

Maria Trafas*, Teresa Eckes*

Glebotwórcze aspekty oceny utworów sztucznych na przykładzie odpadów po flotacji rud cynku i ołowiu**

1. Wstęp

Zasadniczym celem działalności rekultywacyjnej jest doprowadzenie terenu do takiego stanu, aby stał się on przydatny dla określonego rodzaju użytkowania. Jeżeli będzie to użytkowanie przyrodnicze, to utwory występujące w warstwach powierzchniowych rekultywowanego terenu muszą spełniać funkcje gleby w stosunku do wprowadzanej roślinności. W przypadku utworów naturalnych – piasków, glin czy ilów różnego pochodzenia i wieku – nie następuje to na ogół specjalnych trudności (z wyjątkiem utworów zawierających składniki toksyczne). Natomiast w przypadku utworów „sztucznych”, o cechach nadanych przez procesy technologiczne (spalanie, topienie, rozdrabnianie itp.) zapewnienie możliwości bytowania roślin może być niekiedy bardzo trudne. Dlatego też najczęstszym sposobem rekultywacji tych terenów jest przykrycie powierzchni utworami potencjalnie produktywnymi (żyznymi). W takich wypadkach pojawiają się dodatkowe trudności związane ze zróżnicowaniem cech takiego sztucznie utworzonego profilu i brakiem „współdziałania” pomiędzy warstwą powierzchniową „naturalną”, wykorzystywaną przez roślinność, i warstwą głębszą „sztuczną”. Poza tym w niektórych przypadkach takie rozwiązanie może być technicznie trudne do realizacji albo zbyt kosztowne. Można więc zastanawiać się, czy nie lepszym rozwiązaniem byłoby wprowadzenie roślinności bezpośrednio na sztuczny utwór, oczywiście poprzedzone zbadaniem jego cech [4, 9]. Wiedząc co stanowi najsilniejsze ograniczenia z punktu widzenia wzrostu roślinności, można określić, czy i w jakim zakresie możliwe jest usunięcie wadliwości utworów lub przynajmniej niezbędna, częściowa poprawa.

W artykule omówiono właściwości odpadów poflotacyjnych, powstających w trakcie wzbogacania rud cynku i ołowiu. Ich składowiska zajmują dosyć duże

* Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Artykuł powstał w ramach pracy finansowanej ze środków na naukę w latach 2005–2008 jako projekt badawczy 4 T12 E 04129

powierzchnie, a część wymaga w dalszym ciągu rekultywacji. Składowiska takie bez interwencji człowieka nie są zasiedlane przez roślinność, szpecą krajobraz oraz są uciążliwe ze względu na występującą erozję eoliczną.

2. Materiał i metody badań

W celu sporządzenia charakterystyki odpadów poflotacyjnych wykorzystano wyniki badań próbek pobieranych w latach 1980–2005 z osadników odpadów poflotacyjnych ZG „Trzebionka” i ZGH „Bolesław”. Próby te pobierano w trakcie prac, których celem było zbadanie możliwości rekultywacji osadników względnie wykorzystania odpadów dla różnych celów. Badania obejmowały określenie podstawowych właściwości fizycznych i chemicznych.

W szczególności oznaczano:

- skład mechaniczny metodą areometryczną Casagrande’a w modyfikacji Prószyńskiego, a dla części próbek zawartość podfrakcji piasku metodą sitową,
- gęstość właściwą i objętościową zgodnie z normą PN-88/B-04481,
- pF w aparacie ciśnieniowym według Richardsa,
- granice konsystencji wg PN-88/B-04481,
- współczynnik filtracji w aparacie Percolator QD 105,
- pH w H₂O i w 1 n KCl – potencjometrycznie, zgodnie z normą PN-ISO 10390,
- zawartość przyswajalnych form K i P metodą Egnera Riehma,
- zawartość przyswajalnych form Mg metodą Schachtschabela,
- zawartość kationów w wyciągu wodnym (1:5),
- sorpcję błękitu metylenowego [6],
- przewodność elektryczną właściwą w roztworze wodnym gleby – konduktometrycznie, przy wykorzystaniu konduktometru CC-315, zgodnie z normą PN-ISO 11265 +AC,
- zawartość metali (Mg, Ca, Zn, Cd, Pb) rozpuszczalnych w mieszaninie HClO₄ i HNO₃ (4:1) metodą ASA na aparacie Hitachi z korekcją zeemanowską,
- zawartość CaCO₃ metodą objętościową za pomocą aparatu Scheiblera,

3. Właściwości odpadów poflotacyjnych

Badane obiekty to osadnik Kopalni „Trzebionka” i osadniki kopalń olkuskich. Próbkę do badań pobierano z różnych fragmentów osadników, zarówno z części, w obrębie których odpady poflotacyjne gromadzono hydrotransportem, jak i z partii, gdzie osuszony odpad był przemieszczany w trakcie robót ziemnych i przy tej okazji homogenizowany. Zgromadzone w ten sposób wyniki pozwalają na ocenę różnicowania właściwości tych utworów (tab. 1 na wklejce).

Tabela 1. Podstawowe właściwości fizyczne i chemiczne odpadów poflotacyjnych rud cynku i ołowiu

Cecha			ZGH „Bolesław” odpad uśredniony		ZGH „Bolesław” odpad drobnoziarnisty		ZG „Trzebionka” odpad przed rozpoczęciem doświadczeń		ZG „Trzebionka” odpad po 8 latach doświadczeń	
			średnia	odch. stand.	średnia	odch. stand.	średnia	odch. stand.	średnia	odch. stand.
Zawartość frakcji o średnicy [mm]	1÷0,5	% wag	5,2				5,3			
	0,5÷0,25		38,5				27,0			
	0,25÷0,1		56,3				67,7			
	1÷0,1	% wag	54,4	10,96	31,5	14,10	76,9	4,4	72	11,69
	0,1÷0,05		17,3	3,34	14,4	5,88	16,7	4,1	21	8,89
	0,05÷0,02		11,7	4,08	17,9	5,33	2,2	1,1	2,3	3,01
	0,02÷0,006		8,2	3,71	16,2	4,93	1,6	1,4	2,0	1,23
	0,006÷0,002		5,0	2,1	12,5	9,30	1,4	1,1	1,8	1,16
< 0,002		3,4	1,74	7,5	2,79	1,2	1,1	0,9	0,8	
Gęstość	właściwa	g/cm ³	3,03	0,04	3,02	0,02	2,90	0,06	2,90	0,02
	objętościowa		1,92	0,08	1,81	0,13	1,78	0,07	1,66	0,10
Porowatość	%		36,5	2,43	40,1	4,50	40,6	3,01	40,7	3,0
Granice konsystencji	L_Y	%			22,0	5,02				
	L_P				16,9	2,26				
Wskaźnik plast. W_P					5,1	2,7				
Higroskopowość maks	%wag		0,91	0,23	1,16	0,33	0,22	0,06	0,28	0,13
Polowa poj. wodna	% obj.		12,12	1,30	34,15	6,7				
Współczynnik filtracji	m/s		$2,2 \times 10^{-6}$	$1,75 \times 10^{-6}$	$8,6 \times 10^{-7}$	$3,9 \times 10^{-7}$	$2,9 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-5}$	$5,2 \times 10^{-5}$	$3,3 \times 10^{-5}$
Sorpcja błękitu metylenowego	cmol ^(e) /kg		0,73	0,40	1,49	1,03	0,31	0,11	1,02	0,48
pH	H ₂ O		7,85	0,10	7,83	0,08	8,5	0,17	7,37	0,09
	KCl		7,83	0,09	7,84	0,08	8,4	0,22	6,92	0,08
Zawartość CaCO ₃	%		74,6	8,6	73,4	10,6	86,5	2,6		
Przew. elektr. właśc.	μS/cm		1950	237	1983	203	96	10	76	28
Zawartość składników w formie przyswajalnej dla roślin	K ₂ O	mg/100g	10,94	3,87	10,60	4,10	4,4	1,37	2,63	1,31
	Mg		13,60	4,64	21,03	3,64	1,7	0,45	2,46	1,68
	P ₂ O ₅		0,07	0,23	0,06	0,15	0,24	0,3	1,99	2,07
Zawartość składników rozpuszczalnych w H ₂ O	Ca	mg/100g	400,2	109,6	402,7	39,3	7,55	0,49	2,01	0,53
	Mg		25,5				0,71	0,22	0,79	0,34
	Zn	mg/kg	12,51	4,52	12,62	2,41	0,71	0,55	7,21	1,97
	Pb		0,33	0,28	0,48	0,02	0,11	0,02	2,79	0,81
	Cd		0,34	0,11	0,25	0,07	0,005		0,028	0,014
	Cu		0,12	0,11	0,16	0,22				
Zawartość składników rozpuszczalnych w HClO ₄	Ca	%	27,81	2,20	28,27	1,60	21,73	1,39		
	Mg		7,98	0,58	8,17	0,30	10,51	0,43		
	Cu	mg/kg	100,2	32,5	147,1	12,6	15	5,8		
	Zn		11358	1007	10205	2184	13453	2380		
	Pb		2271	284	3437	1825	2936	670		
	Cd		64,4	5,7	71,0	6,7	91	11		

3.1. Uziarnienie

Udział cząstek o różnej wielkości w dużej mierze determinuje właściwości fizyczne różnych utworów. W przypadku utworów naturalnych skład ziarnowy wiąże się ze składem mineralogicznym i wynikającymi stąd właściwościami chemicznymi. Są to zależności tak silne, że skład ziarnowy i jego zmienność w profilu jest podstawowym kryterium w bonitacji gleb. Do najwyższej ocenianych należą gleby wytworzone z lessów.

Przeważającą część powierzchni wierzchowiny stawów osadowych ZGH „Bolesław”, a także ich skarp pokrywają utwory o składzie ziarnowym odpowiadającym piaskom – od luźnych do gliniastych, czasami pylastych. W obrębie frakcji piasku przeważa piasek drobny. We frakcji pyłowej udział pyłu grubego i drobnego jest mniej więcej zbliżony. Wskaźnik różnoziarnistości jest zbliżony do 30, a więc trzeba ten utwór uznać za bardzo różnoziarnisty.

Badane odpady poflotacyjne ze skarp osadnika Trzebieńka, w związku z technologią jego budowy, charakteryzują się bardziej wyrównanym, bardzo lekkim składem ziarnowym, w większości przypadków odpowiadającym piaskom luźnym. Zdecydowanie dominuje frakcja piasku, szczególnie drobnego ($0,25 \pm 0,1$ mm). We frakcji pyłowej przeważa pył gruby ($0,1 \pm 0,05$ mm), zaś zawartość frakcji $< 0,02$ mm, a szczególnie $< 0,002$ mm jest znikoma. Współczynnik różnoziarnistości wynosi około 4.

W przypadku materiału składowanego hydrotransportem w części osadnika oddalonej od miejsca zrzutu gromadzi się materiał bardzo drobny, o uziarnieniu odpowiadającym ilom lub pyłom ilastym. Utwory te zawierają stosunkowo dużo frakcji $0,02 \pm 0,002$ mm, lecz w jej składzie mineralnym przeważa mechanicznie rozdrobniona skała dolomitowa, zaś udział minerałów ilastych jest nieznaczny. W pobliżu hydrocyklonów gromadzi się materiał z przewagą frakcji grubszych. Często w toku ostatecznego formowania powierzchni i skarp osadnika różnoziarniste odpady ulegają wymieszaniu, uzyskując uśredniony skład, najczęściej odpowiadający piaskom z różnym udziałem frakcji spławialnej. Homogenizacja nie jest jednak idealna i w związku z tym w przypadku zarówno osadników z rejonu olkuskiego, jak i Trzebieńki można napotkać na powierzchni fragmenty o zwiększonej zawartości odpadów silnie rozdrobnionych. Zwykle tworzą one naskorupienia niewielkie, lecz zbite i trudno wchłaniające wodę.

3.2. Gęstość właściwa i objętościowa; porowatość

Gęstość właściwa jest cechą uzależnioną głównie od składu mineralnego, a w glebach naturalnych także od zawartości próchnicy. Średnia gęstość właściwa większości gleb mineralnych waha się w pobliżu $2,65$ g/cm³.

Gęstość objętościowa charakteryzuje trójfazowy układ składników gleby, jest więc wielkością zmienną. Za optymalny układ uważa się porowatość około 50% czyli równowagę pomiędzy fazą stałą i przestrzeniami wolnymi.

Gęstość właściwa odpadów poflotacyjnych z osadników ZGH „Bolesław” wynosi około 3 g/cm^3 , a więc jest zbliżona do gęstości właściwej dolomitów. Nieco wyższe wartości są związane z obecnością resztkowej ilości minerałów rudnych – galeiny i sfalerytu. Porowatość waha się w granicach 35÷55%, co pociąga za sobą również zróżnicowanie gęstości objętościowej – od 1,38 do nawet 2 g/cm^3 . Bardzo wysoka gęstość objętościowa kwalifikuje niektóre partie odpadów poflotacyjnych do grupy gruntów zbitych lub bardzo silnie zbitych.

Gęstość właściwa odpadów ze skarpy osadnika „Trzebionka” jest nieco niższa, wynosząc około $2,9 \text{ g/cm}^3$, porowatość mieści się w przedziale 36÷51%, zaś gęstość objętościowa waha się od $1,38\div 1,86 \text{ g/cm}^3$.

3.3. Spoistość

Odpady poflotacyjne należą do utworów sypkich. Jedynie w przypadku nagromadzeń utworów najdrobniejszych można określić ich spoistość. Granice konsystencji wyznaczone dla tych utworów kształtują się na poziomie 18÷26% w przypadku L_y , oraz 15÷19% w przypadku L_p . Wartości te są niższe, niż to wynika z zawartości najdrobniejszych frakcji, a szczególnie frakcji $< 0,02 \text{ mm}$. Spoistość, oceniana na podstawie wskaźnika plastyczności, wynoszącego od 2 do 8%, nawet dla próbek o wysokiej zawartości frakcji $< 0,02 \text{ mm}$ czy $< 0,002 \text{ mm}$ jest niska. Jest to równoznaczne z niską wartością wskaźnika aktywności koloidalnej (0,3÷0,5). Nie może to być zaskoczeniem, gdyż część frakcji $< 0,002 \text{ mm}$ stanowią silnie rozdrobnione cząstki dolomitu, a nie minerały ilaste.

Granica skurczu tych utworów jest prawie równa granicy plastyczności. Wychodząc na osadniku, najdrobniejszy szlam kurczy się, dzieląc się na wieloboczne pakiety. Pomimo zaliczenia do grupy mało spoistych lub średnio spoistych odpady o najdrobniejszym uziarnieniu wykazują bardzo dużą zwięzłość w stanie suchym. Zbijają się wtedy w twarde bryły, których rozbicie wymaga dużych sił. Dlatego też podczas mechanicznego przemieszczania i mieszania suchych utworów, w trakcie budowy stawów osadowych, homogenizacja nie jest dokładna. Wśród materiału o uśrednionym składzie spotyka się skupienia, a także nieregularne przewarstwienia utworów drobniejszych.

3.4. Filtracja

Obecność wody w glebie warunkuje procesy biologiczne i wywiera wpływ na pobieranie składników pokarmowych przez rośliny. Gdy wilgotność gleby jest większa od pojemności polowej woda infiltrowuje w głąb. Ruch ten przewietrza glebę,

a możliwości przemieszczania wody można ocenić poprzez podanie współczynnika filtracji.

Współczynnik filtracji, wyznaczony dla utworów o składzie piasków luźnych, zawarty jest w przedziale od 10^{-5} do 10^{-4} m/s co odpowiada przepuszczalności słabej lub co najwyżej średniej. Odpady poflotacyjne drobne trzeba zaliczyć do grupy skał półprzepuszczalnych (współczynnik filtracji rzędu 10^{-7} do 10^{-6} m/s). W miejscach występowania utworów z nieco większym udziałem frakcji mniejszych od 0,02 mm, trudniej przepuszczalnych, może gromadzić się woda opadowa. Spływając po powierzchni powoduje ona powstawanie rozcięć, gdyż zbity, lecz łatwo rozmywalny, bardzo drobnoziarnisty materiał jest łatwo unoszony. Podobne, lecz zachodzące na dużo większą skalę zjawiska można zaobserwować w miejscach, gdzie dochodzi do zakłóceń pracy urządzeń transportujących i wylewających szlamy poflotacyjne na osadnik.

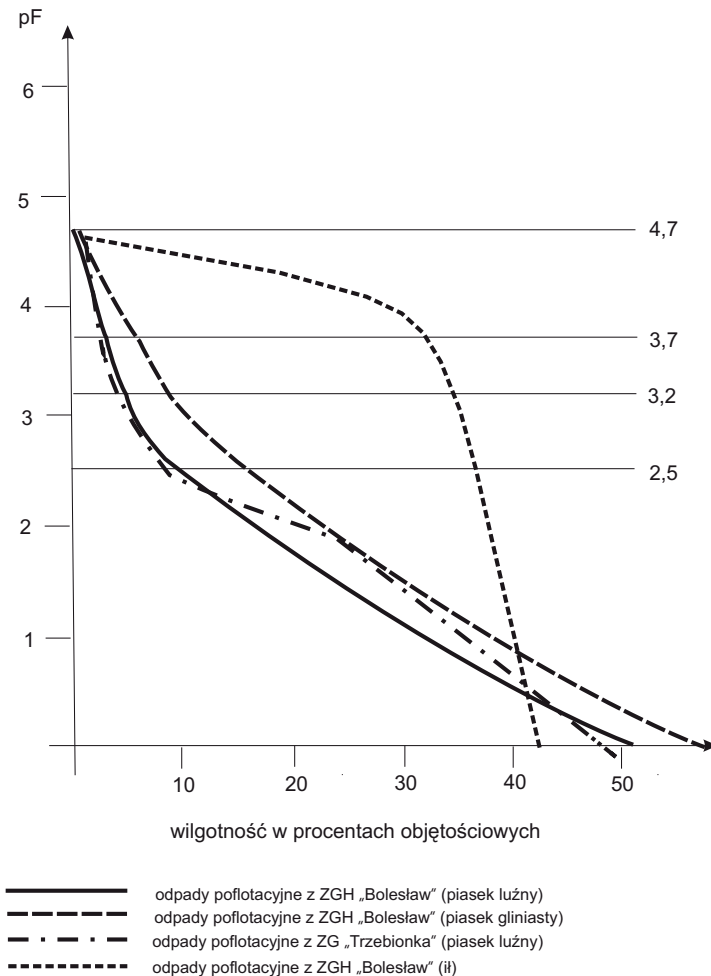
3.5. Retencja wody

Rośliny korzystają przede wszystkim z zapasu wody glebowej. Najistotniejsza dla oceny warunków ich wzrostu jest woda utrzymywana siłami kapilarnymi. Za retencję niedostateczną uznaje się mniej niż 50 mm wody w warstwie do 1 m, zaś za dobrą powyżej 150 mm.

Zdolności retencji wody scharakteryzowano analizując krzywe sorpcji wody dla odpadów o różnym składzie ziarnowym (rys. 1). Pokazują one, że w przypadku odpadów o składzie odpowiadającym piaskom luźnym i słabogliniastym całkowita pojemność wodna jest stosunkowo duża. Jednak zawartość wody, odpowiadająca pojemności polowej jest niewielka, nieprzekraczająca 10% objętej. Retencja efektywna jest jednak znacznie mniejsza, gdyż tylko połowa tej wody jest łatwo dostępna dla roślin. Odpady drobniejsze, o składzie odpowiadającym piaskom pylastym mają pojemność polową nieco wyższą, lecz równocześnie wyższa jest w ich przypadku zawartość wody trudno dostępnej co powoduje, że retencja efektywna nie przekracza 7%.

Odpady o najdrobniejszym uziarnieniu reprezentuje próbka o składzie odpowiadającym ilom. Przy całkowitej pojemności około 42% pojemność polowa wynosi około 39%. Jest to jednak w większości woda trudno dostępna dla roślin i retencja efektywna wynosi zaledwie 5%.

Zawartość wody utrzymywanej na powierzchni cząstek siłami molekularnymi, charakteryzowana przez higroskopowość maksymalną jest niska, dla wszystkich badanych próbek odpadów poflotacyjnych. W przypadku bardziej drobnoziarnistych odpadów utrzymuje się ona w granicach 1-2%, zaś w przypadku odpadów zawierających więcej frakcji grubszych wynosi zaledwie około 1%.



Rys. 1. Krzywe sorpcji wody odpadów poflotacyjnych rud Zn i Pb

Odpady poflotacyjne, o składzie odpowiadającym piaskom bardzo szybko przesuszają. W okresie letnim wilgotność oznaczana dla warstwy 0÷5 cm, po 24 godzinach od zakończenia opadu (opad burzowy, około 20 mm) wynosiła tylko 3÷5%. Zgodnie z oznaczeniami retencji jest to w całości woda trudno dostępna dla roślin. Przedłużanie się okresu przesuszania, szczególnie przy utrzymujących się wyższych temperaturach powoduje, że po 3 dobach wilgotność obniża się do około 1%, a więc wartości odpowiadającej maksymalnej higroskopowości. Odpady drobne po zwilżeniu utrzymują wodę przez czas dłuższy, lecz jest to też woda niedostępna lub trudno dostępna dla roślin.

3.6. Sorpcja

Zdolności sorpcyjne gleb, uzależnione od ilości i charakteru minerałów ilastych i zawartości materii organicznej, umożliwiają regulację odczynu oraz magazynowanie i przekazywanie dostarczonych w nawozach składników pokarmowych. Sorpcja przyczynia się również do neutralizacji szkodliwych dla organizmów żywych substancji, które dostają się do gleby. Według *A Geographical Knowledge Database on Soil Properties for Environmental Studies* zdolności sorpcyjne mniejsze od $15 \text{ cm}^{(+)}/\text{kg}$ oznaczają sorpcję niską, zaś większe od $40 \text{ cm}^{(+)}/\text{kg}$ – wysoką.

Zdolności sorpcyjne odpadów poflotacyjnych charakteryzowano przez sorpcję błękitu metylenowego (tzw. sorpcja BM), gdyż ze względu na silnie węglanowy charakter oznaczanie stopnia wysycenia kompleksu sorpcyjnego nie dawałoby właściwego obrazu. Sorpcja BM jest we wszystkich przypadkach bardzo niska, wynosząc w przypadku odpadów ZG Trzebieńka, zawierających bardzo mało frakcji cząstek spławialnych i ilastych zaledwie $0,31 \text{ cmol}^{(+)}/\text{kg}$. Odpady z rejonu olkuskiego, o bardziej uśrednionym składzie charakteryzują się sorpcją około dwukrotnie wyższą. Jest ona zbliżona do wartości, określanych dla piasków (przykładowo dla piaszczystych utworów ze zwałowiska Piaseczno wynosiła ona $0,23 \pm 3,0$). Sorpcja odpadów drobnoziarnistych wynosi około $1,5 \text{ cmol}^{(+)}/\text{kg}$, czyli też utrzymuje się w granicach charakterystycznych dla gruntów piaszczystych. Grunty naturalne, odpowiadające składem odpadom drobnoziarnistym, charakteryzują się dużo większymi zdolnościami sorpcyjnymi – np. dla gruntów ze zwałowiska Piaseczno wynoszą one $20 \div 40 \text{ cmol}^{(+)}/\text{kg}$ [1].

3.7. Odczyn odpadów

Odpady poflotacyjne rud cynku i ołowiu, ze względu na charakter skał rudnych (dolomity i wapień) charakteryzują się odczynem alkalicznym. W przypadku odpadów z ZG „Trzebieńka” odczyn wynosi około 8,5 pH w KCl i w H_2O . Odpady z rejonu olkuskiego charakteryzuje odczyn nieco mniej alkaliczny wynoszący średnio $7,8 \div 7,85$ pH.

3.8. Zasobność w podstawowe składniki pokarmowe

W odpadach poflotacyjnych oznaczano zarówno ogólne zawartości składników pokarmowych, jak i ich ilości w formach przyswajalnych dla roślin i rozpuszczalnych w wodzie. Zaznaczają się tutaj duże różnice pomiędzy obiektami oraz formami występowania. W odpadach, spośród podstawowych składników (N, P, K, Mg), brakuje azotu, względnie występuje on w ilościach śladowych. Również bardzo niska jest zasobność w przyswajalne formy fosforu. Trochę wyższa jest zawartość przyswajalnych form potasu [5].

W przypadku odpadów z osadnika ZG „Trzebionka” jest to około 4 mg/100g, a w materiale z ZGH „Bolesław” nawet blisko 11 mg/100g. Analiza wyników badań zawartości Mg wykazuje, że w gruboziarnistych odpadach ZG „Trzebionka” przyswajalnych form tego pierwiastka jest mało (około 2mg/100g) przy zawartości ogólnej dochodzącej do 10%. W odpadach ZGH „Bolesław”, bardziej rozdrobnionych, przyswajalnych form Mg jest dużo więcej. Zaznacza się przy tym wyraźnie wpływ składu ziarnowego – w odpadach o wysokiej zawartości frakcji spławialnej zasobność w przyswajalne formy Mg jest 1,5-krotnie wyższa niż w odpadach o nieco lżejszym składzie. Spośród makroskładników, zawartość form rozpuszczalnych w wodzie oznaczano tylko w przypadku Ca i Mg. W wyciągach wodnych z odpadów ZG „Trzebionka” zawartości obu tych pierwiastków są niewielkie. Również i inne składniki występują w formach trudno rozpuszczalnych, o czym świadczy mała przewodność elektrolityczna. W przypadku odpadów ZGH „Bolesław” silniejsze rozdrobnienie i być może nieco inny charakter skał powodują, że zawartości Ca i Mg w wyciągach wodnych są wyższe. Wyraźnie wyższa jest też przewodność elektrolityczna wyciągów, przekraczając blisko dwukrotnie granicę przyjmowaną dla wód słodkich. Prawdopodobnie jest to związane z obecnością łatwo rozpuszczalnych siarczanów, a głównie siarczanu magnezu [3].

3.9. Zawartość innych składników

W odpadach oznaczano też ilości innych składników, których obecność może wpływać na możliwości wzrostu i rozwoju roślin. Spośród badanych metali ciężkich bardzo wysokie są ogólne (oznaczane w HClO_4) zawartości Zn, Pb i Cd we wszystkich badanych grupach odpadów poflotacyjnych. W odpadach ZG „Trzebionka” zawartość ogólna Cu jest niska, natomiast w odpadach ZGH „Bolesław” zawartości tego pierwiastka są kilkakrotnie wyższe. Ilości, które oznaczano w wyciągu wodnym wskazują, że badane pierwiastki występują w połączeniach trudno rozpuszczalnych, gdyż zawartości w wodzie stanowią nikły procent zawartości całkowitej.

4. Ocena właściwości odpadów ze względu na potrzeby roślin

Utworki, podlegające rekultywacji biologicznej, powinny zapewnić roślinom fizyczne oparcie, a równocześnie łatwość penetracji korzeni, oraz łatwy dostęp powietrza do strefy korzeniowej. Ponadto powinny charakteryzować się odpowiednimi zdolnościami filtracyjnymi i równocześnie dostateczną retencyjnością, gwarantującą możliwości wegetacji w dłuższym okresie bezopadowym. W wyniku zainicjowanego w toku rekultywacji procesu glebotwórczego powinna je cechować zdolność nabywania struktury. Jak wynika z podanej charakterystyki odpadów po-

flotacyjnych, ich właściwości utrudniają normalną wegetację roślinności. Jednym z utrudnień jest to, że odpady nie stanowią stabilnego podłoża. Utwory o składzie odpowiadającym piaskom luźnym i słabogliniastym są podatne na erozję eoliczną. Zawierają one stosunkowo dużo frakcji piasku drobnego i pyłu grubego ($0,25 \div 0,1$ i $0,1 \div 0,05$ mm) najbardziej podatnych na wywiewanie (do uruchomienia cząstek o średnicach 0,1 mm potrzebna jest prędkość wiatru zaledwie 1,5 mm/s) [2, 10]. Szybkie przesychnanie warstwy powierzchniowej po opadach potęguje tę podatność. Wywiewanie powoduje odsłanianie korzeni, co jest szczególnie szkodliwe w przypadku młodych roślinek. W skrajnych przypadkach uniemożliwia to zakorzenienie się siewek czy sadzonek. Nawet pokrycie roślinnością nie zabezpiecza całkowicie powierzchni. Wiatr wykorzystuje wszelkie, nawet drobne nieciągłości tej okrywy i powoduje powstawanie „ostańców deflacyjnych” (rys. 2). Uruchomiony i transportowany materiał może w innych partiach stawu osadowego zasypywać wprowadzone tam rośliny, utrudniając ich rozwój. Niesione cząstki, uderzając o łodygi i liście, mogą ponadto powodować ich mechaniczne uszkodzenia.



Rys. 2. „Ostańce deflacyjne” na części poletka doświadczalnego najbardziej narażone na erozję eoliczną

Powierzchnie pokryte odpadami drobnoziarnistymi są nieco mniej podatne na rozwiewanie. Natomiast – o ile występują na powierzchniach nachylonych – mogą być rozmywane. Całkowity brak strukturalności i utrudniona infiltracja w takich partiach mogą ułatwiać spływ, a brak spoistości ułatwia rozmywanie. Wspomniany

brak strukturalności dotyczy oczywiście także odpadów bardziej gruboziarnistych. Dopiero po dłuższym czasie wzrostu roślinności i wzbogaceniu w materię organiczną sytuacja ta mogłaby ulec pewnej poprawie.

Ze względu na podatność na erozję odpady nie stanowią stabilnego podłoża dla roślin. Mogą też występować jeszcze inne ograniczenia. Wspomniano, że odpady należą do gruntów mało spoistych. Jednak, szczególnie w przypadku odpadów drobnych, ze względu na stosunkowo duży udział frakcji pyłu i iłu pyłowego grubego ($0,1-0,006$ mm) mają one tendencję do zaszlamowywania i tworzenia bardzo zbitego układu o czym świadczy wysoka gęstość objętościowa. Może to utrudniać penetrację korzeni roślin, gdy w profilu wstępują przewarstwienia utworów drobnych, a także wymianę powietrza pomiędzy warstwami głębszymi i powierzchnią.

Najpoważniejsze ograniczenie rozwoju roślin w przypadku odpadów jest związane jednak z ich właściwościami wodnymi, a zwłaszcza bardzo niską retencją, która nie przekracza 50 mm w warstwie 1 m [4]. Przy tym wzrost zawartości frakcji drobniejszej nie poprawia sytuacji, gdyż przy zwiększonej pojemności polowej wyraźnie zwiększa się też zawartość wody trudno dostępnej.

Kolejnym utrudnieniem w przypadku wprowadzania roślinności na odpady są ich niskie zdolności sorpcyjne. Utrudnia to racjonalną gospodarkę wprowadzanymi nawozami, których stosowanie jest konieczne ze względu na niską zasobność w podstawowe składniki pokarmowe. Problem ten dotyczy głównie azotu i fosforu (zasobność zerowa lub bardzo niska) a w przypadku odpadów gruboziarnistych (ZG „Trzebionka”) także i potasu. Odpady ZGH „Bolesław” można uznać za średnio zasobne w przyswajalne formy K. Zawartość przyswajalnych form Mg jest co prawda niska w odpadach gruboziarnistych, lecz można sądzić, że w związku z bardzo wysoką ogólną zawartością rośliny nie będą odczuwać jego niedoboru. Potwierdzają to zresztą badania przeprowadzone na osadniku „Trzebionka”, gdzie po kilku latach wzrostu traw na poletku doświadczalnym zawartość Mg w odpadach w formach przyswajalnych dla roślin wzrosła 1,5-krotnie, przesuując się z zasobności niskiej do średniej [11,12]. Drobniejsze odpady ZGH „Bolesław” charakteryzuje na ogół wysoka zasobność przyswajalnych form Mg.

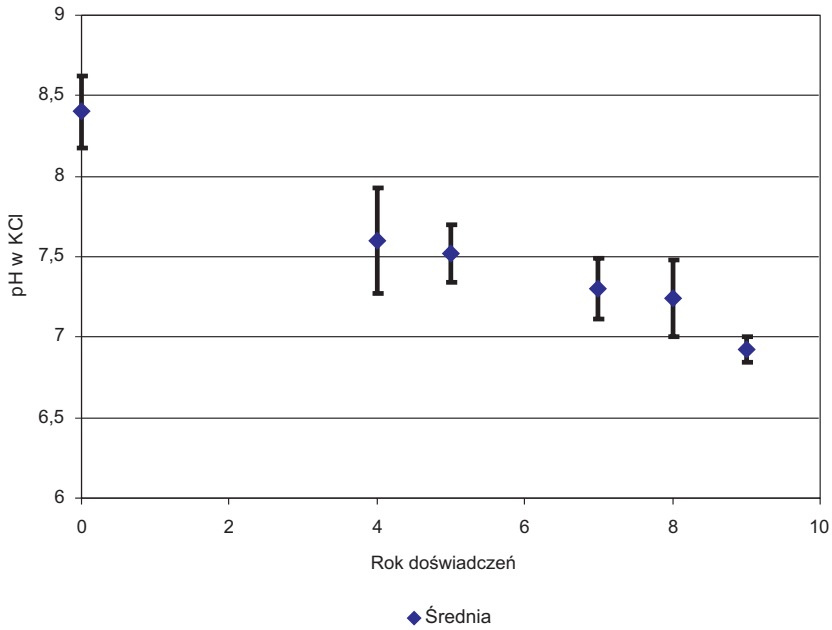
Alkaliczny odczyn, charakteryzujący odpady poflotacyjne, niespotykany w glebach klimatu umiarkowanego, wilgotnego jest nieodpowiedni dla większości roślin uprawianych w Polsce.

Niekorzystną cechą odpadów poflotacyjnych jest także wysoka zawartość Zn, Pb i Cd, wielokrotnie przekraczająca wartości dopuszczane przez standardy [8, 13], nawet w przypadku gruntów zaliczonych do grupy C (tereny przemysłowe, użytki kopalne, tereny komunikacyjne). Pomimo stosunkowo słabej rozpuszczalności ich obecność może wpływać negatywnie na vegetację roślin. W prowadzonych doświadczeniach np. zaobserwowano bardzo słaby rozwój i szybkie wycofywanie się roślin motylkowych, które negatywnie reagują na podwyższone zawartości Cd.

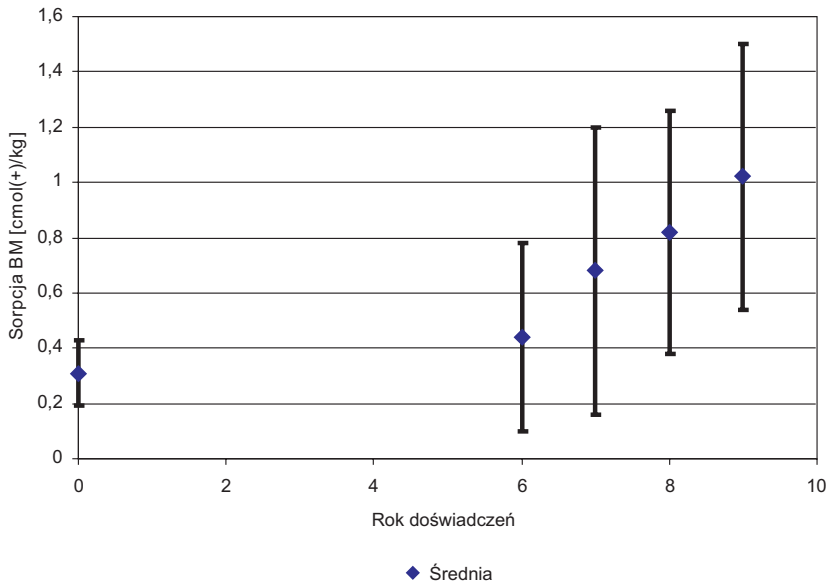
Podsumowując powyższe wywody, można stwierdzić, że zarówno właściwości fizyczne, jak i cechy chemiczne odpadów po flotacji rud cynku i ołowiu dyskwalifikują je jako siedlisko roślin, co potwierdzają obserwacje w terenie – niereaktywne osadniki przez wiele lat pozostają nieporośnięte. Prowadzone badania wykazują jednak, że zapewnienie poprawy warunków wilgotnościowych odpadów umożliwia wprowadzenie roślin i ich prawidłowy wzrost. Również dokładniejsze obserwacje na osadnikach pokazują, że wystarcza zahamowanie erozji eolicznej i dostarczenie nawet minimalnych dawek składników pokarmowych, głównie azotu, aby na powierzchni pojawiły się mszaki, a w nieco lepszych warunkach także i rośliny wyższe. Możliwość roślinności na odpadach potwierdzają też obserwacje w dolinie rzeki Białej, gdzie duży fragment dna doliny jest wyscielony grubą warstwą odpadów poflotacyjnych, na których bujnie krzewi się roślinność [7].

Procesy glebotwórcze, zapoczątkowane przez wprowadzenie roślinności, a szczególnie nagromadzenie węgla organicznego powodują zmiany właściwości odpadów, przy czym zmiany te zmierzają w kierunku korzystnym, z punktu widzenia potrzeb roślin. W przypadku doświadczeń prowadzonych na stawie osadowym ZG „Trzebionka”, gdzie dzięki zastosowaniu zabiegów zabezpieczających powierzchnię przed rozwiewaniem udało się wprowadzić i utrzymać okrywę z roślinności trawiastej odnotowano szereg pozytywnych zmian cech odpadów. W wyniku gromadzenia szczątków organicznych utworzył się inicjalny poziom próchniczny o miąższości około 10 cm, wyraźnie ciemniejszy od niżej leżących warstw, w którym zawartość próchnicy sięgnęła 1%. W poziomie tym stwierdzono zmniejszenie alkaliczności odpadów – pH zmieniło się z 8,4 na 6,9 (rys. 3). Ponadto zmieniły się zdolności sorpcyjne – sorpcja błękitu metylenowego wzrosła prawie 3-krotnie, co umożliwia lepsze wykorzystanie wprowadzanych nawozów (rys. 4).

W efekcie zachodzących procesów zmieniła się też struktura porowatości, a przede wszystkim zwiększyła się ilość mezopor (ϕ 8÷0,3 μ m). Przed rozpoczęciem doświadczeń retencja wody łatwo dostępnej dla roślin wynosiła w warstwie 20 cm zaledwie około 10 mm. Po upływie 8 lat doświadczeń wzrosła ona ponad dwukrotnie, co wyraźnie poprawiło warunki roślinności. Świadectwem zmian jest także zwiększenie higroskopowości maksymalnej i zdolności filtracji wody. Do zmian niekorzystnych można zaliczyć pewne zwiększenie zawartości metali ciężkich w formach rozpuszczalnych w wodzie. Było to związane najprawdopodobniej z zapoczątkowanym przy współdziałaniu roślin procesem zmniejszania alkaliczności odpadów. Prowadzone badania nad wypłukiwaniem metali z odpadów poflotacyjnych, przy braku roślinności i odczynie niezmiennym, wykazały jednak, że ich stężenia w odciekach stabilizują się stosunkowo szybko i utrzymują się w granicach dopuszczalnych dla ścieków, odprowadzanych do wód i do ziemi [3].



Rys. 3. Zmiany odczynu odpadów poflotacyjnych na poletku doświadczalnym



Rys. 4. Zmiany sorpcji błękitu metylenowego w odpadach poflotacyjnych na poletku doświadczalnym

Również przewodność elektrolityczna, wysoka w pierwszych około 6 miesiącach badań lizymetrycznych, do końca trwania doświadczeń, czyli przez dalsze 1,5 roku, utrzymywała się na prawie stałym (a nawet wykazującym pewien trend spadkowy) poziomie. Można więc powiedzieć, że z punktu widzenia wegetacji, po wprowadzeniu roślinności, właściwości odpadów mogą ulegać pewnej poprawie. Wymaga to jednak dosyć długiego czasu.

5. Podsumowanie i wnioski

Analiza wyników badań właściwości odpadów poflotacyjnych rud cynku i ołowiu oraz badania i obserwacje prowadzone w terenie na osadnikach w różny sposób zabezpieczanych pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- 1) Odpady poflotacyjne rud cynku i ołowiu wykazują właściwości na ogół niekorzystne z punktu widzenia możliwości wegetacji roślinności. Do najważniejszych wad należy zaliczyć:
 - podatność na erozję eoliczną i wodną,
 - niską pojemność sorpcyjną,
 - bardzo niską retencję wody łatwo dostępnej dla roślin,
 - alkaliczny odczyn,
 - brak albo niską zawartość składników pokarmowych, szczególnie N i P,
 - bardzo wysoką zawartość metali ciężkich, szczególnie Zn, Pb, Cd.
- 2) Wśród cech, które można uznać za okoliczności sprzyjające można wymienić to, że stosunkowo niewielkie ilości metali ciężkich występują w formach łatwo rozpuszczalnych, a wysoka zawartość Ca i Mg może wpływać na ich pobieranie przez rośliny.
- 3) Wprowadzenie roślinności bezpośrednio na odpady poflotacyjne jest możliwe, jednak wymaga to zabiegów, zabezpieczających powierzchnię przed rozwiewaniem i rozmywaniem, odpowiedniego nawożenia, kilkakrotnie powtarzanego w małych dawkach i podwyższonych norm siewu.
- 4) Dodatkowym utrudnieniem jest konieczność szybkiej obudowy biologicznej całego rekultywowanego obiektu, gdyż w przeciwnym przypadku procesy eoliczne mogą doprowadzić do zasypania powierzchni zarośniętej.
- 5) Pod wpływem procesów, zainicjowanych przez wprowadzenie roślinności w odpadach poflotacyjnych zachodzą zmiany, które na ogół wpływają na poprawę warunków wegetacji roślin.
- 6) Trudności i koszty związane z wprowadzeniem roślinności bezpośrednio na odpady poflotacyjne i utrzymaniem jej na rekultywowanym obiekcie wskazują na konieczność poszukiwania alternatywnych rozwiązań, zmierzających do innego, niż przyrodniczy, sposobu zagospodarowania odpadów.

Literatura

- [1] Bykov R.: *Litologiczne i morfologiczne uwarunkowania procesów glebowych na terenie zrehabilitowanego zwałowiska zewnętrznego Kopalni Siarki „Piaseczno”*. ZKiOŚ AGH, Kraków 2003 (niepublikowana praca doktorska).
- [2] Chepil W.: *Dynamic of wind erosion*. Soil Sc. 60, 1945.
- [3] Eckes T., Gołda T., Gruszczynski S., Trafas M.: *Możliwości wykorzystania odpadów poflotacyjnych z przeróbki rud cynku i ołowiu do rekultywacji terenów pogórnich*. Archiwum Ochrony Środowiska, vol. 24, no. 2, 1998, s. 95–117.
- [4] Harabin Z., Strzyszc Z., Klein T.: *Możliwość biologicznej rekultywacji odpadów poflotacyjnych rud cynkowo-ołowiowych*. Materiały XIX Ogólnopolskiego Zjazdu Naukowego PTG, Puławy 1972.
- [5] Lityński T.: *Żyzność gleby i nawożenie. Cz. I: Żyzność gleby*. Wyd. 2. PWN, Warszawa 1971.
- [6] Myślińska E.: *Laboratoryjne badania gruntów*. PWN, Warszawa 1998.
- [7] Opracowanie zbiorowe pod kier. J. Chwastka: *Studium hydrologiczne i przyrodnicze terenu doliny rzeki Białej ustalające stopień uszkodzenia gruntu i szaty roślinnej*. Kraków 1989 (maszynopis ZKiOŚ AGH).
- [8] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi. Dz. U. Nr 165, poz. 1359.
- [9] Strzyszc Z.: *Właściwości fizyczne, fizykochemiczne i chemiczne odpadów poflotacyjnych rud cynku i ołowiu w aspekcie ich biologicznej rekultywacji*. Archiwum Ochrony Środowiska, nr 3–4, 1980.
- [10] Szczypek T., Wach J.: *Antropogeniczna wydma krawędziowa w Bukownie na Wyżynie Śląskiej w latach 1989–1993*. Prace Naukowe UŚ w Katowicach. Nr 1401, Katowice 1993.
- [11] Trafas M.: *Problemy i efekty rekultywacji osadników odpadów poflotacyjnych rud Zn i Pb na przykładzie osadnika ZG Trzebionka*. Kraków, ZN AGH Nr 1222, Sozologia i Sozotechnika, z. 26, 1988, s. 185–199.
- [12] Trafas M.: *Changes in the properties of post-flotation wastes due to vegetation introduced during process of reclamation*. Applied Geochemistry, Vol. 11, 1996, s. 181–185.
- [13] Ustawa z dnia 3 lutego 1995 r. o ochronie gruntów ornych i leśnych. Dz. U. Nr 16, poz. 78.