały wpływu na zawartość miedzi

Tabela 5. Odległości Euklidesa dla wszystkich możliwych kombinacji klonów i dawek osadu ściekowego w poszczególnych latach prowadzenia ob-  
serwacji

Table 5. Euclidean distances for all possible combinations of clones and sewage sludge in following years of observations

Obiekt# Object#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1054 9 K	1												
1054 9 I	2	0,095											
1054 9 2	3	0,097	0,109										
1019 9 K	4	0,052	0,073	0,070									
1019 9 I	5	0,084	0,062	0,016	0,079								
1019 9 2	6	0,150	0,213	0,078	0,115	0,091							
1001 9 K	7	0,129	0,165	0,139	0,139	0,206	0,315						
1001 9 I	8	0,084	0,151	0,091	0,128	0,109	0,211	0,041					
1001 9 2	9	0,209	0,142	0,083	0,218	0,077	0,237	0,169	0,082				
1053 9 K	10	0,116	0,124	0,103	0,114	0,117	0,201	0,027	0,020	0,080			
1053 9 I	11	0,134	0,188	0,144	0,163	0,174	0,304	0,020	0,015	0,111	0,027		
1053 9 2	12	0,203	0,202	0,143	0,246	0,158	0,402	0,145	0,078	0,078	0,125		
1047 9 K	13	0,070	0,122	0,189	0,111	0,183	0,295	0,021	0,055	0,203	0,054	0,072	
1047 9 I	14	0,149	0,050	0,204	0,126	0,167	0,326	0,082	0,138	0,175	0,088	0,132	0,174
1047 9 2	15	0,184	0,162	0,118	0,228	0,117	0,358	0,160	0,077	0,053	0,117	0,089	0,215
1054 10 K	16	0,056	0,206	0,092	0,073	0,115	0,071	0,224	0,150	0,279	0,185	0,215	0,181
1054 10 I	17	0,081	0,170	0,049	0,154	0,052	0,148	0,200	0,070	0,094	0,131	0,132	0,180
1054 10 2	18	0,185	0,280	0,101	0,114	0,148	0,034	0,325	0,234	0,307	0,222	0,315	0,325
1001 10 K	19	0,170	0,344	0,160	0,140	0,233	0,118	0,186	0,153	0,323	0,154	0,187	0,209
1001 10 I	20	0,045	0,082	0,085	0,037	0,072	0,065	0,152	0,122	0,201	0,106	0,180	0,108
1001 10 2	21	0,122	0,167	0,011	0,088	0,041	0,076	0,259	0,142	0,145	0,167	0,205	0,258
1053 10 K	22	0,071	0,299	0,180	0,157	0,215	0,194	0,154	0,097	0,309	0,156	0,142	0,123
1053 10 I	23	0,084	0,182	0,094	0,065	0,144	0,175	0,057	0,051	0,188	0,060	0,054	0,075
1053 10 2	24	0,062	0,186	0,091	0,095	0,127	0,233	0,118	0,064	0,193	0,121	0,080	0,108
1047 10 K	25	0,172	0,251	0,125	0,102	0,164	0,156	0,356	0,268	0,362	0,283	0,340	0,333
1047 10 I	26	0,052	0,080	0,104	0,015	0,094	0,114	0,202	0,186	0,279	0,176	0,237	0,144
1047 10 2	27	0,077	0,179	0,037	0,109	0,050	0,103	0,267	0,130	0,172	0,188	0,207	0,234



Obiekt# Object#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1047 9 2	15	0,201											
1054 10 K	16	0,284	0,305										
1054 10 1	17	0,261	0,103										
1054 10 2	18	0,394	0,396	0,094									
1001 10 K	19	0,349	0,386	0,081	0,212	0,083							
1001 10 1	20	0,127	0,267	0,054	0,133	0,115	0,129						
1001 10 2	21	0,294	0,170	0,085	0,066	0,160	0,117						
1053 10 K	22	0,315	0,287	0,065	0,123	0,085	0,129	0,191					
1053 10 1	23	0,168	0,183	0,086	0,130	0,157	0,098	0,118	0,078				
1053 10 2	24	0,227	0,117	0,097	0,075	0,158	0,149	0,100	0,081	0,045			
1047 10 K	25	0,405	0,341	0,156	0,229	0,080	0,207	0,184	0,091	0,190	0,171		
1047 10 1	26	0,151	0,300	0,065	0,178	0,141	0,181	0,029	0,119	0,116	0,139	0,140	
1047 10 2	27	0,317	0,161	0,066	0,031	0,122	0,186	0,119	0,025	0,133	0,075	0,110	0,125
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26

# Zapis obiektu 'XYZ' oznacza: X – klon, Y – rok (9 – 2009, 10 – 2010), Z – dawka osadu ściekowego (K – kontrola, 1 – pojedyncza, 2 – podwójna).

# Object notation 'XYZ' means: X – clone, Y – year (9 – 2009, 10 – 2010), Z – dose of sewage sludge (K – control, 1 – single, 2 – double).

w wiklinie – podobnie jak w badaniach własnych. Wiklina wykazuje wyjątkowe zdolności akumulowania w pędach takich pierwiastków, jak Cd i Zn [Landberg i in. 1996, Baran i in. 2000, Tack i in. 2005, Maxted i in. 2007]. Według badań Meers i innych (2007), badane odmiany *Salix* nie były odpowiednim narzędziem w procesie fitoekstrakcji Cr, Cu, Ni i Pb, ze względu na niskie pobieranie tych pierwiastków z gleby. Zawartość metali ciężkich w roślinie może być tłumaczona tzw. efektem rozcieńczenia. Często zawartości te mogą być niższe niż przewidywalne m.in. na skutek źle przeprowadzonej orki.

Kaniuczak [2000] stwierdziła, że ilość cynku zakumulowana w organach wikliny (liście i kora) przekraczała nadmierną dopuszczalną zawartość ( $100\text{--}400\text{ mg Zn}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Przekroczenie tych wartości dotyczyło liści i kory. Przyjęto następującą klasyfikację dopuszczalnych zawartości metali ciężkich określającą poziomy fitotoksyczności: Cu –  $25\text{--}40$ , Ni –  $50\text{--}100$ , Zn –  $500\text{--}1500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  [Labrecque i in. 1995]. W pędach wierzby nie stwierdzono przekroczenia wartości dopuszczalnych. Toksyczne stężenie tego pierwiastka w liściach i pędach wikliny stwierdzili także Baran i inni (2000). Młode pędy wikliny gromadzą więcej cynku niż liście. Według Jakubiak i Śliwki [2010], największą zdolność pobierania ołowiu miały klony 1012 (wiklina plecionkowa) i 1033 (wiklina przemysłowo-energetyczna), jednakże zawartości mieściły się w zakresie normalnym (fizjologicznym), który wynosi od 5 do  $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Metoda składowych głównych jest szeroko stosowana [Abdulla i in. 2013, Alexander i Imberger 2013, Demšar i in. 2013]. O jej efektywności w prezentowanych badaniach świadczą m.in. duże wartości procentu ogólnej zmienności wyjaśnianej przez dwie pierwsze składowe główne, wynoszące 93,03%. Zawartości Cu, Mn oraz Pb nie były istotnie skorelowane ani z pierwszą, ani z drugą składową główną (tab. 4). Zawartość Ni była natomiast statystycznie istotnie skorelowana zarówno z pierwszą, jak i drugą składową główną (tab. 4).

Niska zawartość metali ciężkich w pędach wierzby jest ważna w aspekcie ochrony środowiska, gdyż popiół uzyskiwany ze spalania biomasy zawiera metale ciężkie i pozwala na wykorzystanie go jako nawozu w rolnictwie [Hermann i Harasimowicz-Hermann 2005].

## WNIOSKI

1. Zastosowane dawki osadu ściekowego nie miały istotnego wpływu na zawartość manganu, żelaza, miedzi, niklu i ołowiu w pędach wierzby. Największe zawartości powyższych metali ciężkich stwierdzono na obiekcie kontrolnym.
2. Nie stwierdzono przekroczenia dopuszczalnych norm zawartości metali ciężkich w badanych pędach wierzby.

## LITERATURA

- Abdulla H.A.N., Minor E.C., Dias R.F., Hatcher P.G., 2013. Transformations of the chemical compositions of high molecular weight DOM along a salinity transect: Using two dimensional correlation spectroscopy and principal component analysis approaches. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 118, 231–246.

- Alexander R., Imberger J., 2013. Phytoplankton patchiness in Winam Gulf, Lake Victoria: a study using principal component analysis of in situ fluorescent excitation spectra. *Freshwater Biology* 58(2), 275–291.
- Baran S., Bielińska E.J., Wójcikowska-Kapusta A., 2000. Wpływ uprawy wikliny na kształtowanie aktywności dehydrogenaz i fosfataz oraz zawartości ołowiu w glebie bielcowej użyźnionej osadem ściekowym, *Folia Univ. Agric. Stetin.* 211, 84, 19–24.
- Baran S., Wójcikowska-Kapusta A., Jaworska B., 2001. Przydatność wikliny do sanitacji gleb zanieczyszczonych miedzią i ołowiem, *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 477, 187–193.
- Brzozowska K., Prądyński W., 1994–1995. Krzewy wierzbowe jako indykatory zanieczyszczeń środowiska metalami ciężkimi, *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu CCLXXIX*, 29–38.
- Demšar U., Harris P., Brunson C., Fotheringham A.S., McLoone S., 2013. Principal Component Analysis on Spatial Data: An Overview. *Annals of the Association of American Geographers* 103(1), 106–128.
- Drozd J., Licznar M., Licznar S., Weber J., 2002. Gleboznawstwo z elementami mineralogii i petrografii. Skrypty AR we Wrocławiu nr 470.
- Hermann J., Harasimowicz-Hermann G., 2005. Przydatność popiołów ze spalania biomasy do stosowania w rolnictwie i rekultywacji gruntów, *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 506, 189–196.
- Jakubiak M., Śliwka M., 2010. Zmiany zawartości pierwiastków śladowych w wierzbach (*S. viminalis*) pod wpływem stymulacji zrzezów światłem spójnym. *Proceedings of ECOpole 4*, 2, 388–394.
- Kalembsa D., Malinowska E., Siewniak M., 2006. Wpływ nawożenia na plonowanie wybranych gatunków wierzby krzewiastej. *Acta Agrophysica* 8(1), 119–126.
- Kalembsa S., Wysokiński A., Cichuta R., 2009. Zawartość metali ciężkich w wierzbie (*Salix viminalis*) przy zróżnicowanym nawożeniu azotowym, *Acta Agrophysica* 13(2), 385–392.
- Kaniuczak J., Błażej J., Gąsior J., 2000. Zawartość pierwiastków śladowych w różnych klonach wikliny. Zawartość żelaza, manganu, miedzi i cynku, *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 472, 379–385.
- Kisiel R., Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J., 2006. Biomasa pozyskiwana z gruntów rolniczych źródłem energii. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej* 4, 90–101.
- Kozak M., Bocianowski J., Sawkojć S., Wnuk A., 2010. Call for more graphical elements in statistical teaching and consultancy. *Biometrical Letters* 47(1), 57–68.
- Labrecque M., Teodorescu T.I., Daigle S., 1995. Effect of wastewater sludge on growth and heavy metal bioaccumulation of two *Salix* species. *Plant and Soil* 171, 303–316.
- Landberg T., Greger M., 1996. Differences in uptake and tolerance to heavy metals in *Salix* from unpolluted and polluted areas. *Applied Geochemistry* 11, 175–180.
- Maxted A.P., Black C.R., West H.M., Crout N.M.J., Mcgrath S.P., Young S.D., 2007. Phytoextraction of cadmium and zinc by *Salix* from soil historically amended with sewage sludge. *Plant Soil* 290, 157–172.
- Meers E., Vandecasteele B., Ruttens A., Vangronsveld J., Tack F.M.G., 2007. Potential of five willow species (*Salix* spp.) for phytoextraction. *Environmental and Experimental Botany* 60, 57–68.
- Mertens J., Vervaeke P., Meers E., Tack F.M., 2006. Seasonal Changes of metals in willow (*Salix* sp.) stands for phytoremediation on dredged sediment. *Environmental Science & Technology* 40(6), 1962–1968.
- Michałowski M., Gołas J., 2001. Zawartość wybranych metali ciężkich w organach wierzby jako wskaźnik wykorzystania w utylizacji osadów ściekowych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 477, 411–419.

- Ociepa A., Lach J., Gałczyński L., 2008. Korzyści i ograniczenia wynikające z zagospodarowania gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi pod uprawy roślin przemysłowo-energetycznych. *Proceedings of ECOpole 2*(1), 231–235.
- Ohlsson A.B., Landberg T., Berglund T., Greger M., 2008. Increased metal tolerance in *Salix* by nicotinamide and nicotinic acid. *Plant Physiology and Biochemistry* 46, 655–664.
- Ostrowska A., Gawliński S., Szczubiałka Z., 1991. Metody analizy i oceny właściwości gleb i roślin. Katalog. Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie komunalnych osadów ściekowych z dnia 13 lipca 2010 roku (Dz.U. z 2010 r. Nr 137.924).
- Shapiro S.S., Wilk M.B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52(3–4), 37–76.
- Szczukowski S., Tworowski J., Stolarski M., 2000. Biomasa krzewiastych wierzb (*Salix* sp.) pozyskiwana na gruntach ornych odnawialnym źródłem energii. Międzynarodowa Konferencja „Gospodarowanie w rolnictwie zrównoważonym u progu XXI wieku”. Puławy 1–2 czerwca. *Pamiętnik Puławski* 120, 421–428.
- Szczukowski S., Tworowski J., Wiwart M., Przyborowski J., 2002. Wiklina (*Salix* sp.). Uprawa i możliwości wykorzystania. Wyd. UWM, Olsztyn.
- Szczukowski S., Stolarski M., Tworowski J., Przyborowski J., 2004a. Wykorzystanie biomasy wierzby krzewiastej do produkcji energii cieplnej. *Problemy Inżynierii Rolniczej* 2(44), 31–40.
- Szczukowski S., Tworowski J., Stolarski M., Przyborowski J., 2004b. Plon biomasy wierzb krzewiastych pozyskiwanych z gruntów rolniczych w cyklach jednorocznych. *Fragm. Agron.* XXI, nr 2(82), 5–18.
- Tack F.M.G., Varvaeke P., Meers E., Vandecasteele B., 2005. Phytoremediation/stabilisation of dredged sediment derived soils with willow. *Geophysical Research Abstracts*, vol. 7, 08101.

## THE INFLUENCE OF SEWAGE SLUDGE ON THE CONTENT OF HEAVY METALS IN SHOOTS OF CLONES OF WILLOW (*SALIX VIMINALIS* L.)

**Summary.** According to the Law on Waste of 14 December 2012 sewage sludge is “a sewage coming from the sewage treatment plant sludge digesters and other installations for water treatment with a composition similar to the composition of the sewage sludge”. Next to valuable nutrients, sewage sludge contains also heavy metals which can delimit its using in agriculture. Willow as a long-term plant possess high ability to take up and accumulate heavy metals. The paper presents the results of influence of sewage sludge on the content of heavy metals in the shoots of willow. Field experiment with clones of willow was established in 2003 and with sewage sludge in years 2009–2010 at Experimental Station Pawlowice. Experiment was established using split-plot method in three replicants with two factors: first factor- various doses of sewage sludge: 14.3 t·ha<sup>-1</sup>·d.m and 28.5 t·ha<sup>-1</sup>·d.m and II – clones of *Salix viminalis* L. Statistical analysis showed that the content of heavy metals Fe and Ni ( $r = 0.6793$ ) as well as Ni and Pb ( $r = 0.7046$ ) was statistically correlated. Analysis turned out to be an effective tool to legible evaluation diversity of combination of clones and doses of sewage sludge. The aim of the study was to select the clones that accumulated the greatest amount of heavy metals in shoots.

**Key words:** willow, clones, shoots, heavy metals, sewage sludge