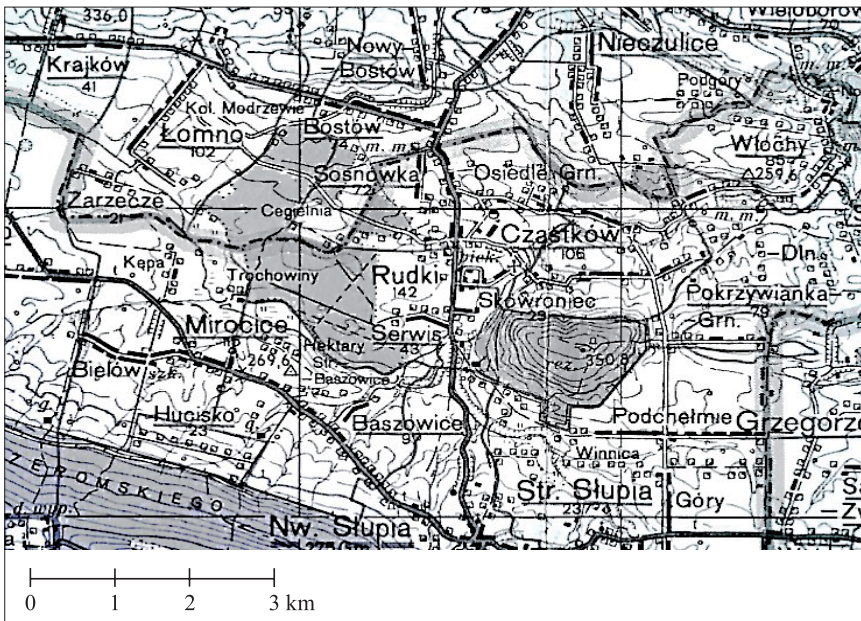


Anna Warda\*

## Ocena efektów rekultywacji Kopalni „Staszic” w Rudkach koło Kielc

### 1. Charakterystyka geologiczno-górnicza złoża w Rudkach

Wieś Rudki (rys. 1), położona w województwie świętokrzyskim, w powiecie kieleckim, znana jest z unikatowego złoża rud żelaza i pirytu, eksploatowanego w latach 1933–1974.



Rys. 1. Położenie miejscowości Rudki (wg Województwo kieleckie.  
Mapa topograficzno-administracyjna, skala 1:100 000. PG-K, Katowice, b.r.w.)

\* Doktorantka na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Złoże odkrył w 1922 r. J. Samsonowicz. Ma ono budowę żyłową oraz tzw. sztokwerkową (sieć cienkich żyłek kruszcowych przecinających skały płonne) [6, 8]. Złoże związane było z regionalną strefą uskokową wykorzystywaną przez dopływające, najprawdopodobniej z głębi, niskotemperaturowe roztwory hydrotermalne. Długość żyły złoża wynosi 450 m, a miąższość pirytovej strefy żyłowej wynosi 0,5–20 m. Żyła zapada pod kątem około 45° na wschód; zalega między dolomitami środkowodewońskimi w stropie a ilasto-piaskowcowymi osadami syluru i dewonu dolnego w spągu. Zasoby złoża rozpoznano do głębokości około 600 m od powierzchni. Znajdująca się w nim ruda pirytowa jest właściwie mieszaniną dwóch modyfikacji siarczków żelaza ( $\text{FeS}_2$ ) – markasytu i pirytu. Wykształcona jest w odmianie bądź sypkiej, ziemistej, zawierającej około 40% siarki, bądź skalistej, zawierającej 35% siarki. Odmiana syпка znajduje się w południowej i środkowej części złoża. Piryt skalisty występuje w części północnej. Przedmiotem zainteresowania i eksploatacji była także tzw. skała pirytowa, będąca pirytem impregnowanym i pirytem użylonym, zawierająca do 20% siarki. Wiercenia potwierdziły występowania złoża do głębokości 800 m [11].

Przy powierzchni złoża występuje tzw. czapa wietrzeniowa powstała w wyniku utlenienia pierwotnych rud złożonych z pirytu, hematytu i syderytu [8]. Składa ona się z rudy w postaci plastycznej, ziemistej masy („śmietana hematytowa” – czysty hematyt z niewielką ilością iżu), zawierającej ok. 48% Fe, 1% Mn i 11% S. W czapie tej stwierdzono ślady eksploatacji górniczej z okresu wpływów rzymskich, w postaci narzędzi i fragmentów obudowy; w warstwie kulturowej na powierzchni kopalni znalezione zostały rzymskie monety. Są to jedyne ślady głębinowej eksploatacji rud żelaza w starożytności na terenie Europy wschodniej i środkowej [2, 3]

## 2. Przebieg eksploatacji

Stwierdzone zasoby pirytu obok hematytu i syderytu dały w 1925 r. impuls do budowy Kopalni „Staszic”, w której eksploatowano metodą podziemną głównie piryt, markasyt (stanowiący nietrwałą modyfikację pirytu), dolomity pirytonośne, syderyt i hematyt.

Dolomity pirytonośne, zawierające 15–30% siarki poddawano we własnym zakładzie flotacyjnym procesowi wzbogacania, uzyskując produkt o zawartości około 40% siarki.

Złoże było od roku 1933 eksploatowane przez Spółkę z o.o. „Polrud” i Przedsiębiorstwo Górnicze dypl. inż. Zbysława Roehra. W wyniku procesu sądowego pomiędzy tymi przedsiębiorstwami a Skarbem Państwa Sąd Apelacyjny w Katowicach w dniu 13 października 1937 r. ustanowił zarząd sądowy [7], dokonując w ten sposób upaństwowienia kopalni.

Opierając się na wcześniejszych badaniach poszukiwawczych wykonanych do 1 stycznia 1939 r., Państwowy Instytut Geologiczny określił następująco zasoby złóż znajdujących się w obrębie pola górniczego „Staszic 103 P” [9, 10]:

- piryt –  $\text{FeS}_2$  – zasoby szacowano na około 3 mln t;
- syderyt – zasoby szacowano na około 500 tys. t;
- „śmietana hematytowa” –  $\text{Fe}_2\text{SO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  – zasobów nie określono, choć podano przypuszczalną wielkość około 32 tys. t.

W latach 1937–1939 wykonano szereg otworów wiertniczych mających na celu dalsze rozpoznanie złoża i przygotowanie go do eksploatacji [11]. Prace te zostały przerwane wybuch wojny. Podczas okupacji kopalnia została przejęta przez zarząd niemiecki.

Po wojnie w kopalni podjęto ponownie eksploatację. W 1968 r. zatwierdzono nową dokumentację złoża bogatych rud pirytowych i skały pirytovej zawierającej powyżej 10% siarki. Ponadto, jak wspomniano przy opisie złóż rud żelaza, w dokumentacji przedstawiono pozabilansowe zasoby rud syderytowych oraz szacunkowe zasoby dolomitów hematytowych [6]. W 1968 r. wydobyte pirytu o średniej zawartości 37% S i 34% Fe wyniosło około 130 tys. t, a skały pirytovej o średniej zawartości 20% siarki – około 170 tys. t.

Pyrut ze złoża w Rudkach, eksploatowany na potrzeby przemysłu chemicznego, wykorzystywano jako surowiec do produkcji kwasu siarkowego. Na początku lat 60. wybudowano zakład przeróbczy w celu wzbogacenia skały pirytovej. Parametry techniczne tego procesu były jednak niskie. Proces flotacyjnego wzbogacania wymaga zawartości w rudzie minimum 17% siarki, przy czym na wyprodukowanie 1 t koncentratu o zawartości około 40% siarki zużywa się ok. 3,5 t skały pirytovej. Przy znacznym wzroście kosztów wydobywania rudy z coraz głębszych poziomów kopalni i spadku procentowej zawartości składnika użytecznego, produkcja kopalni i zakładu przeróbczego stała się wysoce nierentowna. Jednocześnie od lat 60. rozwijała się eksploatacja złóż siarki rodzimej w rejonie tarnobrzeskim (początkowo metodą odkrywkową, następnie podziemnego wytapiania), stanowiąca konkurencję wobec produkcji siarki z rudy pirytovej [13].

W związku z wymienionymi wyżej okolicznościami zapadła decyzja o zamknięciu kopalni w Rudkach. Prace likwidacyjne rozpoczęły się w 1970 roku, przy czym równocześnie prowadzono rekultywację terenów przekształconych przez kopalnię.

Powierzchnia tych terenów wynosiła około 80 ha, a w jej skład wchodziły [13]:

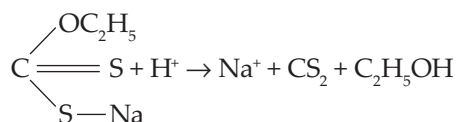
- osadniki poflotacyjne (ok. 12,50 ha);
- zwałowiska skały płonnej (ok. 7,20 ha);
- składowiska niskoprocentowej rudy żelaza (tzw. „Serwis”) (ok. 9,5 ha);
- torowisko kopalnianej kolejki wąskotorowej Michałów – Rudki (ok. 29,5 ha);
- wyrobiska po eksploatacji piasku podsadzowego w Michałowie (ok. 21 ha).

Wymienione obszary znacznie różniły się między sobą pod względem ukształtowania terenu oraz cech materiału gruntowego występującego na powierzchni. Dla większości terenów w Rudkach brak było odpowiednich wzorów oraz doświadczeń z już przeprowadzonych rekultywacji. Określenie jej kierunków wiązało się więc przede wszystkim z koniecznością przeprowadzenia szeregu ekspertyz i eksperymentów. Prace nad tym problemem rozpoczął zespół z Akademii Górniczo-Hutniczej pod kierownictwem prof. Tadeusza Skawiny, który zaproponował kierunki i metody rekultywacji uwzględniające cechy terenów przekształconych oraz możliwości techniczne i finansowe likwidowanej kopalni [14].

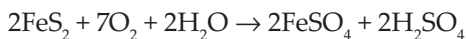
### 3. Rekultywacja terenów poeksploatacyjnych Kopalni „Staszic”

Większość terenów przekształconych w wyniku eksploatacji pirytu w Kopalni „Staszic” charakteryzowała się toksycznością związaną z obecnością siarczków żelaza i produktów ich utleniania.

W przypadku odpadów poeksploatacyjnych dodatkowo zagrożenie wiązało się z obecnością flokulantów (ksantogeniany etylowo-sodowe i ksantogeniany butylowo-sodowe), których szkodliwe oddziaływanie na organizmy żywe ujawnia się w środowisku kwaśnym, powodującym ich rozkład z wydzieleniem silnie toksycznego, gazowego  $CS_2$  [13]



Toksyczność czynna związana była z obecnością produktów utleniania siarczków, a w szczególności oddziaływania kwasu siarkowego powstałego w wyniku tych reakcji, na silnie rozdrobniony dolomit, stanowiący skały nadłożowe, według reakcji [13]:



Produktem tej reakcji był między innymi siarczan magnezu, którego toksyczność ujawniała się przy wyższych koncentracjach. Szlamy poflotacyjne charakteryzowały się dużym okresowym parowaniem, czemu towarzyszyło wynoszenie soli ku powierzchni przez wodę kapilarną. Szkodliwe oddziaływanie nadmiaru soli magnezu poznano w tzw. sołonczakach magnezowych, występujących na obszarach klimatu suchego: oprócz toksyczności chemicznej ich cechą była silna cementacja materiału glebowego przy wysychaniu.

Obecność związków toksycznych, a także takie własności szlamów, jak słaba zwilżalność i przepuszczalność oraz skłonność do przesychnania i rozpylania warstw powierzchniowych sprawiły, że nawet po dziesięciu latach od zakończenia budowy osadników na ich powierzchni nie było żadnej roślinności pochodzącej z sukcesji.

### 3.1. Rekultywacja osadników i trasy kolejki

W przypadku osadników rekultywacja polegała na przeprowadzeniu neutralizacji odpadów wapnem, a następnie przykryciu ich warstwą gruntów nietoksycznych. Na tak przygotowaną powierzchnię wprowadzono roślinność niską. Docelowo teren ten miał być przeznaczony pod ogródki działkowe.

Po upływie roku od podjęcia rekultywacji oceniono wstępnie jej skuteczność przez obserwacje wzrostu, zdrowotności i planowania roślinności wprowadzonej na teren zrekultywowany. Roślinność motylkowa już w drugim roku wegetacji zawiązała brodawki korzeniowe, wskazujące na brak toksycznego oddziaływania środowiska. Na to samo również wskazywało wnikanie korzeni roślin do szlamów obserwowane na osadnikach, a także dobra zdrowotność zwierząt żywionych zielonką lub sianem pochodzącym ze zrekultywowanych osadników. Zwiększona zawartość magnezu w roślinach mogła mieć korzystny wpływ na wartość pokarmu [1]. Spośród wprowadzonych roślin najlepszym wzrostem i rozwojem masy korzeniowej cechowała się lucerna, a w miejscach wilgotniejszych – komornica różkowa. Próbnymi pomiarami przeprowadzone w 1974 roku wykazały, że pierwszy pokos lucerny oszacowano na 10–18 t/ha zielonej masy. Dużą dynamikę wzrostu wykazały również trawy, a w szczególności kostrzewa czerwona, stokłosa bezostna, mietlica biaława oraz rajgras angielski.

Teren wzdłuż trasy kolejki został zneutralizowany, przeprowadzono też niwelację większości nasypów i wykopów. Odzyskana w ten sposób powierzchnia miała być przyłączona do sąsiadujących z nią działek rolnych. Piaskownia w Michałowie za względu na brak toksyczności wymagała tylko przeprowadzenia niezbędnych prac ziemnych i wprowadzenia roślinności.

### 3.2. Rekultywacja składowiska „Serwis”

Obszar składowiska niskoprocenowej rudy „Serwis” był obiektem bardzo trudnym do rekultywacji. W ilaste podłoże byłego składowiska wciśnięte były bryły rudy o różnej granulacji – od niewielkich okruchów do brył o objętości kilkudziesięciu decymetrów sześciennych. Grunty były bardzo silnie skażone produktami rozkładu składowanej rudy, przy czym skażenie to w niektórych rejonach sięgało do głębokości ponad metra. W próbkach z tych głębokości stwierdzono odczyn wahający się od 2,3–3,4 pH i zawartość wolnego  $H_2SO_4$  do 70 mg/100 g gruntu. Wyciągi wodne tych próbek wskazywały również na zasolenie tych gruntów, które sięgało w warstwach powierzchniowych do 2%, zaś na głębokości 1 m – do 1,5%. Skład chemiczny soli cechowała bardzo duża zawartość, wśród anionów, jonów Fe, Mg i Mn.

### 3.3. Zabiegi rekultywacyjne

Pierwszym zadaniem było usunięcie znajdujących się w strefie powierzchniowej największych brył i rozluźnienie kilkudziesięciocentymetrowej warstwy ilów. Użyto w tym celu ciężkiego sprzętu wykorzystywanego w budownictwie drogowym.

Podstawowym zabiegiem rekultywacyjnym była neutralizacja wolnego kwasu siarkowego [4]. Do zneutralizowania wolnego kwasu siarkowego znajdującego się w gruntach do głębokości metra, użyto rolniczego wapna palonego, mielonego do 100 t/ha. Wprowadzenie takiej ilości wapna na żadaną głębokość nie było możliwe jednorazowo, więc wykonano te prace w dwóch fazach [4].

Pierwszą fazę prac przeprowadzono wiosną 1972 r. Jako neutralizator zastosowano rolnicze wapno palone, mielone w ilości 80 t/ha, wprowadzone dwuwarstwowo poprzez rozsianie wapna w ilości 40 t/ha, dobre wymieszanie z gruntem glebogryzarką lub broną talerzową, orkę do głębokości 40 cm, wysiew drugiej dawki wapna w ilości 40 t/ha i dobre przemieszanie z gruntem broną talerzową. Przeprowadzona po 3–4 tygodniach kontrola skuteczności tej fazy wykazała niezadowalający stopień odkwaszenia gruntów składowiska. W związku z tym, w celu zablokowania pozostałych związków toksycznych, przeprowadzono drugą fazę neutralizacji. Jako neutralizator zastosowano mączkę fosforytową w ilości 3 t/ha, rozsiewając ją na części składowiska o powierzchni około 4 ha, zneutralizowanej w pierwszej fazie wapnem palonym. Następnie przemieszano ją z gruntem broną talerzową. Na pozostałej części składowiska przeprowadzono w 1973 roku pierwszą fazę neutralizacji.

## 4. Obecny stan składowiska „Serwis”

Od chwili rekultywacji upłynęło ponad 30 lat. Ze względu na jej eksperymentalny charakter i związaną z tym niepewność skutków celowe staje się przeprowadzenie badań kontrolnych stanu zanieczyszczenia gleb na tym terenie. Jest to tym ciekawsze, że w związku z likwidacją Kopalni „Staszic” na terenach zrekultywowanych nie przeprowadzono żadnych dalszych prac, a zainicjowane procesy przebiegały samoistnie. W celu oceny stanu gleb składowiska „Serwis” w listopadzie 2005 pobrano próbki gleb z terenu pogórniczego Kopalni „Staszic” (tereny byłego składowiska „Serwis”) z pięciu miejsc.

Teren byłego składowiska jest płaski, lekko nachylony w kierunku północnym. Położony jest pomiędzy drogą Nowa Słupia – Rudki a kompleksem leśnym na zachodzie od drogi. Stopień pokrycia terenu byłego składowiska i charakter roślinności wykazują duże zróżnicowanie: od traw i krzewów do wyraźnych „łysin”; miejsca poboru próbek wybrano tak, aby reprezentowały różny stopień pokrycia roślinnością. Profil nr 1 został pobrany z terenu bez roślinności; profil nr 2 pobrano z terenu,

na którym nie występuje roślinność z wyjątkiem kępek mchu; profil nr 3 pochodzi z rejonu pokrytego trawami, turzycami, krwawnikiem, trzcinnikiem piaskowym; profil nr 4 – terenu pokrytego obficie mchem; profil nr 5 – terenu bez roślinności (podobnie jak profil nr 1). Zanalizowany skład ziarnowy przedstawiono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Zawartość procentowa poszczególnych frakcji

Numer próbki	Głębokość pobrania [cm]	Zawartość procentowa frakcji o $\Phi$ [mm]				Grupa mechaniczna
		1–0,1	0,1–0,05	0,05–0,02	<0,02	
„Serwis 1”						
1a	0–23	41	8	9	42	gлина średnia
1b	23–46	26	6	10	58	gлина ciężka
1c	46–70	31	8	7	54	gлина ciężka
1d	70–95	23	9	9	59	gлина ciężka
1e	95–105	31	16	9	44	gлина średnia
1f	105–120	35	23	9	33	gлина lekka pylasta
„Serwis 2”						
2a	0–20	31	19	13	37	gлина średnia pylasta
2b	20–40	16	25	13	46	gлина średnia pylasta
„Serwis 3”						
3a	0–20	41	12	12	35	gлина średnia
3b	25–40	16	17	15	52	gлина ciężka pylasta
„Serwis 4”						
4a	0–15	17	6	11	66	gлина ciężka
4b	15–30	8	3	11	78	ił zwięzły
4c	30–45	11	5	22	62	gлина ciężka pylasta
4d	45–60	11	7	13	69	gлина ciężka
4e	60–75	21	9	10	60	gлина ciężka
„Serwis 5”						
5a	0–20	25	8	12	55	gлина ciężka
5b	20–45	22	7	15	56	gлина ciężka
5c	45–65	33	6	9	52	gлина ciężka
5d	65–85	16	5	7	72	gлина ciężka
5e	85–110	18	6	8	68	gлина ciężka
5f	110–125	34	5	8	53	gлина ciężka

Jak wynika z danych w tabeli, większość próbek możemy zaliczyć do utworów gliniastych ciężkich.

Wyznaczono gęstość właściwą i objętościową oraz obliczono porowatość i wskaźnik porowatości wybranych próbek. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2.** Gęstość właściwa i objętościowa próbek oraz porowatość i wskaźnik porowatości

Numer próbki	Gęstość właściwa [g/cm <sup>3</sup> ]	Gęstość objętościowa [g/cm <sup>3</sup> ]	Porowatość [%]	Wskaźnik porowatości
„Serwis 1”				
1a	2,75	1,93	30%	0,42
1b	2,77	1,90	31%	0,46
1c	2,78	1,96	29%	0,42
1d	2,79	1,90	32%	0,47
1e	2,79	1,85	34%	0,51
1f	2,73	1,71	37%	0,60
„Serwis 2”				
2a	2,78	–	–	–
2b	2,78	1,68	40%	0,65
Serwis 3				
3a	2,79	1,63	42%	0,71
3b	2,81	1,88	33%	0,49
„Serwis 4”				
4a	2,77	1,72	38%	0,61
4b	2,77	1,68	39%	0,65
4c	2,77	1,92	31%	0,44
4d	2,79	1,82	35%	0,53
4e	2,79	1,83	34%	0,52
„Serwis 5”				
5a	2,73	1,61	41%	0,70
5b	2,72	1,86	32%	0,46
5c	2,74	1,86	32%	0,47
5d	2,79	1,94	30%	0,44
5e	2,79	1,85	34%	0,51
5f	2,80	1,84	34%	0,52



Gęstość właściwa gleb waha się pomiędzy 2,72 a 2,81 g/cm<sup>3</sup>, gęstość objętościowa – pomiędzy 1,61 a 1,96 g/cm<sup>3</sup>, porowatość – między 29% a 42%, wskaźnik porowatości – w granicach 0,42–0,71. Przytoczone wartości gęstości objętościowej i porowatości sygnalizują jedno z ważniejszych uwarunkowań wolnego przebiegu rekultywacji. Wynika on, między innymi, z dużej zwięzłości gruntu, zbitej tekstury, niskiej zdolności filtracyjnej i prawdopodobnych ograniczeń wydajności przewietrzania strefy korzeniowej. Niedostatki te powodują, że proces neutralizacji gruntów przebiega stosunkowo wolno, opóźniany przez stagnującą wodę opadową dodatkowo zmniejszającą niską zdolność przewietrzania.

W celu dokładniejszej charakterystyki warunków powietrzno-wodnych przeprowadzono analizę próbek, wykorzystując wzory van Genuchtena. Otrzymane wyniki umieszczono w tabeli 3 oraz przedstawiono na rysunku 2.

Z obliczeń wynika, że struktura porowatości jest wadliwa, gdyż objętość porów powietrznych jest zbyt mała, co utrudnia oddychanie korzeniowe roślin. Równocześnie ilość wody łatwo dostępnej dla roślin jest niewielka, w związku z czym właściwości fizyczne można określić jako zdecydowanie niekorzystne.

W dalszej kolejności zbadano odczyn gleby w H<sub>2</sub>O i KCl, przewodność elektrolityczną właściwą, zawartość pierwiastków metali ciężkich Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb w próbkach, zawartość siarki całkowitej i węgla oraz straty prażenia. Długoletni brak uprawy przejawia się stosunkowo niską zawartością węgla organicznego (i substancji próchnicznych). Stopniowe utlenianie tych składników, wobec braku dostawy odpadów organicznych, powoduje utrzymywanie się w przedziale niskich wartości. Jest to zapewne jedna z przyczyn dużej zwięzłości wartości warstw powierzchniowych i opisanych wcześniej problemów z doprowadzeniem gruntu do odpowiedniego stanu fizycznego. Mnożąc zawartość procentową węgla przez empiryczny współczynnik 1,724 (przy założeniu, że substancja organiczna gleby zawiera 58% węgla), obliczono zawartość materii organicznej. Wyniki zestawiono w tabeli 4.

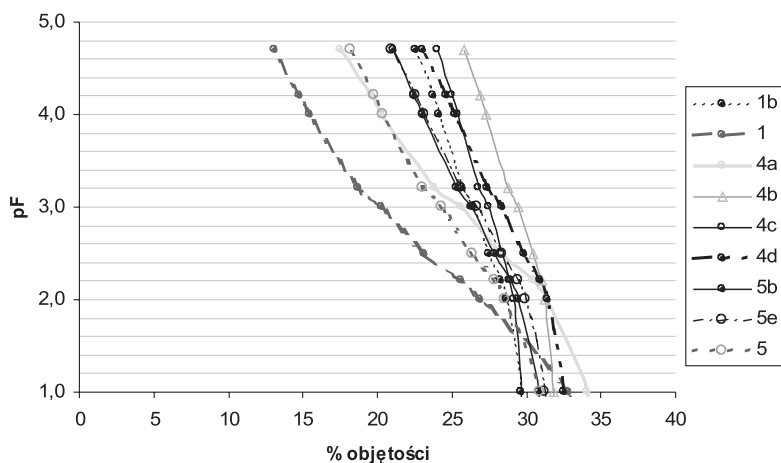
Wszystkie próbki cechują się odczynem ekstremalnie kwaśnym zarówno w H<sub>2</sub>O (pH poniżej 4), jak i w KCl (pH poniżej 4,5). Od tych wyników odbiega ponownie pH próbki 3a, które jest obojętne.

Na tak kwaśny odczyn wpływają obydwie formy kwasowości gleby: kwasowość czynna i potencjalna. Na kwasowość czynną, od której w głównej mierze zależy odczyn gleby, składają się wszystkie zdysocjowane, wolne jony H<sup>+</sup>, powstałe między innymi w wyniku utleniania siarczków żelaza (głównie pirytu), przy współdziałaniu mikroorganizmów.

Kwasowość potencjalna obejmuje wszystkie jony wodorowe i glinowe związane z kompleksem sorpcyjnym. Kwasowość potencjalna dzieli się na kwasowość wymienną i hydrolityczną. Kwasowość wymienna pochodzi od jonów H<sup>+</sup> wypieranych z kompleksu sorpcyjnego przez roztwory soli obojętnych (np. KCl, CaCl<sub>2</sub> itp.) oraz od jonów H<sup>+</sup>, które powstają w wyniku hydrolizy AlCl<sub>3</sub>.

Tabela 3. Wilgotność [% obj.] odpowiadająca ciśnieniu ssącemu [cm słupa wody]

Numer próbki	Wysokość słupa wody [cm] i odpowiadające jej wartości pF											objętość porów po-wietrznych	
	1 pF 0	10 pF 1	100 pF 2	150 pF 2,2	340 pF 2,5	1000 pF 3,0	2000 pF 3,2	10000 pF 4,0	15000 pF 4,2	50000 pF 4,7	woda łatwo dostępna		woda trudno dostępna
1b	0,298	0,297	0,286	0,283	0,275	0,264	0,257	0,241	0,237	0,226	0,018	0,019	0,023
1f	0,344	0,328	0,269	0,256	0,232	0,203	0,187	0,155	0,148	0,131	0,045	0,038	0,113
4a	0,345	0,341	0,314	0,305	0,284	0,256	0,238	0,203	0,196	0,175	0,045	0,043	0,061
4b	0,319	0,318	0,313	0,310	0,304	0,295	0,288	0,273	0,269	0,258	0,016	0,019	0,015
4c	0,297	0,296	0,291	0,289	0,284	0,275	0,268	0,254	0,250	0,240	0,015	0,018	0,013
4d	0,327	0,326	0,314	0,310	0,299	0,284	0,274	0,252	0,246	0,231	0,025	0,028	0,028
4e	0,320	0,318	0,301	0,296	0,284	0,268	0,258	0,235	0,230	0,215	0,027	0,028	0,036
5b	0,310	0,309	0,295	0,290	0,279	0,263	0,253	0,231	0,225	0,211	0,026	0,028	0,032
5e	0,314	0,313	0,300	0,295	0,284	0,267	0,256	0,232	0,226	0,210	0,028	0,030	0,031
5f	0,313	0,309	0,286	0,279	0,264	0,243	0,231	0,204	0,198	0,182	0,033	0,033	0,049



Rys. 2 Krzywa sorpcji wody (krzywa pF) dla pobranych próbek

Kwasowość hydrolytyczna ujawnia się pod wpływem soli hydrolyzujących zasadowo, np. octanu wapnia, sodu czy amonu. W wyniku działania soli hydrolyzujących zasadowo są wypierane z kompleksu sorpcyjnego jony kwasowości wymiennej oraz jony wodoru i glinu bardzo silnie związane z koloidami glebowymi. Stąd też kwasowość hydrolytyczna jest zawsze większa od wymiennej.

Na podstawie całkowitej kwasowości hydrolytycznej przy przeprowadzanej rekultywacji obliczono dawkę wapna potrzebną do odkwaszenia badanej gleby. Ze wzrostem pH wzrastała aktywność bakterii tlenowych, głównie siarkowych (m.in. *Thiobacillus sp.*), biorących udział w utlenianiu związków siarki. Powstający w wyniku reakcji kwas siarkowy obniżał pH, sprowadzając sytuację do stanu wyjściowego, w którym zanikała aktywność bakterii aerobowych. W przypadku tego typu gleb obliczona na podstawie całkowitej kwasowości hydrolytycznej dawka CaO okazała się niewystarczająca.

Utrzymywanie się tak niskiego pH spowodowane jest również oddziaływaniem wolnego kwasu siarkowego, powstałego z utleniania pirytu, na gleby terenu składowiska, przeobrażając znajdujące się w nich węglany wapnia w siarczan wapnia (gips). Wietrzenie pirytu i wypłukiwanie przez wody opadowe kwasu siarkowego oraz produktów jego neutralizacji przebiega o wiele wolniej w występujących tu utworach zwięzłych, niż miałyby to miejsce w utworach luźnych. Może to trwać nawet dziesiątki lat. Wskutek zakwaszenia następuje również wytrącanie się soli w warstwach wierzchnich gleb, będących w zasięgu korzeni roślin, ograniczając pobór wody w procesie osmozy, o czym można wnioskować na podstawie ubogiej szaty roślinnej występującej na terenie byłego składowiska.

Tabela 4. Zawartość metali ciężkich, siarki i węgla oraz odczyn i przewodność elektrolityczna próbek gleby

Numer próbki	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	Zasolenie [mS/cm]	Średnia zawartość S [%]	Średnia zawartość C [%]	Straty prażenia [%]	Zawartość materii organicznej [%]	Cr [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Pb [mg/kg]
„Serwis 1”													
1a	3,5	3,4	3,00	0,73	0,22	3,08	0,38	14,3	19,0	20,5	57,0	0,55	41,0
1b	3,1	2,9	2,82	0,51	0,13	3,82	0,22	13,2	28,5	22,5	64,0	0,85	39,0
1c	3,4	3,1	3,24	0,55	0,10	3,62	0,17	13,2	35,0	22,0	72,1	1,15	25,0
1d	3,5	3,1	3,74	0,63	0,10	4,42	0,17	13,2	50,0	23,0	92,7	1,50	22,5
1e	3,6	3,0	3,04	0,41	0,09	3,96	0,16	28,6	55,0	21,5	100,0	1,15	19,5
1f	3,9	3,0	2,50	0,38	0,09	3,86	0,16	18,7	57,5	24,5	107,5	1,05	26,5
„Serwis 2”													
2a	3,7	3,6	2,60	2,36	0,83	4,72	1,43	18,2	28,0	27,0	79,0	0,65	31,5
2b	2,9	2,7	2,45	0,41	0,21	3,68	0,36	28,6	26,5	16,0	52,4	0,35	14,0
„Serwis 3”													
3a	6,8	6,5	2,43	2,06	0,51	6,20	0,88	16,5	69,5	26,0	166,6	4,55	50,0
3b	3,4	3,2	2,88	0,55	0,25	4,22	0,43	12,7	33,0	19,0	62,4	0,65	16,0

Tabela 4 cd.

„Serwis 4”													
4a	3,3	3,1	2,61	0,63	0,30	4,37	0,52	24,2	28,5	30,5	67,3	0,40	89,5
4b	3,3	3,0	1,57	0,29	0,22	4,76	0,38	16,0	35,5	37,5	74,1	0,30	84,5
4c	3,4	3,1	1,76	0,27	0,18	4,84	0,31	36,3	39,0	36,0	79,1	0,40	105,5
4d	3,5	3,1	2,03	0,33	0,15	4,84	0,26	29,2	39,0	35,5	75,9	0,25	95,3
4e	3,6	3,2	2,03	0,29	0,13	4,60	0,22	25,9	40,5	31,5	73,3	0,50	70,0
„Serwis 5”													
5a	3,8	3,7	2,62	1,01	0,52	3,90	0,90	27,0	24,5	23,5	69,3	0,30	69,5
5b	3,5	3,2	2,06	0,38	0,22	4,84	0,38	22,6	23,5	19,5	57,7	0,40	30,5
5c	3,3	3,0	2,23	0,38	0,15	3,53	0,26	20,4	30,0	24,5	62,5	0,30	51,5
5d	3,6	3,2	3,00	0,46	0,16	4,76	0,28	36,9	44,5	39,5	84,8	0,60	93,5
5e	3,7	3,1	2,56	0,38	0,13	4,56	0,22	24,2	48,0	32,0	84,0	0,25	68,5
5f	4,2	3,4	1,87	0,23	0,10	4,93	0,17	33,6	56,0	26,5	105,5	0,25	96,5

Przewodność elektrolityczna, stanowiąca miarę zasolenia, dochodzi do 3,74 mS/cm, co w literaturze uważa się za wartość tolerowaną przez większość gatunków [5].

Uzyskane wielkości zawartości metali porównano z dopuszczalnymi wartościami zanieczyszczeń według Rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie standardów jakości gleb oraz standardów jakości ziemi (Dz. U. Nr 165 z 4.10.2002, poz. 1359) dla grupy B gruntów („grunty zaliczone do użytków rolnych z wyłączeniem gruntów pod stawami i gruntów pod rowami, grunty leśne oraz zadrzewione i zakrzewione, nieużytki, a także grunty zabudowane i zurbanizowane z wyłączeniem terenów przemysłowych, użytków kopalnych oraz terenów komunikacyjnych”). Przesłanką przemawiającą za zaliczenie badanych gruntów do tej grupy jest przeprowadzenie ich rekultywacji w kierunku rolnym.

Stężenie chromu w próbkach waha się w granicach od 12,7 do 36,9 mg/kg (przy dopuszczalnej wartości zanieczyszczeń wynoszącej 150 mg/kg); zawartość niklu mieści się w zakresie od 19 do 69,5 mg/kg, co wskazuje na niewielkie przekroczenie normy (wynoszącej do 50 mg/kg dla grupy B), zawartość miedzi określona w zakresie od 19 do 39,5 mg/kg mieści się w normie, której górna granica dla grupy B wynosi 100 mg/kg; podobnie zawartość cynku w granicach od 52,4 do 166,6 mg/kg (przy normie wynoszącej 300 mg/kg dla grupy B), jak i zawartość kadmu w granicach pomiędzy 0,25 a 4,55 mg/kg (przy normie wynoszącej 5 mg/kg dla grupy B) oraz zawartość ołowiu od 14,0 do 105,5 mg/kg (dla zakresu normy 100 mg/kg dla grupy B).

Wynika stąd, że zawartości metali ciężkich mieszczą się niemal we wszystkich próbkach w normie. Warto jednak zauważyć, że w wypadku próbki 3a („Serwis 3”) mieszczą się one blisko górnej granicy normy, a niekiedy nieznacznie ją przekraczają.

Zawartość procentowa siarki mieści się w granicach od 0,23 do 2,36%, a węgla – w zakresie od 09 do 0,83%. Obliczona zawartość substancji organicznej (0,155–1,431%) kwalifikuje próbki do utworów mineralnych właściwych [16], co potwierdzają dane w tabeli 2.

Otrzymane rezultaty uwidaczniają dużą różnicę pomiędzy wielkością strat prażenia a zawartością materii organicznej. Na stratę masy składają się więc, oprócz substancji organicznej, także inne związki podlegające spalaniu, jak woda krystaliczna, węglany oraz siarka, z której w tak wysokiej temperaturze powstaje SO<sub>2</sub>.

## 5. Podsumowanie

Składowisko niskoprocentowej rudy żelaza „Serwis” powstało w trakcie eksploatacji rud żelaza w Kopalni „Staszic” w Rudkach koło Kielc. Po likwidacji kopalni przeprowadzono prace rekultywacyjne tego terenu silnie skażonego produktami rozkładu składowanej rudy. Przeprowadzone badania miały na celu ocenę skuteczności rekultywacji po 30 latach od zamknięcia kopalni.

Na ich podstawie można sformułować następujące wnioski:

- Gleby składowiska „Serwis” można zaliczyć w większości do utworów gliniastych ciężkich. Gęstość właściwa gleb waha się pomiędzy 2,72 a 2,81g/cm<sup>3</sup>, gęstość objętościowa – pomiędzy 1,61 a 1,96 g/cm<sup>3</sup>, porowatość – między 29% a 42%, wskaźnik porowatości – w granicach między 0,42 a 0,71.
- Badane gleby charakteryzują się odczynem ekstremalnie kwaśnym (pH poniżej 4,0 w niemal wszystkich próbkach), co należy przypisać procesom utlenienia pirytu i innych siarczków żelaza do kwasu siarkowego.
- Na podstawie analizy pobranych próbek gleby stwierdzono, że zawartość metali ciężkich w glebie mieści się w normie, natomiast zaobserwowano dość znaczne zasolenie określone za pomocą przewodności elektrolitycznej próbek.
- Obszar składowiska jest porośnięty roślinnością w sposób zróżnicowany: od traw i krzewów do wyraźnych „łysin” bez roślin. Zgodnie z uzyskanymi rezultatami badań głównym powodem braku pokrycia roślinnego jest ekstremalnie kwaśny odczyn gleb. Wskazuje to na zbyt małą dawkę neutralizatora podczas przeprowadzonej rekultywacji.
- Wyniki analizy prowadzą do wniosku o niecałkowitej skuteczności przeprowadzonej rekultywacji, głównie ze względu na odczyn ekstremalnie kwaśny.
- Przeprowadzenie ponownej rekultywacji wymaga obliczenia właściwej, skutecznej dawki neutralizatora. Dodanie substancji alkalizującej powinno również spowodować poprawę właściwości fizycznych gleb składowiska.

## Literatura

- [1] Aleksandrowicz J., Machnicki B., Gzyl W.: *Ekologia – metale życia – zdrowie*. Zeszyty Naukowe AGH, nr 451, Sozologia i Sozotechnika, z. 3, 1974, 33–48 (za: [13]).
- [2] Bielenin K.: *Łysogórski okręg górniczo-hutniczy z okresu wpływów rzymskich*. Rocznik Świętokrzyski, t. 1, 1962, 97–149 (za: [8]).
- [3] Bielenin K.: *Starożytne górnictwo i hutnictwo żelaza w Górach Świętokrzyskich*. Wiadomości Hutnicze, t. 16, 1974, 352–357 (za: [8]).
- [4] *Dokumentacja badań prowadzonych w latach 1970-1973 nad rekultywacją terenów kopalni pirytu „Staszic” w Rudkach k. Kielc*. AGH, Archiwum Instytutu Kształtowania i Ochrony Środowiska, Kraków 1974 (maszynopis).
- [5] Gołda T.: *Rekultywacja*. Skrypty Uczelniane AGH, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2005.

- [6] Kozłowski S., Mojsiejenko A., Rogaliński J., Rubinowski Z., Wrona H., Żak Cz.: *Surowce mineralne województwa kieleckiego*. Wyd. Geologiczne, Warszawa 1971.
- [7] *Notatka dla Pana Dyrektora Departamentu Górniczo-Hutniczego*. 1938 (maszynopis).
- [8] Piaskowski J.: *Rodzaje rud stosowanych do wytopu żelaza na ziemiach Polski w starożytności i we wczesnym średniowieczu*. [w:] *Surowce mineralne w pradziejach i we wczesnym średniowieczu Europy Środkowej*, Wyd. PAN, Wrocław 1988, 63–80.
- [9] *Pismo do Departamentu Górniczo-Hutniczego Ministerstwa Przemysłu i Handlu w sprawie poszukiwań na Kopalni „Staszic”*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 22.03.1939 r.
- [10] *Program gospodarczy Kopalni „Staszic”*. 1939 (maszynopis).
- [11] *Program poszukiwań na piryty i syderyt w obrębie pola górniczego „Staszic 103.P.” Państwowa Kopalnia Rudy „Staszic”, 1939 (wraz z mapą)*
- [12] Rubinowski Z. (red.): *Perspektywiczny projekt poszukiwań i badań złóż rud metali w Górach Świętokrzyskich*. Archiwum Instytutu Geologicznego, Warszawa 1964 (maszynopis).
- [13] Skawina T., Trafas M., Gołda T.: *Rekultywacja terenów pogórnich kopalni piryty „Siarkopol” w Rudkach k. Kielc*. Zeszyty Naukowe AGH, nr 466, Kraków 1974, 9–22.
- [14] Skawina T.: *Wytyczne dla wykonania niezbędnych prac rekultywacyjnych na terenie byłego składowiska rudy „Serwis” kopalni piryty w Rudkach w jesieni 1976 i na wiosnę 1977 r.* Zakład Rekultywacji Terenów Przemysłowych AGH, Kraków 1976 (maszynopis).
- [15] Wojtanowicz P.: *Określenie potrzeb neutralizacji w rekultywacji gruntów toksycznie kwaśnych*. Półrocznik AGH Inżynieria Środowiska, t. 9, z. 1, 2004, 83–92.
- [16] Zawadzki S.: *Podstawy gleboznawstwa*. PWRiL, Warszawa 1970.