

**Jan SIUTA**

## **Rekultywacyjna (glebotwórcza) użyteczność osadów ściekowych**

### **Abstract**

**Reclamation (soil formation) usefulness of sewage sludge.** Organic and mineral composition of sludges originating from biological treatment of wastewater approximate those of plant compost and soil organic matter. Levels of nitrogen, phosphorus, calcium and magnesium are higher in sludges than in composts and manure. Excessive contents of heavy metals and germs considerably reduce the possibility of applying these sludges as fertilizers in agriculture. Such sludges should be applied for non-agricultural land restoration.

Appropriate amounts of wastewater sludge introduced to the soil-less ground bestow in the properties of fertile soil. This concerns not only the natural grounds but also heaps of industrial, mining and communal spoils where upon a speedy and cheap development of vegetation cover is of great importance providing opportunities for land protection and landscape formation. Wastewater sludges may be used not only to reclaim spoil heaps but also to efficiently produce the plant mass which may be processed to obtain compost, thus combining waste disposal with the after-use of grounds.

In the paper the results were discussed of the study and practical application of wastewater sludges to restoring the soil-less grounds.

### **Wprowadzenie**

Osady z biologicznego oczyszczania bytowo-gospodarczych (miejskich i wiejskich) i przemysłowych (zwłaszcza

przetwórstwa rolno-spożywczego) ścieków obfitują w glebotwórczą (próchniczotwórczą) substancję organiczną i mineralne składniki pokarmowe roślin.

Stosunek węgla do azotu w ustabilizowanych osadach ściekowych jest analogiczny jak w próchnicy gleb uprawnych i w dojrzałych kompostach. Osady ściekowe zawierają też duże ilości łatwo przyswajalnych dla roślin mineralnych związków azotu i fosforu oraz łatwo rozkładalnej (mineralizowanej) substancji organicznej. Wymienione właściwości stanowią o bardzo dużej użyteczności osadów ściekowych do rekultywacji bezglebowych gruntów, melioracyjnego użytkowania gleb, nawożenia gleb i roślin.

Wprowadzenie odpowiednio dużej dawki osadu ściekowego do powierzchniowej warstwy bezglebowego gruntu nadaje mu biologiczną aktywność, właściwą dla urodzajnej gleby (Siuta i in. 1973, 1976, 1980; Siuta, Wasiak, Kozłowska 1995). Także sam osad, bez wymieszania go z mineralnym gruntem, tworzy korzystne warunki do intensywnego wzrostu roślin zdolnych do pobierania bardzo dużych ilości składników pokarmowych i produkowania obfitej masy

zielonej (Siuta 1995; Siuta, Wasiak 1995).

Rekultywacyjne i nawozowe wartości osadów ściekowych są często pomniejszane lub niweczone przez chorobotwórcze organizmy i nadmierne zawartości metali ciężkich. Także płynna, maźnista, bryłowata konsystencja osadów ściekowych stanowi istotne utrudnienie w ich przyrodniczym użytkowaniu. Odwodnienie osadów ściekowych do ziemistej konsystencji jest wymagane obecnie nawet wtedy, gdy mają być usuwane na wysypiska komunalne lub oddzielne składowiska.

Chorobotwórcze organizmy (głównie bakterie i jaja pasożytów przewodu pokarmowego) mogą być częściowo lub całkowicie niszczone w procesie uzdatniania osadów do przyrodniczego ich użytkowania. Transformacja fizycznych właściwości osadów ściekowych jest zwykle łączona z ich biologiczną sanitacją. Trudniejszy do rozwiązania problem stanowią nadmierne (szkodliwe) zawartości metali ciężkich, które wprowadzone do gleby pozostają w niej na długie lata, skąd są pobierane przez rośliny lub przemieszczane do wód podziemnych. Nadmierna zawartość metali ciężkich w osadzie ściekowym nie wyklucza możliwości stosowania go do nawożenia, ale wielkość jednorazowej lub sumarycznej dawki osadu jest limitowana przez ładunek metali ciężkich dopuszczony dla określonej gleby.

Bariera nadmiernej zawartości metali ciężkich w osadach jest coraz częściej pokonywana przez kraje przodujące w ochronie środowiska (Bernacka, Pawłowska 1994). Minimalizują one zrzuty me-

tali ciężkich do ścieków przez odpowiednie technologie produkcji i podczyszczanie ścieków u ich źródeł. Dzięki temu osady ściekowe zamiast uciążliwych odpadów stają się użytecznym produktem. W projektowaniu budowy i modernizacji polskich oczyszczalni konieczność ograniczenia zawartości metali ciężkich i chorobotwórczych organizmów w osadach jest coraz lepiej postrzegana i realizowana. Główną siłą perswazji są tu ekologiczne i ekonomiczne bariery pozbywania się uciążliwych odpadów. Można oczekiwać, że w następnym dziesięcioleciu osady większości krajowych oczyszczalni ścieków będą uzdatnione do rekultywacyjnego i nawozowego użytkowania.

### **Skład chemiczny osadów ściekowych**

Zawartość substancji organicznej w przefermentowanych (znacznie zminimalizowanych) osadach ściekowych wynosi około 50% suchej masy. W surowych osadach z biologicznego oczyszczania ścieków substancja organiczna stanowi ponad 75% s.m. Najczęściej spotykana zawartość azotu w przefermentowanych osadach wynosi 2,5–3,5% s.m., a w surowych nawet powyżej 7% s.m. Osady obfitują w fosfor, którego zawartość dochodzi do kilku, a niekiedy nawet kilkunastu procent (w przeliczeniu na  $P_2O_5$ ) s.m. Udział wapnia (głównie w postaci  $CaCO_3$  i  $CaSO_4$ ) wynosi kilka do kilkunastu procent s.m.

Spośród makroskładników tylko zawartość potasu jest znikoma w osadach ściekowych. Zawartość pozostałych składników jest większa (nawet wielo-

krotnie) niż w kompostach i oborniku. Zawartość metali ciężkich w osadach polskich oczyszczalni w latach 1977–1994 przedstawia tabela 1 (Wasiak 1995).

(Siuta i in. 1973, 1988). Zastosowano 500 m<sup>3</sup> osadu na hektar rekultywowanego gruntu, który wymieszano z podłożem do głębokości 30–35 cm, tworząc korzystne

TABELA 1. Zawartość metali ciężkich w polskich oczyszczalniach w latach 1975–1994 (% s.m.)

Metal	Osady polskie w latach 1977–1994		Osady szwajcarskie w latach 1975–1989	Osady oczyszczalni "Czajka" w Warszawie I–IV 1993 r.	Dopuszczalne wartości stężeń metali w osadach wg PIOŚ przy wydaniu decyzji z 25.07.90
	zawartości ekstremalne	najczęściej stwierdzane zawartości			
Ołów	58–2970	100–500	100–300	150	500
Kadm	8–562	1–20	1–3	70	10
Cynk	1150–10000	2500–4000	900–1800	2600	2000
Miedź	14–1250	200–500	200–500	750	800
Nikiel	3–950	100–300	20–60	210	100
Chrom	8–17075	250–700	50–200	860	500

Kraje Wspólnoty Europejskiej i Ameryki Północnej określiły dopuszczalne zawartości metali ciężkich w osadach przeznaczonych do rolniczego (nawozowego) użytkowania. W wielu przypadkach są one bardziej tolerancyjne od polskich zaleceń (Siuta i in. 1982; Bernacka, Pawłowska 1994; Wasiak 1995).

### Badawcze i wdrożeniowe doświadczenia rekultywacyjnego stosowania osadów ściekowych

Znajomość chemicznych i biologicznych właściwości osadów ściekowych, poparta pilotowym doświadczeniem, pozwoliła zastosować (w 1974 r.) osad z gdańskiej oczyszczalni ścieków do ukształtowania gleby z morskiego piasku (podobnego do plażowego) i szaty roślinnej na terenie budowanego wówczas Portu Północnego

warunki do życia traw, krzewów i drzew.

Kompleksowe badania rekultywacyjnej użyteczności osadów ściekowych przeprowadzono w latach 1974–1976 na potrzeby projektowania budowy oczyszczalni ścieków dla prawobrzeżnej Warszawy (Siuta i in. 1976). Wielowariantowe, rekultywacyjne doświadczenia przeprowadzono na: 1) porolniczych nieużytkach, 2) bezglebowych gruntach kopalni piasku, 3) modelowych gruntach (w mikropoletkach o powierzchni 1,8 × 1,8 m) ukształtowanych z piasku luźnego, gliny, popiołu Elektrociepłowni "Żerań". Płodnotwórcze efekty rekultywacyjnego zastosowania osadu ściekowego porównano z kompostem, rozdrobnionymi odpadami komunalnymi, ziemią próchniczną. Jednym z wariantów tego doświadczenia był sam osad (warstwa 50 cm). Wszystkie modelowe grunty zalegały na piaskowym podłożu. Strukturę rocznych i wielolet-

nich plonów roślin z mikropoletkowego doświadczenia rekultywacji modelowych gruntów przedstawia rysunek 1.

Najwyższe plony uzyskano z 50-centymetrowej grubości podłoży:

- tarchomińskiej grzybni odkwaszonej wapnem,
- osadu ściekowego,
- gliny użyźnionej osadem ściekowym.

Popiołowe podłoże użyźnione osadem ściekowym dało bardzo dobre plony roślin w latach 1978–1980, nie dało żadnego plonu w pierwszym roku (1977) doświadczenia.

W latach 1978–1980 popiołowe podłoże użyźnione osadem ściekowym dały większe plony od glinowych podłoży z takimi samymi dawkami osadów ściekowych. Świadczy to o bardzo wysokich glebotwórczych walorach popiołu. Płodnotwórczą efektywność osadowych i osadowo-piaskowych (5% osadu + 95% objętości piasku) podłoży zbadano w lizymetrycznym doświadczeniu, uprawiając kolejno: grykę, mieszanek traw, kupkówkę pospolitą, kukurydzę. Pochodzenie (wykaz oczyszczalni) osadów ściekowych i zawartość w nich podstawowych składników przedstawia rys. 2, a plonotwórczą efektywność rysunek 3.

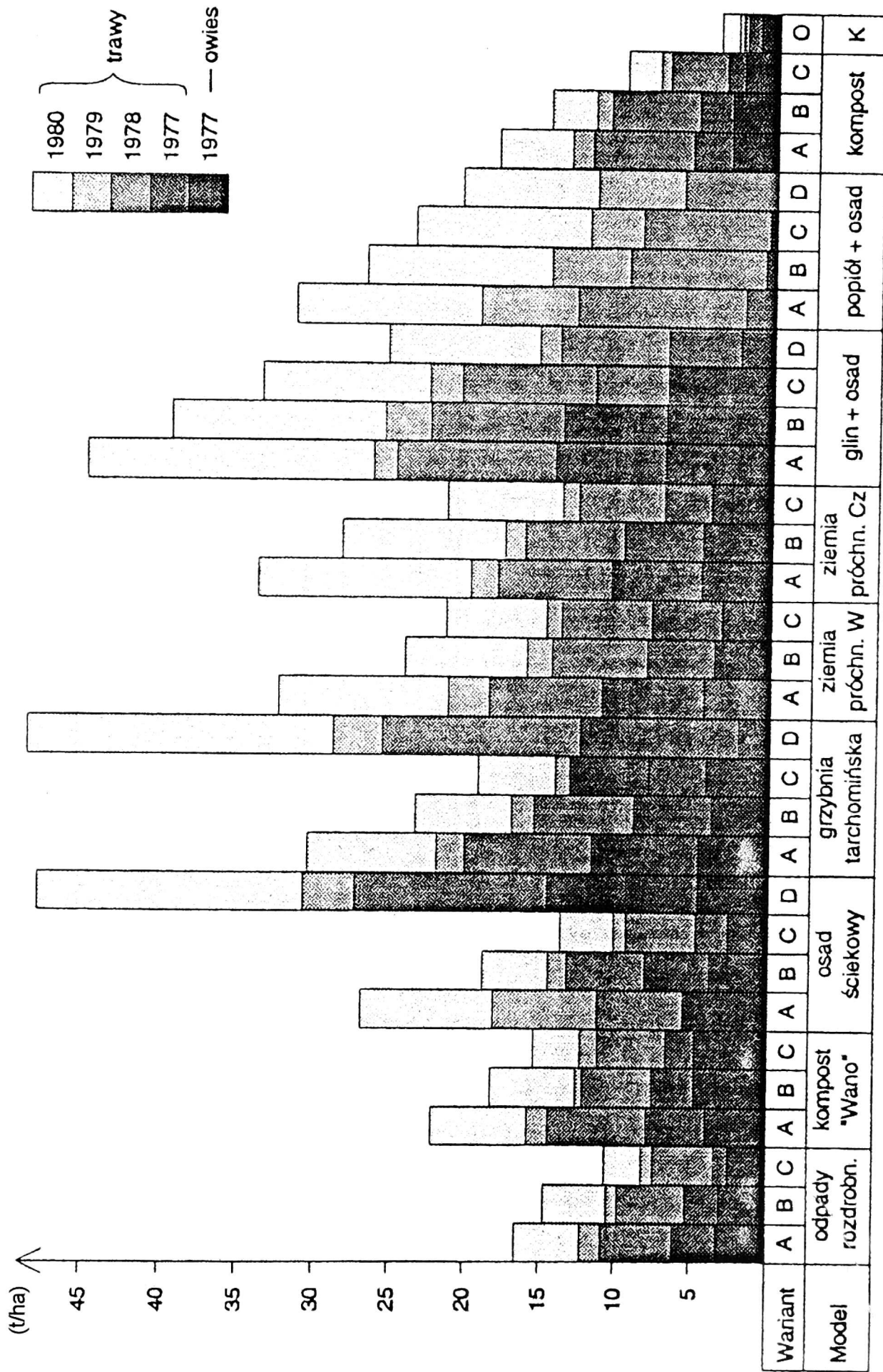
Iloraz plonów roślin z osadowych podłoży do plonu z podłoża piaskowego wahał się od 2,9 do 5,8, a z osadowo-piaskowych podłoży do piaskowego podłoża od 2,0 do 4,5. Wyjątek stanowiły osady z Piaseczna i Sażyny, które zawierały bardzo duże ilości metali ciężkich i substancji toksycznych dla roślin. Wnioski i zalecenia dla praktyki opublikowano w 1982 roku (Siuta, Wasiak, Pasińska), a monografię badań w 1988 r. (Siuta i in.).

Mając na względzie nadmierne zawartości metali ciężkich i chorobotwórczych mikroorganizmów oraz uprzedzenia ludności względem nawozowego użytkowania osadów ściekowych, a jednocześnie konieczność efektywnego unieszkodliwiania osadów z jednej strony oraz ochronnego i krajobrazotwórczego zazieleniania pyłących i erodowanych składowisk odpadów przemysłowych, podjęto prace nad skojarzonym likwidowaniem obu uciążliwości.

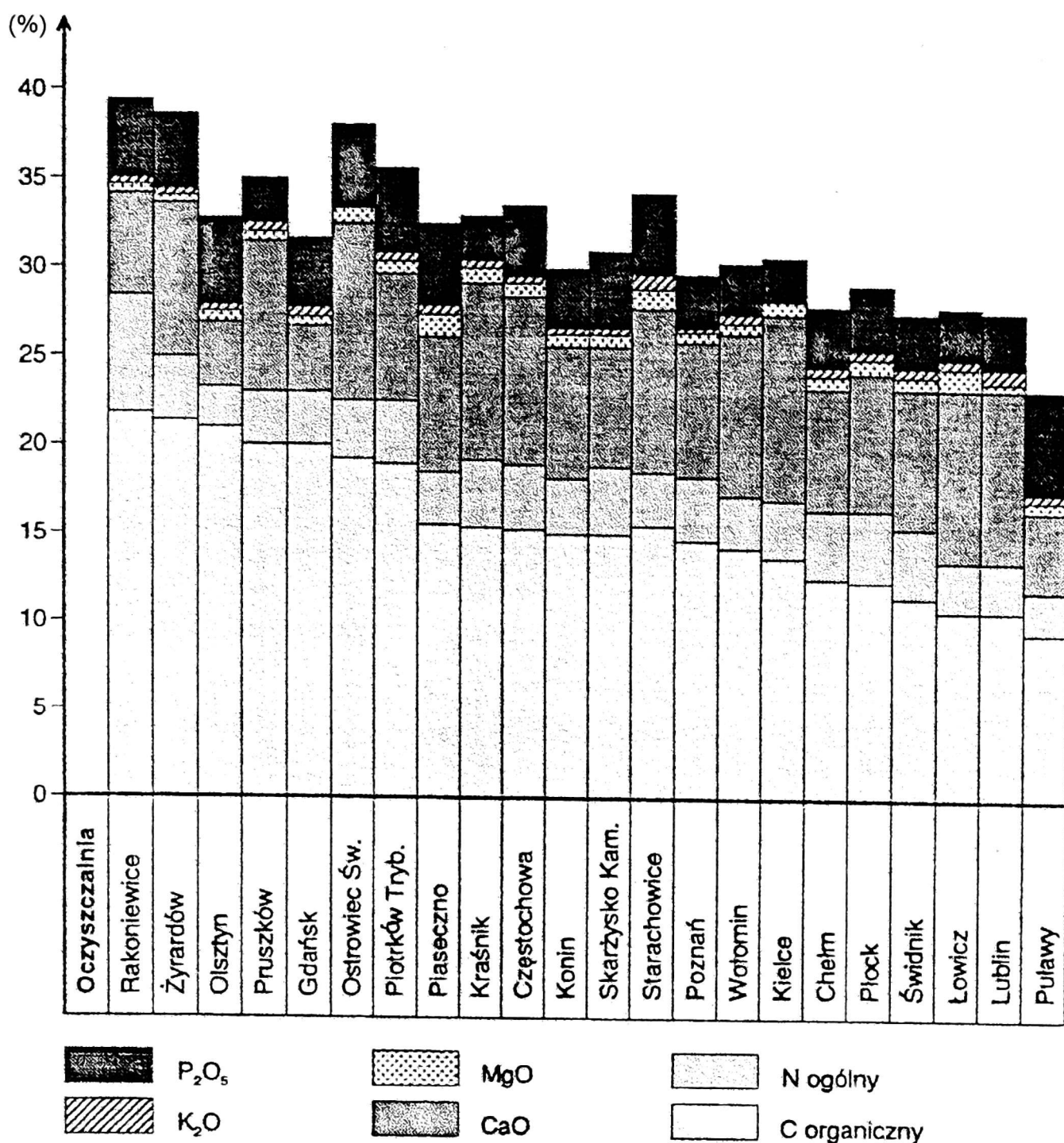
Duże przemysłowe składowiska odpadów są właściwymi obiektami nie tylko do rekultywacyjnego stosowania osadów ściekowych, lecz także do bardzo intensywnej uprawy roślin przerabianych na kompost. Osad może być stosowany (corocznie lub w większych odstępach czasu) w dużych dawkach, zapewniających obfitość składników pokarmowych i korzystne warunki wodne.

Ekologiczne funkcje intensywnego wzrostu roślin na składowiskach odpadów przemysłowych nie sprowadzają się do ochrony atmosfery i przyległych terenów, lecz także zmniejszają lub eliminują głębłą infiltrację wód opadowych, chroniąc podziemne i powierzchniowe wody przed zanieczyszczeniem. Na bardzo dobrze użyźnionym gruncie głównym czynnikiem ograniczającym produkcję masy roślinnej jest niedobór wody. Wiosenno-letnie zasoby wody opadowej są w całości pobierane przez korzenie roślinności trawiastej, zanim zdążą przedostać się poniżej darniowej warstwy. Te właściwości roślin wykorzystuje się nawet do odwadniania osadów płynnych i mazistych w lagunach i poletkach osadowych oraz na placach składowania





RYSUNEK 1. Struktura plonów siana w mikropoletkowym doświadczeniu rekultywacji gruntu pokopalnianego: A – 500 m<sup>3</sup>/ha; B – 250 m<sup>3</sup>/ha; C – 100 m<sup>3</sup>/ha; D – 50-centymetrowa warstwa; O – bez rekultywacyjnego użyźnienia



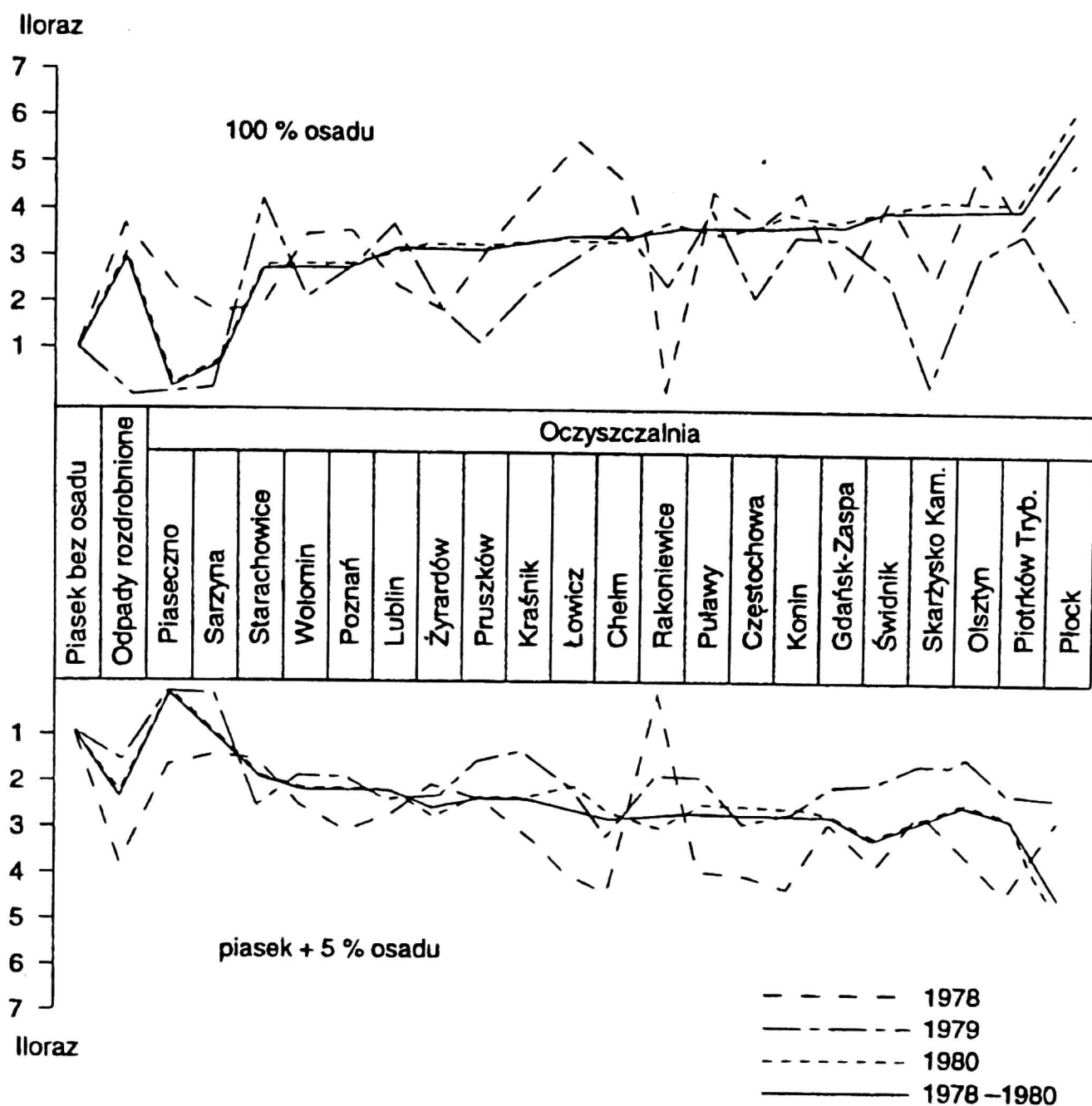
RYСУNEK 2. Średnie zawartości składników nawozowych w osadach komunalnych oczyszczalni ścieków

i dosuszania osadów mechanicznie odwodnionych.

Oczyszczalnie ścieków: "Hajdów" w Lublinie, "Czajka" w Warszawie, w Jeleńskiej Górze, w Łasku, w Piotrkowie Trybunalskim stosują już roślinną transformację osadów płynnych i mechanicznie odwodnionych.

Rekultywacyjne użytkowanie osadu (z oczyszczalni ścieków w Stalowej Woli) jest daleko zaawansowane (około 25 ha w 1995 r.) w Kopalni Siarki "Jeziórko", mimo że doświadczenia zapoczątkowano tu dopiero wiosną 1994 r.

Pilotowo-wdrożeniowe doświadczenie zastosowania osadu ściekowego do



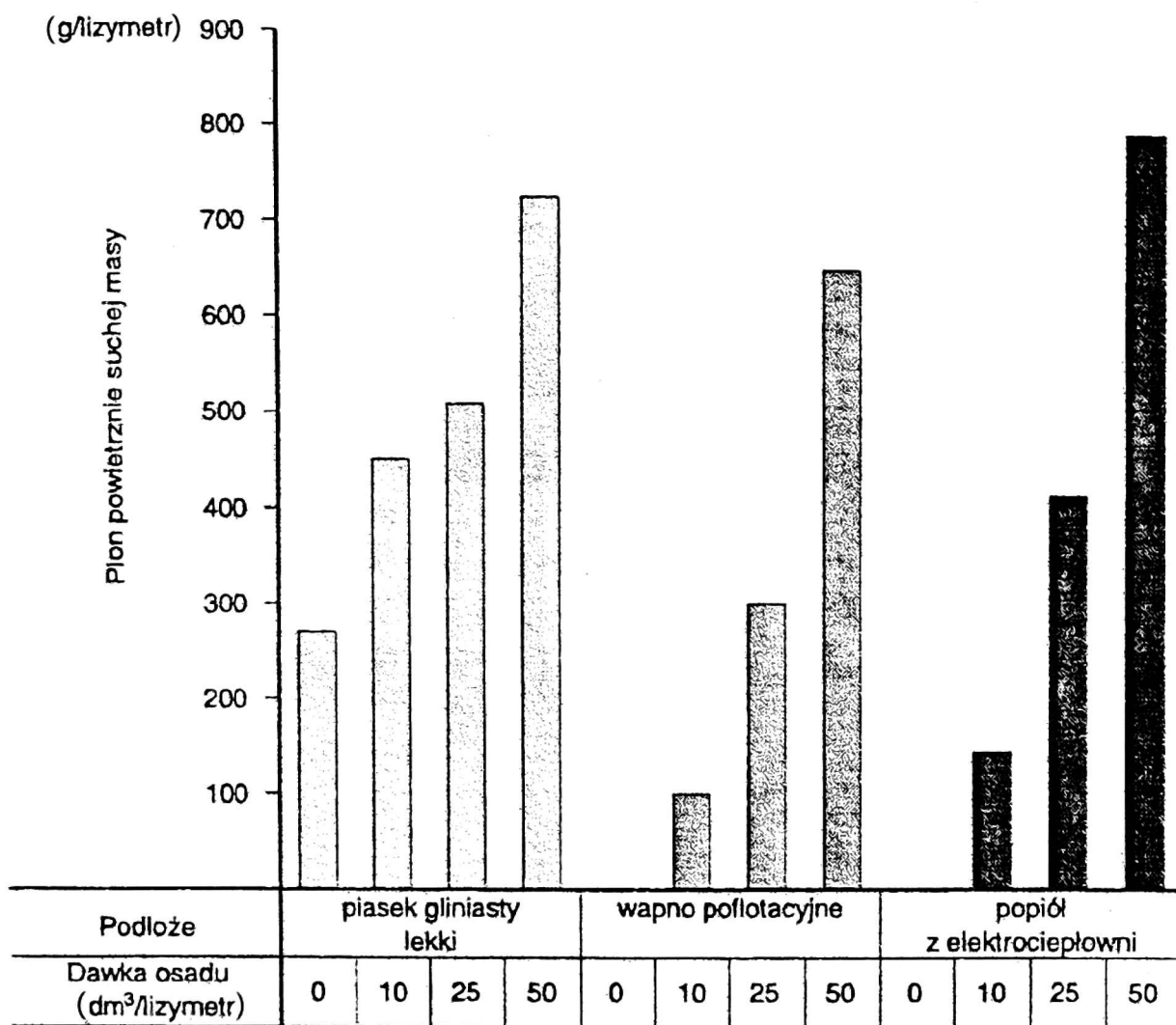
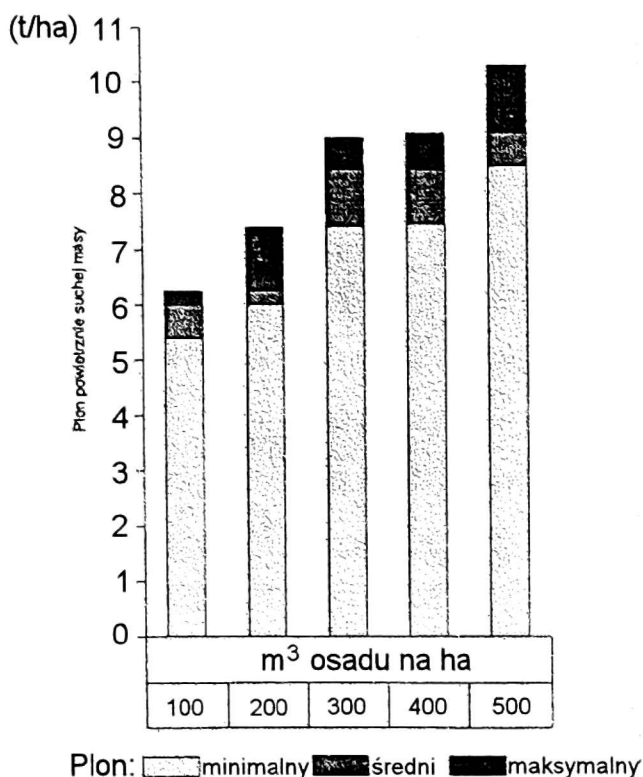
RYSUNEK 3. Iloraz suchej masy plonów roślin z podłoży osadowych i osadowo-piaskowych w stosunku do podłoża piaskowego

rekultywacji popiołowego gruntu i przerobu masy roślinnej na kompost (zapoczątkowane wiosną 1994 roku) dało bardzo wysokie plony roślin (rys. 4) o korzystnym składzie chemicznym.

Wstępne wyniki plonotwórczego działania osadu ściekowego na podłożach popiołu z Elektrociepłowni "Siekierki", poflotacyjnego wapna z Machowa i piasku gliniastego lekkiego w lizy-

metrycznym doświadczeniu przedstawia rysunek 5, a zawartość składników w roślinach tabela 2.

Zawartość makroskładników i metali ciężkich jest bardzo korzystna do produkcji kompostu. Również rośliny z płynnych i mazistych podłoży osadowych nie zawierają takich ilości metali ciężkich, które dyskwalifikowałyby kompostową ich użyteczność (tab. 3).



RYSUNEK 5. Plonotwórcze działanie osadu ściekowego na bezglebowych podłożach w lizymetrycznym doświadczeniu (zbiory roślin od 03.08.94 do 06.09.95 r.)



TABELA 2. Zawartość składników mineralnych w roślinach lizymetrycznego doświadczenia rekultywacyjnej efektywności osadu ściekowego na bezglebowych podłożach; zbiór roślin 28.06.1995 r.

Dawka osadu (dm <sup>3</sup> /lizymetr)	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Pb	Cu	Cd	Ni	Cr
mg/kg suchej masy											
<b>popiołowe podłoże</b>											
10	1,52	0,23	2,25	0,61	0,49	33,2	0,9	5,9	0,08	2,4	0,7
25	1,58	0,25	2,52	0,49	0,47	36,5	0,6	6,6	0,05	2,7	0,8
50	2,40	0,29	2,92	0,44	0,42	42,2	0,9	9,0	0,05	3,3	1,4
<b>wapienne podłoże</b>											
10	1,14	0,23	1,93	0,86	0,42	131,5	1,5	7,1	0,26	5,5	0,7
25	1,32	0,21	1,59	0,93	0,52	92,0	1,0	6,9	0,31	5,9	0,6
50	1,70	0,28	1,26	0,92	0,56	83,0	0,7	8,5	0,18	5,8	0,6
<b>piaskowe podłoże</b>											
10	1,86	0,24	1,26	2,28	0,48	44,5	1,0	9,3	0,07	5,2	1,1
25	1,99	0,28	1,82	1,26	0,46	50,5	1,0	7,6	0,09	4,8	0,7
50	2,53	0,26	1,73	0,77	0,43	38,5	0,8	9,7	0,04	3,8	0,5
<b>osadowe podłoże</b>											
15 cm warstwa	2,91	0,28	1,25	0,86	0,58	88,5	1,1	11,3	0,07	8,1	0,6
30 cm warstwa	3,01	0,38	1,53	1,58	0,48	203,5	1,9	6,7	0,14	4,2	0,9

TABELA 3. Liczebność zbadanych prób roślin (z osadowych podłoży) o zawartości metali ciężkich w przedziałach od bardzo małych do dużych ilości oraz porównanie tych danych z dopuszczalnymi zawartościami dla kompostu Dano w Polsce i kompostu roślinnego w Niemczech [Siuta 1995]

Metal	Liczba prób o zawartości składnika (mg/kg s.m.)										Dopuszczalne zawartości (mg/kg s.m.)		Kompost Dano	roślinny Niemcy; Mayer	
	do 1	1,1-2,0	2,1-3,0	3,1-5,0	5,1-10,0	10,1-20,0	20,1-50,0	50,1-100,0	100,1-200,0	200,1-300,0	300,1-500,0	500,1-1000			BN-89/9103-09
Miedź			7	32	23	6	1						300	600	100
Cynk						3	16						1500	2500	400
Chrom	15			2	1								300	500	100
Nikiel	8	8		4	3	4							100	200	50
Kadm	39	6	2	2	1								5	15	1,5
Ołów	20	15	6	12	3		1						350	500	150

## Sposoby przyrodniczego użytkowania osadów ściekowych

Osady mogą być stosowane do:

- ukształtowania szaty roślinnej na poeksploatacyjnych składowiskach odpadów przemysłowych i komunalnych,
- roślinnego utrwalania powierzchni pyłących i narażonych na rozmywanie przez wody opadowe,
- plantacyjnej uprawy drzew i krzewów,
- szkółkarskiej uprawy drzew i krzewów,
- melioracyjnego użyźnienia gleb rolniczo nieefektywnych,
- nawożenia użytków rolnych (zwłaszcza gruntów ornych),
- produkcji kompostu roślinnego.

Spośród wymienionych pierwsze dwa i ostatni sposób będą dominującymi do czasu wydatnej poprawy technologii transformacji fizycznych i biologiczno-sanitarnych właściwości osadów oraz zmniejszenia w nich zawartości metali ciężkich.

Duże możliwości użytkowania osadów ma też plantacyjna produkcja drzew na suchogruntowych nieużytkach i nieefektywnych gruntach rolnych. Nawozowe użytkowanie osadów ściekowych w rolnictwie będzie miało duże zastosowanie nie wcześniej niż po roku 2005. W dalszej przyszłości nawozowe użytkowanie osadów będzie dominowało, tak jak ma to już miejsce w najbardziej rozwiniętych krajach Europy i Ameryki Północnej.

## Zastosowanie osadów ściekowych do biologicznej rekultywacji bezglebowych gruntów

Gruntami bezglebowymi są: 1) naturalne utwory geologiczne pozbawione pokrywy glebowej wskutek różnego rodzaju robót ziemnych, erozji wodnej i wietrznej, masowych ruchów ziemi; 2) zwałowiska i nasypy naturalnych mas ziemnych, 3) składowiska mineralnych odpadów przemysłowych, 4) wysypiska odpadów bytowo-gospodarczych, 5) gleby silnie zdegradowane.

Zwarte i sumarycznie duże obszary gruntów bezglebowych stanowią:

- składowiska odpadów paleniskowych (popiołów i żużla),
- zwałowiska nadkładu w górnictwie odkrywkowym, zwłaszcza węgla brunatnego,
- zwałowiska odpadów górnictwa podziemnego, zwłaszcza węgla kamiennego,
- składowiska odpadów z flotacji rudy miedzianej i siarkowej (zagłębia miedziane i siarkowe),
- składowiska odpadów chemicznych: wapna posodowego, wapna pokarbidowego, fosfogipsu, osadów poneutralizacyjnych,
- składowiska odpadów hutniczych,
- naturalne grunty zdegradowane chemicznie,
- porolnicze grunty zdegradowane przez niewłaściwe użytkowanie i erozję wietrzną.

Od porekultywacyjnego sposobu użytkowania gruntu zależy jego chłonność w stosunku do osadu ściekowego.

Najbardziej osadochłonne i długotrwałe jest agrotechniczne przetwarzanie

osadów ściekowych na kompost. Drugie miejsce pod względem osadochłonności należy do plantacyjnej uprawy drzew i krzewów. W obu przypadkach rośliny są bardzo intensywnie żywione osadowymi składnikami, a obfita masa roślinna jest przetwarzana na kompost lub użytkowana energetycznie czy też jako surowiec drzewny.

Osad ściekowy stosuje się tu nie tylko do ukształtowania szaty roślinnej, lecz także do ciągłej intensywnej produkcji biomasy. Pozwala to na kojarzenie potrzeb: 1) biologicznej rekultywacji gruntów bezglebowych, 2) unieszkodliwiania osadów ściekowych (odpadu), 3) porekultywacyjnego użytkowania gruntu, 4) minimalizacji nakładów na rekultywację gruntów i unieszkodliwianie osadów, 5) transformację odpadów do postaci roślinnych surowców.

Dużą zaletą omawianych sposobów jest możliwość długotrwałego stosowania wysokich dawek osadów ściekowych (na jednostkę powierzchni) bez zagrożenia dla wód gruntowych oraz dla jakości surowca roślinnego. Przy tak dużym użyźnieniu gruntu intensywność wegetacji jest limitowana wielkością opadów atmosferycznych i podsiękiem wód gruntowych. Woda opadowa nie infiltruje więc do wód podziemnych, lecz jest w całości pobierana przez rośliny i wyparowywana do atmosfery.

### Wnioski

Osady z biologicznego oczyszczania ścieków mogą być stosowane do:

- ukształtowania szaty roślinnej oraz produkcji niekonsumpcyjnej masy

- roślinnej na składowiskach odpadów przemysłowych i komunalnych;
- roślinnego utrwalania powierzchni pylących i narażonych na rozmywanie przez wody opadowe;
  - plantacyjnej uprawy drzew i krzewów;
  - melioracyjnego użyźniania nieefektywnych gruntów rolnych;
  - nawożenia użytków rolnych.

Spośród wymienionych pierwsze trzy sposoby będą dominowały do czasu wydatnego zmniejszenia zawartości metali ciężkich i chorobotwórczych organizmów w osadach. W miarę postępu chemicznej i biologicznej sanitacji nawozowe użytkowanie osadów będzie rosło.

## Literatura

- BERNACKA J., PAWŁOWSKA L. 1994: *Zagospodarowanie i wykorzystanie osadów z miejskich oczyszczalni ścieków*. IOŚ, Warszawa.
- HALL J.E. 1991: *Alternative uses for sewage sludge*. Pergamon Press, Oxford New York.
- KOZŁOWSKA B. 1995: *Zastosowanie osadu ściekowego do biologicznego zagospodarowania składowisk popiołów lotnych. Problemy gospodarki osadowej w oczyszczalniach ścieków*. UNI-SERVICE Sp. z o.o. Częstochowa, 259-270.
- SIUTA J. 1995: *Wzrost i chemizm roślin na osadach ściekowych. Problemy gospodarki osadowej w oczyszczalniach ścieków*. UNI-SERVICE Sp. z o.o. Częstochowa; 259–270.
- SIUTA J. 1995a: *Przyrodnicze użytkowanie osadów ściekowych*. *Ekoinżynieria* 2(3); 10–14.
- SIUTA J. i in. 1973: *Projekt rekultywacji gruntów oraz urządzenia zieleni w Porcie Północnym i strefie ochronnej*. IUNG Puławy (maszynopis).
- SIUTA J. i in. 1976: *Sposoby i program rolniczej utylizacji osadu ściekowego z prawobrzeżnej Warszawy*. IKŚ (IOŚ) Warszawa (maszynopis).
- SIUTA J. i in. 1988: *Przyrodnicze zagospodarowanie osadów ściekowych*. PWN, Warszawa.
- SIUTA J., WASIAK G. 1995: *Agrotechniczna transformacja osadu na kompost roślinny i osadowy w warunkach Oczyszczalni "Hajdów"*. IOŚ, MPWiK, Lublin.
- SIUTA J., WASIAK G., KOZŁOWSKA B. 1993: *Agrotechniczne przetwarzanie osadów ściekowych na kompost. Część II. Roślinne zagospodarowanie bezglebowych gruntów użyźnionych osadem ściekowym*. *Ekologia i Technika* 4; 10–14.
- SIUTA J., WASIAK G., PASIŃSKA Cz. 1982: *Warunki i sposoby przyrodniczego zagospodarowania osadów z oczyszczalni ścieków miejskich*. *"Człowiek i Środowisko"* 6(1–2), 155–183.
- WASIAK G. 1995: *Wytwarzanie, właściwości i gospodarka osadami ściekowymi w Polsce na tle zachodniej Europy i USA. Część I*. *Ekoinżynieria* 3(4); 8–11.

### Adres autora

J. Siuta  
Instytut Ochrony Środowiska  
00–548 Warszawa, ul. Krucza 5/11D