

AKTYWNOŚĆ ENZYMATYCZNA JAKO WSKAŹNIK
REKULTYWACJI GLEBY NA TERENIE PO OTWOROWEJ
EKSPLOATACJI SIARKI

ELŻBIETA JOLANTA BIELIŃSKA, ANNA SŁOWIŃSKA-JURKIEWICZ

Akademia Rolnicza, Instytut Gleboznawstwa i Kształtowania Środowiska, ul. Leszczyńskiego 7, 20-069 Lublin

KOMUNIKAT

Key words: reclamation, anthropogenic soil, enzymatic activity, borehole sulphur-mine.

ENZYMATIC ACTIVITY AS AN INDEX OF SOIL RECLAMATION ON THE FORMER
BOREHOLE SULPHUR-MINE AREA

The paper presents results of the research on the influence of sewage sludge on the enzymatic activity of the anthropogenic soil on the area of the former borehole sulphur-mine as well as the effectiveness of sewage sludge utilization for forest-meadow reclamation of this ground.

Streszczenie

Badano wpływ osadu ściekowego na aktywność enzymatyczną pokrywy glebowej na terenie po otworowej kopalni siarki w celu oceny możliwości jego wykorzystania w leśno-łąkowej rekultywacji terenów Kopalni Siarki „Jeziórko”. Wyniki, uzyskane po sześciu latach od zastosowanych zabiegów rekultywacyjnych wskazują, że osad ściekowy, dodany w odpowiedniej dawce, wpływał na ogół korzystnie na właściwości biochemiczne i chemiczne gleby. Oznacza to, że zastosowany osad może być brany pod uwagę, jako jeden ze środków służących do rekultywacji gruntów toksycznych.

WPROWADZENIE

W rekultywacji poprzemysłowych nieużytków mogą być wykorzystane osady ściekowe [10, 18]. Są one zasobne w koloidy organiczne, azot i fosfor. Istotą procesu rekultywacji są przemiany biogeochemiczne zachodzące w gruncie pogórnym pod wpływem czynników abiotycznych i biotycznych, stymulujące i przyspieszające te przemiany [3]. Aktywność enzymatyczna jest dość często używana do oceny stopnia rozwoju procesów glebotwórczych industrioziemów. W Polsce badania w tym zakresie prowadzili Bender i Gilewska [4].

Celem niniejszej pracy było zbadanie wpływu osadu ściekowego na aktywność enzymatyczną pokrzywy głebowej na terenie po otworowej eksploatacji siarki oraz możliwość jego wykorzystania w leśno-łąkowej rekultywacji terenów poeksploatacyjnych w górnictwie otworowym siarki.

MATERIAŁ I METODYKA

Badania zlokalizowano na terenie po otworowej eksploatacji siarki w Jeziórku, miejscowości położonej między Tarnobrzegiem a Stalową Wolą. Obszar ten należy do mezoregionu Równiny Tarnobrzkiej. Region ten zbudowany jest z piasków rzecznych, miejscami tworzących duże kompleksy wydymowe. Plejstocenijskie piaski zanurzają się na peryferiach pod aluwialne mady holocenu. W podłożu tych osadów zalega miocen z pogipsową serią siarkonośną.

Rekultywacja terenów Kopalni Siarki „Jeziórko”, rozpoczęta na początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia, obejmowała zneutralizowanie przekształceń chemicznych, geomechanicznych i hydrologicznych.

Badania aktywności enzymatycznej gleby antropogenicznej na terenie po otworowej eksploatacji siarki przeprowadzono w oparciu o doświadczenie polowe założone w 1994 roku. Etapy rekultywacji obejmowały: likwidację infrastruktury górniczej, usuwanie zanieczyszczeń siarkowych, ukształtowanie powierzchni przy użyciu spychaczy, regulację stosunków wodnych, neutralizację obszaru przy użyciu wapna poflotacyjnego, zastosowanego w dawce $300 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Następnie, tj. w 1994 roku zastosowano osad ściekowy z oczyszczalni ścieków komunalnych ze Stalowej Woli: 1) w postaci płynnej o zawartości suchej masy około 10% (wtórnice uwodnione osad mazisty) i 2) w postaci mazistej o zawartości suchej masy około 20%. W celu uzyskania jednakowych dawek osadu w przeliczeniu na suchą masę gleby w dwóch blokach wyznaczono po 6 poletek. Powierzchnia każdego poletka w jednym bloku wynosiła 0,1 ha, a w bloku drugim 0,2 ha. Na poletkach o powierzchni 0,1 ha zastosowano osad ściekowy płynny (10% suchej masy), a na poletkach o powierzchni 0,2 ha osad ściekowy mazisty (20% suchej masy). Osady te zastosowano w następujących ilościach: 0, 100, 200, 300, 400 i $500 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. Osady wymieszano z wierzchnią warstwą gleby za pomocą brony talerzowej, a następnie wysiano mieszankę traw: lucerna $22 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, kupkówka $20 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ oraz rzepik $8 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Nasiona wysiano ręcznie, każdy gatunek metodą „na krzyż”, po czym wykonano uprawę w kolejności: brona talerzowa i wałowanie.

Niektóre właściwości chemiczne osadu ściekowego, wapna poflotacyjnego i badanej gleby przed rekultywacją zamieszczono w tabelach 1–3.

Tabela 1. Niektóre właściwości chemiczne osadu ściekowego
Some chemical properties of sewage sludge

pH _{KCl}	C _{org.}	N _{org.}	P _{org.}	Ca	K _{org.}	Zn	Pb	Cd	Ni	Cr	Cu
	(g·kg ⁻¹)					(mg·kg ⁻¹)					
7,5	390,2	18,7	21,8	6,8	5,9	804,8	62,9	4,1	47,0	258,1	137,4

Według Załącznika 1 do rozporządzenia Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnych z dnia 11 sierpnia 1999 roku w sprawie warunków, jakie muszą być spełnione przy wykorzystywaniu osadów ściekowych na cele nieprzemysłowe (Dz. U. nr 72, poz. 813) stosowany osad ściekowy spełniał wymagane normy.

Tabela 2. Niektóre właściwości chemiczne wapna poflotacyjnego
Some chemical properties of post flotation lime

pH _{KCl}	Hh	C _{org.}	CaCO ₃	S _{og.}	S-SO ₄ ⁻²
	(cmol(+):kg ⁻¹)	(g:kg ⁻¹)			
6,9	0,6	7,4	731,0	30,0	0,8

Próbki gleby do badań enzymatycznych pobrano z dwóch warstw: 0–20 i 20–30 cm, w maju 2000 roku. Ze względu na niejednorodność materiału glebowego próbki pobierano w 6 replikacjach z każdego poletka. Próbki indywidualne uśredniano w obrębie analizowanych obiektów doświadczalnych i wykonywano w nich analizy biochemiczne i chemiczne w trzech powtórzeniach. Oznaczono aktywność: fosfataz [19], ureazy [21] i proteazy [12]. Dodatkowo oznaczono podstawowe właściwości chemiczne gleby, zgodnie z procedurami analitycznymi [13]: odczyn gleby w 1 mol·dm⁻³ KCl (pH_{KCl}) – potencjometrycznie, kwasowość hydrolityczną (Hh) – metodą Kappena, zawartość CaCO₃ – metodą Scheiblera, zawartość węgla organicznego ogółem – metodą Tiurina, zawartość siarki ogółem i siarki siarczanowej – metodą nefelometryczną.

Tabela 3. Niektóre właściwości chemiczne gleby przed rekultywacją
Some chemical properties of soil before reclamation

Warstwa Layer (cm)	pH _{KCl}	Hh	C _{org.}	CaCO ₃	S _{og.}	S-SO ₄ ⁻²
		(cmol(+):kg ⁻¹)	(g:kg ⁻¹)			
0–20	2,0	4,24	4,40	0,0	65,0	0,08
20–30	3,3	3,25	2,00	0,0	50,0	0,08
\bar{x}_{0-30}	–	3,74	3,20	0,0	57,5	0,08

Pod względem warunków klimatycznych obszar, na którym znajduje się Kopalnia Siarki „Jeziórko” leży w radomskiej dzielnicy rolniczo-klimatycznej. Dzielnica ta charakteryzuje się (w porównaniu z sąsiednimi) łagodnym klimatem. Średnia roczna temperatura powietrza wynosi +8,5°C, średnia temperatura stycznia -3,2°C, lipca +18°C. Liczba dni zimowych wynosi mniej niż 50. Przymrozki występują w czasie 115–117 dni. Okres wegetacyjny trwa ok. 210 dni. Średni opad roczny (za okres 1931–1960) wynosi ok. 600 mm. Około 60–70% opadów przypada na okres wegetacji. Najwyższe miesięczne opady przypadają na miesiące letnie. Pokrywa śnieżna występuje od I dekady grudnia, a znika w II dekadzie marca. Liczba dni z pokrywą śnieżną jest mniejsza niż 60. Wiatr o niewielkich na ogół prędkościach wieje głównie z zachodu. Według danych pochodzących ze stacji meteorologicznej w Sandomierzu średnia miesięczna temperatury powietrza i suma opadów w maju 2000 roku (okres pobierania próbek gleby do badań) wynosiła odpowiednio: 14,8°C (średnia wieloletnia 13,6°C) i 53 mm (średnia wieloletnia 57 mm). Warunki meteorologiczne w okresie pobierania próbek gleby do badań nie odbiegały zasadniczo od średniej wieloletniej dla tego regionu.

WYNIKI BADAŃ

Rezultaty badań przedstawione w tabelach 4–6 wskazują na wyraźne zróżnicowanie pomiędzy właściwościami gleby w obrębie poletek kontrolnych. Zjawisko to związane jest ze specyfiką otworowej eksploatacji siarki, którą cechuje bardzo duża zmienność powierzchniowa zarówno zaszarczenia gleby, jak i innych zanieczyszczeń (gazowych, ciekłych i stałych) emitowanych z wyjątkowo licznych liniowych i punktowych uzbrojeń terenu [16].

Należy jednak podkreślić, że czynniki doświadczenia istotnie różnicowały właściwości badanej gleby antropogenicznej. Odczyn gleby przed rekultywacją kształtował się poniżej 3,5 pH w 1 mol·dm⁻³ KCl, a kwasowość hydrolityczna wynosiła od 3,25 do 4,24 cmol(+).kg⁻¹ (Tab. 3). Po zastosowaniu wapna poflotacyjnego i osadu ściekowego gleba wszystkich obiektów badawczych cechowała się odczynem na poziomie odpowiadającym glebom zasadowym i niskimi wartościami kwasowości hydrolitycznej: od 0,30 do 0,87 cmol(+).kg⁻¹ (Tab. 4). W przypadku osadu mazistego odczyn gleby osiągnął nawet wartości 7,7 pH w 1 mol·dm⁻³ KCl. Zwiększona dawka osadu nie była skorelowana ze zmianami odczynu i kwasowości hydrolitycznej gleby.

Zastosowanie wapna poflotacyjnego wpłynęło na bardzo wysoką zawartość węglanów wapnia w glebie: od 322,0 do 624,0 g·kg⁻¹ w obiektach z osadem płynnym i od 434,0 do 639,0 g·kg⁻¹ w glebie z osadem mazistym (Tab. 4).

Po upływie sześciu lat od wprowadzenia do gleby osadu ściekowego zawartość C_{org} była istotnie większa tam, gdzie zastosowano najwyższe dawki tj.: 500 m³·ha⁻¹ w przypadku osadu płynnego oraz 400 i 500 m³·ha⁻¹ w przypadku osadu mazistego niż w glebie poletek kontrolnych. Gleba użyźniona osadem mazistym cechowała się kilkakrotnie większą zawartością C_{org} niż gleba z dodatkiem osadu płynnego. Mogło to być związane z niehomogenicznością gleby antropogenicznej, nie tylko w skali różnic pomiędzy jej poszczególnymi warstwami, ale i w mikroskali gruzelków i innych utworów glebowych, co w konsekwencji powoduje zróżnicowanie np. aeracji gleby i umożliwia swoistą koegzystencję procesów biologicznych, nawet jeżeli wymagają one przeciwnych warunków. Średnia zawartość C_{org} w powierzchniowej warstwie gleby (0–20 cm) była prawie 2-krotnie większa niż w warstwie 20–30 cm (Tab. 5). Stwierdzono istotną liniową zależność pomiędzy zwiększoną dawką osadu a zawartością C_{org} w glebie (R = 0,52; p = 0,05).

Zawartość siarki ogółem i siarki siarczanowej w glebie antropogenicznej kształtowała się na bardzo wysokim poziomie, odpowiednio: od 31,0 do 84,0 g·kg⁻¹ i od 0,65 do 1,45 g·kg⁻¹ (Tab. 5) i była wyższa niż w glebie przed rekultywacją (Tab. 3), co wiązało się z wprowadzeniem tych składników wraz z osadem. Tak dużą zawartość siarki w glebie antropogenicznej można tłumaczyć tym, że eksploatacji tego surowca towarzyszyły nierzadko awarie ciągów wydobywczych, czy niekontrolowane wypływy siarki na powierzchnię.

W glebie poletek z dodatkiem osadu mazistego zawartość S ogółem była wyraźnie mniejsza, zaś zawartość S-SO₄²⁻ większa niż w glebie z osadem płynnym. Mogło to mieć związek z większą aktywnością biochemiczną gleby zmeliorowanej osadem mazistym niż osadem płynnym (Tab. 6). W środowisku glebowym proces utleniania siarki elementarnej do siarczanów ma przede wszystkim charakter biochemiczny. Dokonują tego liczne bakterie z rodzaju *Thiobacillus*. Wykorzystują one egzotermiczne procesy utleniania S elementarnej jako źródło energii niezbędnej do asymilacji CO₂.

Nie wykazano korelacji pomiędzy badanymi formami siarki a dawką osadu.

Wprowadzenie do gleby osadu ściekowego spowodowało wyraźne zmiany jej

Tabela 4. pH_{KCl} , kwasowość hydrolityczna (Hh) i zawartość CaCO_3 w glebie antropogenicznej
 pH_{KCl} , hydrolytic acidity and content of CaCO_3 in anthropogenic soil

Obiekt Site	Warstwa Layer (cm)	pH_{KCl}		Hh		CaCO_3	
				(cmol(+) \cdot kg ⁻¹)		(g \cdot kg ⁻¹)	
		Rodzaj osadu					
		P	M	P	M	P	M
Gleba Soil	0–20	7,0	7,5	0,45	0,87	501,0	608,0
	20–30	7,0	7,7	0,45	0,70	570,0	555,0
	\bar{x}_{0-30}	–	–	0,45	0,78	535,5	581,5
Gleba + osad 100 m ³ ·ha ⁻¹ Soil + sludge 100 m ³ ·ha ⁻¹	0–20	6,9	7,5	0,37	0,70	322,0	528,0
	20–30	7,1	7,7	0,30	0,53	407,0	617,0
	\bar{x}_{0-30}	–	–	0,33	0,61	364,5	572,5
Gleba + osad 200 m ³ ·ha ⁻¹ Soil + sludge 200 m ³ ·ha ⁻¹	0–20	7,0	7,5	0,45	0,79	425,0	534,0
	20–30	7,0	7,6	0,45	0,70	586,0	618,0
	\bar{x}_{0-30}	–	–	0,45	0,74	505,5	576,0
Gleba + osad 300 m ³ ·ha ⁻¹ Soil + sludge 300 m ³ ·ha ⁻¹	0–20	7,0	7,4	0,45	0,70	549,0	434,0
	20–30	6,9	7,7	0,45	0,53	325,0	580,0
	\bar{x}_{0-30}	–	–	0,45	0,61	437,0	507,0
Gleba + osad 400 m ³ ·ha ⁻¹ Soil + sludge 400 m ³ ·ha ⁻¹	0–20	6,9	7,3	0,60	0,79	346,0	551,0
	20–30	6,9	7,6	0,60	0,53	570,0	472,0
	\bar{x}_{0-30}	–	–	0,60	0,66	458,0	511,5
Gleba + osad 500 m ³ ·ha ⁻¹ Soil + sludge 500 m ³ ·ha ⁻¹	0–20	6,9	7,6	0,67	0,70	436,0	539,0
	20–30	7,1	7,5	0,60	0,70	624,0	639,0
	\bar{x}_{0-30}	–	–	0,63	0,70	530,0	589,0
Średnia z obiektów Average for site	\bar{x}_{0-20}	–	–	0,50	0,76	430,0	539,0
	\bar{x}_{20-30}	–	–	0,48	0,61	514,0	582,0
NIR _{0,05} dla; LSD _{0,05} for:							
Warstwa · dawka; layer · dose		–	–	0,07	0,15	12,5	26,8
Dawka; dose		–	–	0,15	0,07	5,8	12,0
Warstwa; layer		–	–	n.i.	0,04	3,3	7,2

P – osad płynny; liquid sludge, M – osad mazisty; dewatered sludge

aktywności enzymatycznej (Tab. 6). Natężenie i kierunek powstałych zmian uzależnione były od rodzaju osadu, wielkości jego dawki oraz rodzaju badanego enzymu.

Zastosowany osad stymulował aktywność ureazy i proteazy w obydwu analizowanych warstwach gleby, przy czym oddziaływanie osadu w postaci mazistej było silniejsze niż osadu płynnego. Średnia aktywność powyższych enzymów w glebie z poletek zmeliorowanych osadem mazistym była około 2-krotnie większa niż w glebie z osadem płynnym. W stosunku do gleby bez nawożenia organicznego istotny wzrost aktywności ureazy i proteazy stwierdzono wyłącznie w obecności 300 i 400 m³·ha⁻¹ osadu. Wzbogacenie gleby osadem ściekowym wpływało hamująco na aktywność fosfataz. Efekt ten zaznaczył się najsilniej w warunkach stosowania największych dawek i był szczególnie wyraźny

Tabela 5. Zawartość C_{org} , siarki ogółem i siarczanów w glebie antropogenicznej Content of organic carbon, total sulphur and sulphate in anthropogenic soil ($g \cdot kg^{-1}$)

Objekt Site	Warstwa Layer (cm)	C_{org}		S_{og}		$S-SO_4^{-2}$	
		Rodzaj osadu					
		P	M	P	M	P	M
Gleba Soil	0-20	2,30	4,50	56,0	41,0	0,90	1,10
	20-30	1,70	3,70	53,0	50,0	0,80	1,15
	\bar{x}_{0-30}	2,00	4,10	55,5	45,5	0,85	1,12
Gleba + osad $100 m^3 \cdot ha^{-1}$ Soil + sludge $100 m^3 \cdot ha^{-1}$	0-20	1,69	5,15	79,0	51,5	0,75	1,12
	20-30	1,12	2,90	68,0	39,0	0,70	1,45
	\bar{x}_{0-30}	1,40	4,02	73,5	45,2	0,72	1,28
Gleba + osad $200 m^3 \cdot ha^{-1}$ Soil + sludge $200 m^3 \cdot ha^{-1}$	0-20	3,84	5,61	72,5	41,0	0,97	0,80
	20-30	1,01	4,28	61,0	47,0	0,95	1,10
	\bar{x}_{0-30}	2,42	4,94	66,7	44,0	0,96	0,95
Gleba + osad $300 m^3 \cdot ha^{-1}$ Soil + sludge $300 m^3 \cdot ha^{-1}$	0-20	1,68	5,31	60,5	45,0	0,75	1,06
	20-30	1,13	4,07	61,0	49,0	1,00	1,15
	\bar{x}_{0-30}	1,40	4,69	60,7	47,0	0,87	1,10
Gleba + osad $400 m^3 \cdot ha^{-1}$ Soil + sludge $400 m^3 \cdot ha^{-1}$	0-20	2,13	6,65	84,0	44,0	0,82	0,65
	20-30	1,22	3,90	58,0	31,0	0,80	1,15
	\bar{x}_{0-30}	1,67	5,27	71,0	37,5	0,81	0,90
Gleba + osad $500 m^3 \cdot ha^{-1}$ Soil + sludge $500 m^3 \cdot ha^{-1}$	0-20	4,30	9,17	73,0	45,0	0,75	0,80
	20-30	2,90	3,46	46,0	38,0	0,80	0,80
	\bar{x}_{0-30}	3,60	6,31	59,5	41,5	0,73	0,80
Średnia z obiektów Average for site	\bar{x}_{0-20}	2,65	6,06	70,9	44,8	0,81	0,92
	\bar{x}_{20-30}	1,51	3,72	57,8	42,3	0,84	1,13
NIR _{0,05} dla; LSD _{0,05} for:							
Warstwa · dawka; layer · dose		1,31	2,29	2,8	3,0	0,03	0,30
Dawka; dose		0,61	1,06	1,3	1,4	0,01	0,01
Warstwa; layer		0,35	0,61	0,7	0,8	0,01	n.i.

P – osad płynny; liquid sludge, M – osad mazisty; dewatered sludge

w glebie użyźnionej osadem mazistym. Należy podkreślić, że w glebie zmeliorowanej największą dawką osadu, tj. $500 m^3 \cdot ha^{-1}$ zaobserwowano osłabienie aktywności wszystkich badanych enzymów.

Aktywność enzymów wykazywała związki z dawką wprowadzonych osadów, lecz istotne wartości współczynników korelacji uzyskano tylko w przypadku aktywności ureazy i proteazy ($R = 0,35$ i $R = 0,38$; $p = 0,05$).

Tabela 6. Aktywność enzymatyczna gleby antropogenicznej
Enzymatic activity of anthropogenic soil

Obiekt Site	Warstwa Layer (cm)	Fosfatazy Phosphatases (mmol PNP·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)		Ureaza Urease (mg N-NH ₄ ⁺ ·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)		Proteaza Protease (mg tyrosine·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)	
		Rodzaj osadu					
		P	M	P	M	P	M
Gleba Soil	0-20	0,85	0,90	2,93	6,09	1,54	3,26
	20-30	0,55	0,62	1,86	4,16	1,02	2,24
	\bar{x}_{0-30}	0,70	0,76	2,39	5,12	1,28	2,75
Gleba + osad; Soil + sludge 100 m ³ ·ha ⁻¹	0-20	0,80	0,79	3,49	6,66	1,55	3,96
	20-30	0,62	0,65	2,21	4,27	1,38	2,40
	\bar{x}_{0-30}	0,71	0,72	2,85	5,46	1,46	3,18
Gleba + osad; Soil + sludge 200 m ³ ·ha ⁻¹	0-20	0,81	0,79	3,90	6,81	2,30	3,69
	20-30	0,56	0,40	2,17	4,22	1,15	3,18
	\bar{x}_{0-30}	0,68	0,59	3,03	5,51	1,72	3,43
Gleba + osad; Soil + sludge 300 m ³ ·ha ⁻¹	0-20	0,79	0,67	3,54	7,15	2,27	3,81
	20-30	0,40	0,64	3,16	4,39	1,53	3,50
	\bar{x}_{0-30}	0,59	0,65	3,35	5,77	1,90	3,65
Gleba + osad; Soil + sludge 400 m ³ ·ha ⁻¹	0-20	0,68	0,73	3,68	7,22	2,39	4,97
	20-30	0,49	0,46	3,69	5,24	2,23	2,43
	\bar{x}_{0-30}	0,58	0,59	3,68	6,23	2,31	3,70
Gleba + osad; Soil + sludge 500 m ³ ·ha ⁻¹	0-20	0,60	0,70	3,16	6,78	2,04	4,20
	20-30	0,48	0,42	2,75	3,72	1,12	2,05
	\bar{x}_{0-30}	0,56	0,60	3,02	5,75	1,78	3,48
Średnia z obiektów Average for site	\bar{x}_{0-20}	0,75	0,76	3,45	6,83	1,96	3,98
	\bar{x}_{20-30}	0,51	0,53	2,64	4,92	1,42	2,57
NIR _{0,05} dla; LSD _{0,05} for: Warstwa · dawka; layer · dose		0,11	0,12	1,25	1,14	1,12	1,20
Dawka; dose		0,06	0,08	0,82	0,64	0,60	0,72
Warstwa; layer		0,02	0,03	0,40	0,32	0,30	0,34

P – osad płynny; liquid sludge, M – osad mazisty; dewatered sludge

DYSKUSJA

Przedstawione wyniki, uzyskane po sześciu latach od zastosowanych zabiegów rekultywacyjnych, wskazują generalnie na korzystne i istotne zmiany właściwości biochemicznych gleby pod wpływem melioracji wyższymi dawkami osadu ściekowego (300 i 400 m³·ha⁻¹). Również badania innych autorów [3, 9] wykazały, że warunkiem wieloletniej skuteczności organicznych materiałów odpadowych, takich jak osady ściekowe, jest ich

wprowadzenie do gleby w postaci dawek większych. Salem [15] zwraca uwagę, że poprawa stanu żyzności gleby poprzez zastosowanie materiałów organicznych i w konsekwencji wzrost aktywności metabolicznej drobnoustrojów powoduje znaczne skrócenie czasu skutecznego ich oddziaływania w glebie w efekcie nasilenia procesów biodegradacji. Natomiast jeśli chodzi o formy zastosowanego w doświadczeniu osadu, to korzystniejsze zmiany aktywności ureazy i proteazy w glebie stwierdzono pod wpływem osadu mazistego, co wiązało się z wyraźnie większą niż w przypadku osadu płynnego, zawartością C_{org} w glebie (Tab. 5). Wyniki te jeszcze raz potwierdzają ważną rolę materii organicznej w kształtowaniu aktywności enzymatycznej gleby.

Hamowanie aktywności fosfatyz przez użyty w doświadczeniu osad ściekowy mogło być związane z dużą wrażliwością tych enzymów na zanieczyszczenie środowiska glebowego metalami ciężkimi [1]. Bielińska i Dómżał [6] stwierdzili odwrotny liniowy związek pomiędzy aktywnością fosfatyz a zawartością metali ciężkich w glebach. Wprowadzenie wraz z osadem pewnych ilości przyswajalnego fosforu do gleby było prawdopodobnie kolejną przyczyną inhibicji aktywności fosfatyz. Z innych badań [2, 7] wynika, że nadmiar tej formy fosforu hamuje syntezę fosfatyz.

Uzyskane wyniki, zwłaszcza w kontekście niskiej zawartości C_{org} w glebie badanych obiektów, upoważniają do wysunięcia sugestii powtórnego zastosowania osadu ściekowego jako źródła substancji organicznej. Ponieważ obowiązujące przepisy prawne [Dz.U. nr 72, 1999], zezwalają na stosowanie osadu ściekowego w dawce do $250 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ w przeliczeniu na suchą masę, na potrzeby nierolnicze, można rozważać wprowadzanie większych dawek osadu niż $500 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (co stanowi ok. $60 \text{ Mg s. m. na ha}$). Należy sobie jednak postawić pytanie, czy efekt rekultywacji będzie trwały i czy z czasem w efekcie mobilizacji zdeponowanych w glebie metali ciężkich nie wystąpi zjawisko chemicznej bomby czasowej [18]. W warunkach stosowania największej dawki osadu tj. $500 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ zanotowano bowiem osłabienie aktywności wszystkich badanych enzymów. Jest prawdopodobne, że podstawową przyczyną tego zjawiska było zanieczyszczenie gleby metalami ciężkimi wniesionymi z dużą dawką osadu oraz zachwianie wymiany gazowej pomiędzy glebą a atmosferą zachodzące w warunkach częściowej lub całkowitej anaerobiozy. Stosowanie osadów ściekowych pociąga za sobą obniżenie potencjału redoks gleby, czego efektem są zmiany w populacji mikroorganizmów polegające na wzroście liczebności bakterii anaerobowych. Wykorzystywanie przez bakterie anaerobowe NO_3^- , SO_4^{2-} , MnO_2 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$ jako akceptora elektronów powoduje pojawienie się zredukowanych jonów metali Fe^{2+} i Mn^{2+} , jak również wytwarzanie inhibitorów enzymatycznych [14].

Badania Wójcikowskiej-Kapusty i in. [20] przedstawiające elementy bilansu ołowiu w glebie lekkiej użyźnionej osadem ściekowym wykazały, że osad zastosowany nawet w najmniejszej dawce (tj. $30 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$) wnosił do gleby kilkakrotnie więcej tego pierwiastka niż zastosowany w takiej samej dawce obornik. Dopyły do gleby metali ciężkich powoduje zmiany ilościowe i jakościowe w składzie mikroflory glebowej, co w konsekwencji powoduje zmiany w aktywności enzymów i doprowadza do zakłóceń w prawidłowym metabolizmie składników gleby [8]. Należy zwrócić uwagę, że na badanym terenie występują gleby piaskowe o niskiej jakości. Badania ostatnich kilkadziesiąt lat wykazały, że niekorzystne właściwości gleb lekkich prowadzą do powstawania tzw. „zespołu czynników kwasowości gleby” [11]. Najważniejsze z nich to uruchamianie się metali ciężkich oraz toksyczność metali wielowartościowych (Al, Mn i Fe). Ryzyko stosowania osadów ściekowych może wiązać się z remobilizacją w sprzyjających warunkach szkodliwych składników, które przez długi nawet czas były nieaktywne w glebie [18].

WNIOSKI

1. Osad ściekowy, dodany w odpowiedniej dawce, wpływał na ogół korzystnie na właściwości biochemiczne i chemiczne pokrywy glebowej na terenie po otworowej eksploatacji siarki, co wskazuje że może być brany pod uwagę, jako jeden ze środków służących do rekultywacji.
2. Przeprowadzone badania wykazały, że osad zastosowany w postaci mazistej może być skuteczniejszym środkiem kształtującym podstawowe elementy żyzności odtwarzanej pokrywy glebowej niż osad w postaci płynnej.
3. Pomiarzy aktywności enzymatycznej gleb dają możliwość oceny efektywności stosowanych zabiegów rekultywacyjnych.

LITERATURA

- [1] Baath E.: *Effects of heavy metals in soil on microbial process and populations (a review)*, Water, Air, and Soil Poll., **47**, 335–379 (1989).
- [2] Baran S., J. Furczak., K. Gostkowska: *Aktywność enzymatyczna gleby lekkiej użyźnionej odpadami organicznymi*, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., **437**, 69–77 (1996).
- [3] Baran S., E. J. Bielińska E. J., G. Żukowska: *Wpływ użyźnienia gleby lekkiej osadem ściekowym na aktywność ureazy i zawartość różnych form azotu w glebie*, Materiały III Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Odpady organiczne a ochrona i produktywność agrocenozy”, Lublin 2002, 161–164.
- [4] Bender J., M. Gilewska: *Znaczenie zabiegów rekultywacyjnych w kształtowaniu enzymatycznej aktywności industrioziemów*, Archiwum Ochrony Środowiska, **1-2**, 65–75 (1983).
- [5] Bender J., M. Gilewska: *Rekultywacja w konfrontacji z aktami prawnymi, badaniami naukowymi i praktyką gospodarczą*, Roczniki AR w Poznaniu, **317**, 343–356 (2000).
- [6] Bielińska E. J., H. Domżał: *Soil enzymatic activity in deteriorated forest ecosystems in the operation area of the Puławy S.A. Nitrogen Factory*, Acta Agrophysica, **51**, 7–13 (2001).
- [7] Cieśla W., J. Koper: *Wpływ wielokrotnego nawożenia mineralno-organicznego na kształtowanie się poziomu fosforu organicznego i przyswajalnego oraz aktywności enzymatycznej gleby*, Roczniki Gleboznawcze, **41**, 73–83 (1990).
- [8] Dahm H., Ch.-Y. Li., K. Januszek: *Development of microorganisms and oxidation of some organic compounds in soil polluted with heavy metals*, Pol. J. Soil Sci., **30**, 2, 55–63 (1997).
- [9] Dębicki R.: *Kształtowanie podstawowych elementów żyzności gleby niekonwencjonalnymi środkami nawozowymi*, Problemy Agrofizyki **62**, Rozprawa habilitacyjna, 1990.
- [10] Gilewska M., Cz. Przybyła: *Wykorzystanie osadów ściekowych w rekultywacji składowisk popiołowych*, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., **477**, 217–222 (2001).
- [11] Kamińska J.: *Tolerancjność jęczmienia w stosunku do kwasowości podłoża, Cz. I. Studium nad szkodliwym wpływem glinu i manganu w warunkach niskiego pH*, Biuletyn IHAR, **143**, 21–35 (1981).
- [12] Ladd J. N., J. H. A. Butler: *Short-term assays of soil proteolytic enzyme activities using proteins and dipeptide derivatives as substrates*, Soil Biol. Biochem., **4**, 19–30 (1972).
- [13] Mocek A., S. Drzymała, P. Maszner: *Geneza, analiza i klasyfikacja gleb*, PWN, Warszawa 1997.
- [14] Puford I. D., Tabatabai M. A.: *Effect of water logging on enzyme activities in soils*, Soil Biol. Biochem., **20**, 215–219 (1988).
- [15] Salem N.: *Comparative studies on the effect of soil conditioners on the biological activity of organic wastes*, Acta Hort., **172**, 199–206 (1985).
- [16] Siuta J.: *Inżynieria ekologiczna w mojej działalności*, Wydawnictwo Naukowe Gabriel Borowski, Warszawa 2002.
- [17] Siuta J., M. Jońca: *Rekultywacyjne działanie osadu ściekowego na wapnie posfłotacyjnym w Kopalni Siarki „Jeziórko”*, Materiały Terenowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Przyrodnicze użytkowanie osadów ściekowych”, Puławy-Lublin-Jeziórko 1997, 39–48.

- [18] Stigliani N. S., P. Anderborg, A. Jaffe: *Industrial metabolism and long term risks from accumulated chemicals in the Rhine Basin*, *Industry and Environment*, **16(3)**, 30–35 (1993).
- [19] Tabatabai M. A., J. M. Bremner: *Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity*, *Soil Biol. Biochem.*, **1**, 301–307 (1969).
- [20] Wójcikowska-Kapusta A., S. Baran, E. Baranowska: *Próba bilansu ołowiu w glebie lekkiej użyźnionej osadem ściekowym*, *Acta Agrophysica*, **70**, 325–331 (2002).
- [21] Zantua M. I., J. M. Bremner: *Comparison of methods of assaying urease activity in soil*, *Soil Biol. Biochem.*, **7**, 291–295 (1975).

Wpłynęło: 26 lutego 2003, zaakceptowano do druku: 5 marca 2004.