

Beata KLOJZY-KARCZMARCZYK¹
Janusz MAZUREK¹
Jarosław STASZCZAK¹

Rtęć w odpadach wydobywczych i możliwości ich zagospodarowania w wyrobiskach odkrywkowych województwa śląskiego

Wprowadzenie

W trakcie wydobywania i wzbogacania węgla powstają znaczne ilości materiałów odpadowych, głównie skały płonne (wykorzystywane często jako kruszywo) oraz muły węglowe. Od wielu lat wielkość wytwarzania tych materiałów kształtuje się w Polsce na poziomie 32–37 mln Mg rocznie (m.in. Baic i Witkowska-Kita 2011; Kopacz 2015). Jednym ze sposobów zagospodarowania odpadów wydobywczych jest ich wykorzystanie do rekultywacji terenów zdegradowanych przez przemysł. Doniesienia literaturowe wskazują na możliwość zastosowania kruszyw produkowanych na bazie skały płonnej oraz mułów węglowych, do rekultywacji wyrobisk odkrywkowych poprzez wypełnienie oraz do budowy warstw izolujących na składowiskach odpadów zarówno komunalnych, jak i przemysłowych (m.in. Doniecki i Siedlecka 2006; Sobik-Szołtysek i in. 2013; Kłojzy-Karczmarczyk i in. 2016a, b; Kłojzy-Karczmarczyk i Mazurek 2017; Kłojzy-Karczmarczyk i Staszczak 2018). Zastosowanie odpadów wydobywczych w celu rekultywacji technicznej jest zagadnieniem złożonym, zarówno w sferze przepisów odnoszących się do wymaganej jakości odpadów, jak i w zakresie określania istotnych warunków lokalizacyjnych. Dodatkowo, obserwowane częste zmiany uregulowań prawnych w gospodarowaniu odpadami i ochronie środowiska komplikują, w niektórych przypadkach, proces postępowania z poszczególnymi rodzajami odpadów (m.in. Góralczyk i Baic 2009; Góralczyk 2011; Kłojzy-Karczmarczyk i Mazurek 2015; Kicki i Sobczyk 2016; Kłojzy-Karczmarczyk i Staszczak 2018).

¹ Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków;
e-mail: beatakk@min-pan.krakow.pl, jan@min-pan.krakow.pl, jaro@min-pan.krakow.pl.

Wypełnianie wyrobiska poeksploatacyjnego materiałem obcym stanowi podstawowy etap fazy technicznej procesu rekultywacji w kopalniach górnictwa skalnego (Ostręga i Uberman 2010; Czekał i Sobczyk 2015). W przypadku zastosowania odpadów wydobywczych w wyrobiskach odkrywkowych istotne są uwarunkowania lokalizacji wyrobiska w stosunku do lokalnej budowy hydrogeologicznej i hydrologii terenu oraz obowiązujące wymagania co do jakości odpadów. Biorąc pod uwagę powyższe uwarunkowania, dokonano oceny lokalizacji wyrobisk piasków i żwirów oraz wyrobisk surowców węglanowych z obszaru województwa śląskiego jako potencjalnych miejsc lokowania odpadów wydobywczych. Ocenie poddano usytuowanie wyrobisk na tle głównych zbiorników wód podziemnych oraz wód powierzchniowych. Pozwoliło to na określenie, czy materiał odpadowy można w określonym miejscu lokować. W zakresie jakości materiału odpadowego, wykorzystywanego do rekultywacji, analizie poddano rtęć, jej zawartość całkowitą oraz formę wymywalną w różnych warunkach środowiska (obojętnych i kwaśnych). Rtęć jest pierwiastkiem powszechnie obecnym i charakterystycznym w węglach oraz odpadach wydobywczych, a ze względu na wysoką toksyczność stanowi potencjalne zagrożenie dla środowiska gruntowo-wodnego. Analiza została przeprowadzona z uwzględnieniem wyników opublikowanych przez autorów w pracach wcześniejszych (Kłojzy-Karczmarczyk i Mazurek 2013, 2014, 2019a, b, 2021; Kłojzy-Karczmarczyk i in. 2016a, b, Kłojzy-Karczmarczyk i Staszczak 2017, 2019; Staszczak 2020).

Uwarunkowania zastosowania odpadów wydobywczych w wyrobiskach

Najważniejszym warunkiem, stawianym dla procesów wypełniania wyrobisk odpadami, jest zapewnienie, że rekultywacja nie spowoduje bezpośredniego zagrożenia szkodą w środowisku. Jest to warunek ogólny i nakłada na rekultywującego obowiązek zakwalifikowania przedsięwzięcia pod kątem spełnienia szeregu norm i rozporządzeń w zakresie ochrony środowiska, w rejonie prowadzonej rekultywacji w celu wykazania, że materiały, które zostaną wykorzystane do rekultywacji, nie stwarzają zagrożenia dla środowiska w odpowiednio długim okresie czasu. W praktyce oznacza to, że zanieczyszczenia wymywane z bryły obiektu po zakończonym wypełnianiu i rekultywacji (m.in. związki rtęci) powinny być uwalniane w sposób niezagrażający środowisku, w ilościach dopuszczonych dla danego środowiska gruntowo-wodnego (Kłojzy-Karczmarczyk i in. 2016a, b). Zatem, materiały stosowane do wypełniania rekultywowanych wyrobisk powinny charakteryzować się odpowiednimi parametrami jakościowymi oraz powinny wykazywać stabilność parametrów dla dużych partii materiału.

Oprócz zastosowania odpowiedniego materiału do wypełniania rekultywowanego wyrobiska, bardzo ważne jest również jego uszczelnienie. Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 30 kwietnia 2013 r. w sprawie składowisk odpadów (Dz.U. z 2013 r. poz. 523) zmienionym rozporządzeniem Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 19 marca 2021 r. (Dz.U. z 2021 r. poz. 673), wymagany współczynnik filtracji dla naturalnej bariery geologicznej dla obecnie budowanych składowisk wynosi $1,0 \times 10^{-9}$ m/s. W przypadku zamykania składowisk dodatkowe zabezpieczenie przed infiltracją wód opadowych poprzez uszczelnianie jego powierzchni wymagane jest jedynie dla składowisk odpadów niebezpiecznych. Jednym z materiałów, możliwych do zastosowania do izolowania rekultywowanych składowisk mogą być muły

węglowe z górnictwa węgla kamiennego, których wartości współczynnika filtracji mieszczą się w zakresie 10^{-8} – 10^{-11} m/s, przy średniej wartości rzędu 10^{-9} m/s. Można wnioskować, że materiał ten spełnia generalnie kryteria szczelności dla przepływów poziomych, nie stanowi on jednak bariery izolującej dla przesiąkania pionowego. W wyniku pewnych modyfikacji, przyjmuje on wartość rekomendowaną dla naturalnej bariery geologicznej uszczelniającej podłoże i ściany boczne składowisk odpadów oraz dla warstwy ekranującej w procesie zamykania składowisk, mniejszą od $1,0 \times 10^{-9}$ m/s (Klojzy-Karczmarczyk i Staszczak 2018).

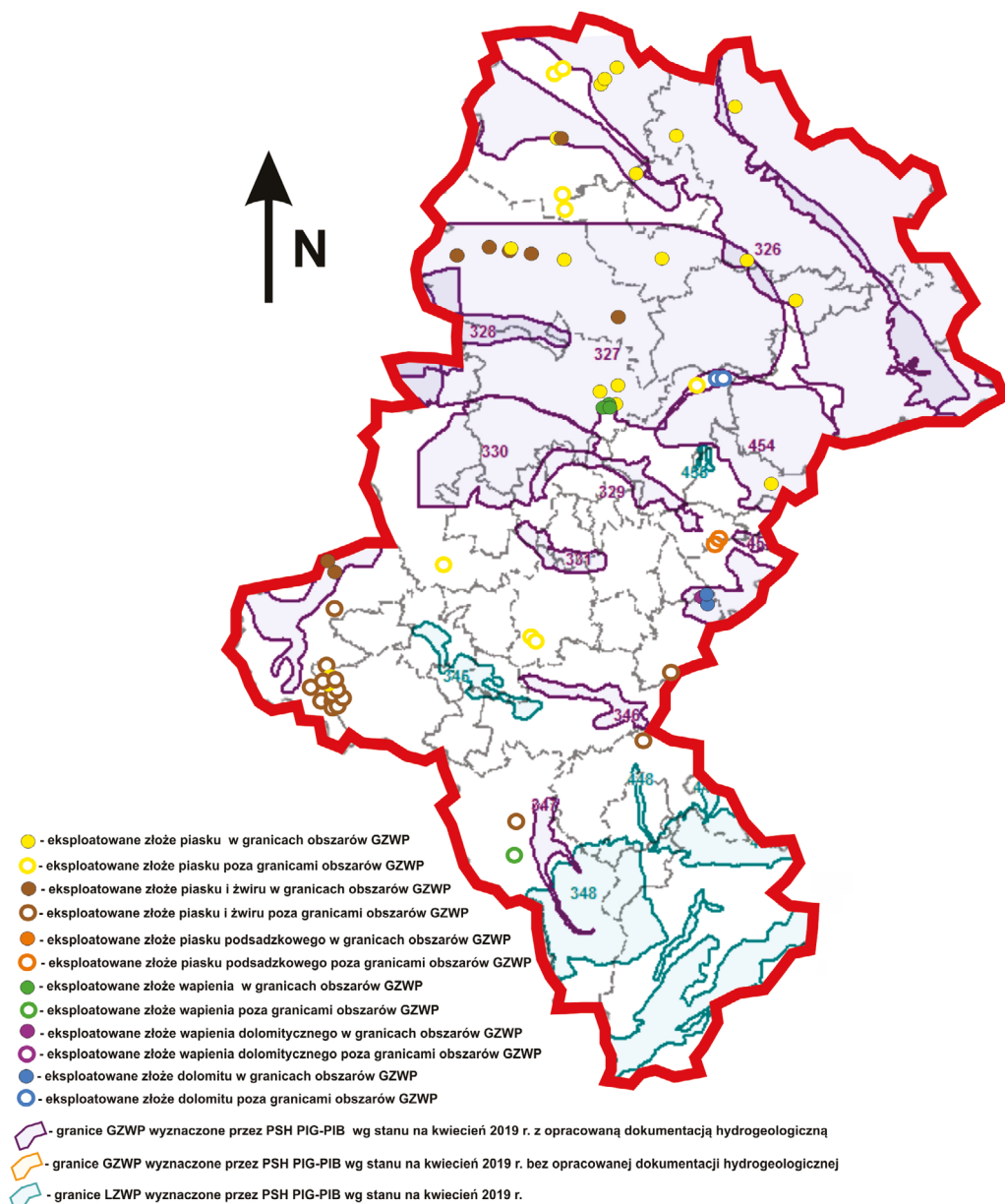
Lokalizacja wyrobisk odkrywkowych na tle warunków środowiskowych

Analizie poddano wyrobiska czynne, w których eksploatowane są surowce węglanowe oraz wyrobiska piasków i żwirów, według stanu eksploatacji z lat 2015–2017. Na przestrzeni kilku lat analizowano wybrane obszary Polski, ze szczególnym uwzględnieniem obszaru województwa śląskiego (Klojzy-Karczmarczyk i in. 2016a; Klojzy-Karczmarczyk i Staszczak 2017, 2019; Staszczak 2020). Województwo śląskie jest szczególnie interesujące jako obszar, na którym znajduje się wiele czynnych oraz nieczynnych wyrobisk odkrywkowych. Ponadto wyrobiska istniejące na obszarze tego województwa są zlokalizowane w niedalekiej odległości od miejsc wytwarzania odpadów wydobywczych górnictwa węgla kamiennego. Na podstawie danych z Bilansu zasobów złóż kopalin w Polsce (Szufficki i in., red., 2018) utworzono listę wszystkich eksploatowanych w województwie śląskim w 2017 roku wyrobisk odkrywkowych złóż surowców węglanowych z grupy kamienie łamane i bloczne oraz piasków i żwirów, również piasków podsadzkowych. Następnie odkrywki te zlokalizowano na ortofotomapie (<http://www.geoportal.gov.pl>), odczytując współrzędne geograficzne obiektów, które zostały naniesione na mapę granic GZWP terenu Polski wykonaną przez Państwową Służbę Hydrogeologiczną Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego wg stanu na kwiecień 2019 (<http://epsh.pgi.gov.pl/epsh/>). W rezultacie otrzymano mapę wszystkich eksploatowanych wyrobisk odkrywkowych złóż wymienionych grup w województwie śląskim (rys. 1). Do analizy nie włączono wyrobisk nieeksploatowanych.

Przeprowadzono rozpoznanie uwarunkowań lokalizacyjnych czynnych wyrobisk odkrywkowych na terytorium województwa śląskiego, dla których istnieje w przyszłości potencjalna możliwość przeprowadzenia rekultywacji technicznej (poprzez wypłaniecie i ukształtowanie powierzchni) z wykorzystaniem odpadów z wydobycia węgla kamiennego oraz innych odpadów czy surowców. Omawiane, eksploatowane złoża zlokalizowane są na obszarze 15 powiatów (tab. 1). Zgodnie z informacjami z Bilansu (Szufficki i in. 2018) na obszarze przedmiotowego województwa znajdują się łącznie 74 czynne wyrobiska złóż piasków i żwirów, piasków podsadzkowych oraz surowców węglanowych. W pracy wcześniejszej na podstawie Bilansu, analizowano jedynie dane dotyczące wyrobisk złóż piasków i żwirów (w tym piasków podsadzkowych) (Szufficki i in. 2017), gdzie wykazano łącznie 58 wyrobisk.

W wyniku przeprowadzonej analizy, według stanu eksploatacji na koniec roku 2016, (Klojzy-Karczmarczyk i Staszczak 2019) w zakresie lokalizacji czynnych wyrobisk odkrywkowych złóż badanych grup na tle granic GZWP stwierdzono, że 21 obiektów spośród 58 wyrobisk piasków i żwirów znajduje się w granicach wyznaczonych obszarów GZWP, co stanowi

około 36% wszystkich wyrobisk tego materiału. Po uwzględnieniu kolejnego kryterium, jakim jest odległość od cieków powierzchniowych wynosząca co najmniej 500 metrów, wymagania zostaną spełnione tylko przez 19 z 58 eksploatowanych wyrobisk odkrywkowych co daje 32%. Po przyjęciu kryterium oddalenia od rzek na poziomie 1000 metrów, w dogodnej lokalizacji pozostaną już tylko 2 wyrobiska, czyli niecałe 4% z wszystkich eksploatowanych.



Rys. 1. Lokalizacja czynnych wyrobisk odkrywkowych w województwie śląskim (na podstawie: Staszczak 2020)

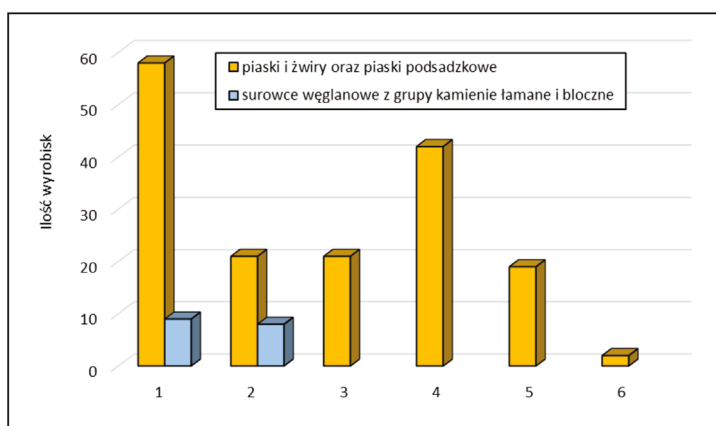
Fig. 1. Location of active opencast workings in the Silesian Voivodeship

TABELA 1. Lokalizacja wyrobisk odkrywkowych złóż piasków i żwirów w powiatach województwa śląskiego w odniesieniu do granic GZWP

TABLE 1. Location of opencast sand and gravel deposits in poviats of the Silesian Voivodeship in relation to the borders of the MGB

Powiat	Ilość wyrobisk/Ilość na obszarze GZWP (Szufficki i in. 2017)*	Ilość wyrobisk/Ilość na obszarze GZWP (Szufficki i in. 2018)**
Piaski i żwiry, piaski podsadzkowe		
będziński	3/0	1/0
bielski	1/0	1/0
bieruńsko-lędziński	1/0	1/0
cieszyński	1/0	1/0
częstochowski	5/4	5/4
gliwicki	1/0	1/0
kłobucki	8/5	9/6
lubliniecki	6/6	7/7
m. Dąbrowa Górnicza	1/1	1/1
m. Jaworzno i m. Sosnowiec	2/0	2/0
mikołowski	2/0	2/0
myszkowski	1/1	1/1
raciborski	5/2	7/2
tarnogórski	2/2	3/3
wodzisławski	15/0	17/0
wodzisławski i raciborski	4/0	6/0
pozostałe powiaty	0/0	0/0
Śląskie razem	58/21	65/24
Surowce węglanowe z grupy kamienie łamane i bloczne		
będziński	b.d.	2/0
bieruńsko-lędziński	b.d.	3/3
cieszyński	b.d.	1/0
tarnogórski	b.d.	3/3
pozostałe powiaty	b.d.	0/0
Śląskie razem	9/8***	9/6
Razem	67/29	74/30

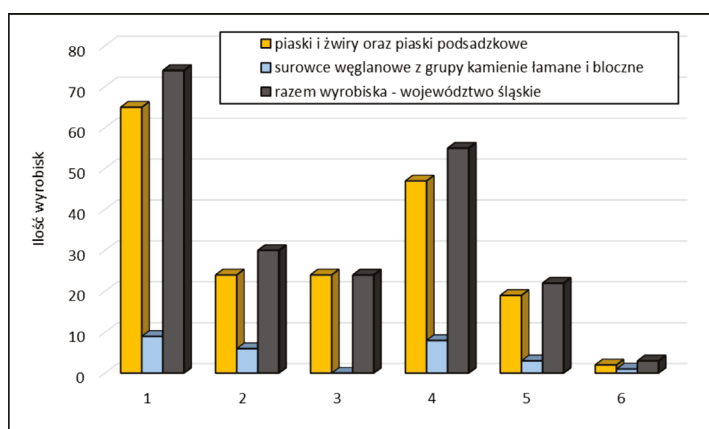
Źródło: * Kłojzy-Karczmarczyk i Staszczak 2019; ** Staszczak 2020; *** Kłojzy-Karczmarczyk i Staszczak 2017.



Rys. 2. Ilości wyrobisk odkrywkowych w odniesieniu do granic GZWP oraz cieków wodnych w województwie śląskim, według stanu eksploatacji na koniec 2015 oraz 2016 roku (na podstawie: Kłojzy-Karczmarczyk i Staszczak 2017, 2019)

1 – ilość wyrobisk w województwie śląskim, 2 – ilość wyrobisk na obszarze GZWP, 3 – ilość wyrobisk w odległości poniżej 500 m od cieków wodnych, 4 – ilość wyrobisk w odległości poniżej 1000 m od cieków wodnych, 5 – ilość wyrobisk poza granicami obszarów GZWP oraz w odległości większej niż 500 m od cieków wodnych, 6 – ilość wyrobisk poza granicami obszarów GZWP oraz w odległości większej niż 1000 m od cieków wodnych

Fig. 2. Number of opencast workings in relation to the borders of the MGB and watercourses in the Śląskie Voivodeship, according to the operation status at the end 2015 and 2016



Rys. 3. Ilości wyrobisk odkrywkowych w odniesieniu do granic GZWP oraz cieków wodnych w województwie śląskim, według stanu eksploatacji na koniec 2017 roku (na podstawie: Staszczak 2020)

1 – ilość wyrobisk w województwie śląskim, 2 – ilość wyrobisk na obszarze GZWP, 3 – ilość wyrobisk w odległości poniżej 500 m od cieków wodnych, 4 – ilość wyrobisk w odległości poniżej 1000 m od cieków wodnych, 5 – ilość wyrobisk poza granicami obszarów GZWP oraz w odległości większej niż 500 m od cieków wodnych, 6 – ilość wyrobisk poza granicami obszarów GZWP oraz w odległości większej niż 1000 m od cieków wodnych

Fig. 3. Number of open-pit workings in relation to the borders of the MGB and watercourses in the Śląskie Voivodeship, according to the operation status at the end of 2017

Analizę warunków lokalizacyjnych dla wyrobisk piasków i żwirów, w tym piasków podsadzkowych, przedstawiono na rysunku 2. Na rysunku tym zamieszczono ponadto wyniki analogicznej analizy dla wyrobisk surowców węglanowych województwa śląskiego w zakresie lokalizacji w obszarach GZWP.

W wyniku przeprowadzonej rozszerzonej analizy (złoża piasków i żwirów oraz dodatkowo surowców węglanowych), według stanu eksploatacji na koniec roku 2017 (Staszczak 2020), stwierdzono, że 30 obiektów spośród 74 wyrobisk znajduje się w granicach wyznaczonych obszarów GZWP, co stanowi około 41% ogółu. Po uwzględnieniu drugiego kryterium, jakim jest odległość od cieków powierzchniowych, wynosząca co najmniej 500 metrów, wymagania lokalizacyjne zostaną spełnione tylko przez 22 z 74 eksploatowanych wyrobisk odkrywkowych, co daje niecałe 30%, a gdy kryterium oddalenia od rzek zwiększymy do 1000 metrów pozostaną już tylko 3 wyrobiska co daje niecałe 4% z wszystkich eksploatowanych. Spośród wyrobisk surowców węglanowych z grupy kamienie łamane i bloczne, 6 z 9 wyrobisk znajduje się na obszarze GZWP, co stanowi aż 67%. Z kolei w grupie piasków i żwirów udział ten jest niższy i wynosi 36%. Na obszarach GZWP znajduje się 24 z 65 wyrobisk odkrywkowych.

Z 9 wyrobisk surowców węglanowych poza obszarem GZWP i w odległości ponad 500 metrów od cieków powierzchniowych zlokalizowane są zaledwie 3 obiekty. W przypadku rozszerzenia kryterium z 500 do 1000 metrów warunki spełnia już tylko 1 wyrobisko. Z kolei z 65 wyrobisk w kategorii piaski i żwiry, piaski podsadzkowe poza obszarem GZWP i w odległości ponad 500 metrów od cieków powierzchniowych zlokalizowanych jest 19 obiektów. W przypadku rozszerzenia kryterium z 500 do 1000 metrów warunki spełniają zaledwie 2 wyrobiska (Staszczak 2020). Analizę warunków lokalizacyjnych dla wyrobisk surowców węglanowych oraz wyrobisk piasków i żwirów przedstawiono na rysunku 3.

Rtęć w odpadach wydobywczych w aspekcie możliwości ich zagospodarowania

W celu bezpiecznego lokowania odpadów wydobywczych w wyrobiskach odkrywkowych należy, oprócz dogodnych warunków lokalizacyjnych omówionych powyżej, zapewnić odpowiednią jakość odpadów w świetle wymagań przepisów odnoszących się m.in. do parametrów wymywania zanieczyszczeń z odpadów (m.in. Kłojzy-Karczmarczyk i Mazurek 2015). Dostępne wyniki badań prowadzonych na przestrzeni kilku lat pokazują, że w sprzyjających warunkach mogą zachodzić procesy powodujące wymywanie do środowiska gruntowo-wodnego niektórych grup zanieczyszczeń, w tym jonów metali, z rtęcią włącznie (m.in. Kłojzy-Karczmarczyk i Mazurek 2013, 2014, 2019a, b, 2021). Analiza możliwości wykorzystania odpadów wydobywczych z produkcji węgla kamiennego lub produktów wytwarzanych na bazie skały płonnej, jest zagadnieniem złożonym w świetle przepisów odnoszących się do jakości środowiska gruntowo-wodnego (m.in. Góralczyk i Baic 2009; Góralczyk, red. 2011; Korban 2011; Kłojzy-Karczmarczyk i Mazurek 2015). Rtęć, wśród wszystkich zanieczyszczeń obecnych w węglach i odpadach wydobywczych, jest jednym z najbardziej charakterystycznych wskaźników obecnych powszechnie w materiale, a jednocześnie ze względu na swoją toksyczność może stanowić zagrożenie dla

środowiska gruntowo-wodnego. Dla prawidłowej oceny jakości odpadów wydobywczych oraz kruszyw produkowanych na bazie skały płonnej konieczne jest m.in. przeprowadzenie statycznych testów wymywalności zanieczyszczeń (w tym m.in. rtęci) z próbek odpadów. Pozwala to w ogólny i przybliżony sposób określić zagrożenie dla środowiska wodnego. Kruszywa oraz odpady przeznaczone do wypełniania wyrobisk nie powinny stanowić zagrożenia dla środowiska, a ich bezpieczeństwo można oszacować poprzez dotrzymanie wartości granicznych odpowiednich parametrów (Klojzy-Karczmarczyk i Mazurek 2015, Klojzy-Karczmarczyk i in. 2016a, b).

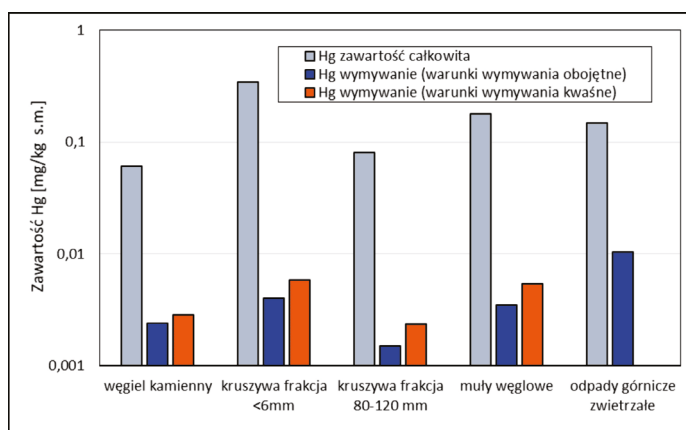
Wyniki kilkuletnich badań zawartości rtęci w materiale oraz w eluatach z wymywania zanieczyszczeń z odpadów wydobywczych (m.in. Klojzy-Karczmarczyk i Mazurek 2019a, 2019b, 2021), wskazują wyraźnie na znaczną zmienność otrzymanych wartości. Dotyczy to zarówno testów z użyciem wody dejonizowanej o pH zbliżonym do obojętnego, jak i testów z zastosowaniem zakwaszonych roztworów o pH około 3, sporządzonych z użyciem kwasu octowego w celu symulacji środowiska o charakterze kwaśnym. Celem prowadzonych badań była próba wykazania związku pomiędzy poziomem wymycia rtęci (udział formy wymywalnej w całkowitej zawartości Hg wyrażony w %) a charakterem próbek oraz wykazanie różnicy wielkości tego parametru dla odpadów wydobywczych w stosunku do węgla kamiennego. Analizie poddano zarówno węgle kamienne, jak i odpady wydobywcze (skała płonna: frakcja drobna <6 mm, kruszywa – skała płonna frakcja gruba 80–120 mm, muły z przeróbki węgla kamiennego) oraz odpady wydobywcze zwietrzałe pobrane na hałdzie górniczej. Łącznie analizie wymywania podano 16 próbek węgla kamiennych oraz 34 próbki odpadów wydobywczych (Klojzy-Karczmarczyk i Mazurek 2014, 2019a, b, 2021). Wymywalność w warunkach obojętnych wykonano zgodnie z wytycznymi normy PN EN 12457/1-4. Wymywalność w warunkach kwaśnych (pH roztworu około 3) wykonano w oparciu o metodę TCLP. Przy oznaczaniu zawartości rtęci wykorzystano metodę AAS.

W latach 2014–2019 prowadzono wyłącznie badania wymywalności w warunkach bliskich obojętnym (medium ługujące – woda dejonizowana, test 1:10). Z wykonanych badań wynika (Klojzy-Karczmarczyk i Mazurek 2014, 2019a, b), że rtęć zgromadzona w odpadach wydobywczych może w sprzyjających warunkach przechodzić do wód gruntowych i podziemnych. Największą skłonnością do wymywania rtęci charakteryzowały się odpady zwietrzałe ze zwałowiska odpadów wydobywczych a zdecydowanie niższą kruszywa, muły oraz węgle kamienne z pokładów GZW. Na podstawie zawartości całkowitej i wielkości wymywania określono udział formy wymywalnej w całkowitej zawartości tego pierwiastka, czyli poziom uwalniania rtęci z materiału (poziom wymycia). W węglach kamiennych pobranych z pokładów GZW poziom wymycia kształtował się w granicach od 2,4 do 8,7% przy średniej wartości 4,7%. Odpady wydobywcze charakteryzują się znaczną zmiennością udziału formy wymywalnej rtęci. W tym przypadku różnice wynikają najprawdopodobniej z czasu sezonowania próbek. Materiały uboczne produkcji węgla kamiennego (bezpośrednio z produkcji) typu kruszywa (częściowo zagospodarowywane jako surowiec) oraz muły węglowe wykazują udział formy wymywalnej rtęci na niskim poziomie od 0,6 do 3,6% przy średniej wartości 1,7%. W odpadach zwietrzałych udział formy wymywalnej zdecydowanie wzrasta do 7,3%.

W kolejnym etapie analizy badania w zakresie wymywania rtęci z węgla i odpadów wydobywczych rozszerzono o badania wymywalności w kwaśnych warunkach (Klojzy-Karcz-

marczyk i Mazurek 2021). Przebadano analogiczne próbki, jak w latach wcześniejszych: próbki węgla kamiennych z wybranych pokładów GZW, odpady wydobywcze górnictwa węgla kamiennego, bezpośrednio z produkcji – odpady świeże, kruszywa w dwóch frakcjach ziarnowych <6 mm oraz 80–120 mm oraz muły węgla kamiennego. Próbek odpadów ze zwałowiska w warunkach środowiska kwaśnego nie badano. Uzyskane wyniki potwierdzają wcześniejsze wnioski z prac autorów z lat 2014–2019. Badane materiały wykazują zróżnicowanie zawartości całkowitej rtęci oraz jej formy wymywalnej. Zaobserwowano wyraźny wzrost wymywalności rtęci w środowisku kwaśnym w każdej z grup badanych próbek. Na rysunku 4 przedstawiono uśrednione, z analizowanych lat, zawartości rtęci całkowitej oraz jej formy wymywalnej w węglach i odpadach wydobywczych oraz uzupełniono je o najnowsze wyniki badań, prowadzone w środowisku o charakterze kwaśnym.

Biorąc pod uwagę wyniki analiz z lat 2014–2021 (Klojzy-Karczmarczyk i Mazurek 2014, 2019a, b, 2021) można stwierdzić, że obserwuje się zróżnicowanie otrzymanych wyników w zależności od zastosowanego medium ługującego, symulującego warunki środowiska, jak i w zależności od analizowanego materiału. Dla węgla kamiennego zawartość rtęci całkowitej kształtuje się w granicach 0,003–0,301 mg/kg (Klojzy-Karczmarczyk i Mazurek 2013). Wielkość wymycia rtęci kształtuje się na średnim poziomie 3,9%. W kwaśnym środowisku wielkość ta zwiększa do średniej wartości 4,1%. Odpady wydobywcze typu skała płonna (kruszywa) charakteryzują się wyższą zawartością rtęci całkowitej we frakcji najdrobniejszej i niższą we frakcjach grubszych (średnio 0,343–0,080 mg/kg). Udział formy wymywalnej rtęci w kruszywach jest na średnim poziomie 1,3–2,0%. Przy obniżaniu pH wielkość ta zwiększa się do wartości 1,7–3,2%. Muły węglowe charakteryzują się zawartością rtęci całkowitej na poziomie 0,097–0,218 mg/kg. Średni udział formy wymywalnej jest na poziomie 1,8%. Przy obniżaniu pH udział ten osiąga średnią wartość 3,0%. Wyraźny wzrost wymywalności obserwuje się w odpadach zwierzęcych (czas sezonowania na hałdzie ponad 15 lat). Całkowita zawartość rtęci w takich odpadach kształtuje się w granicach od 0,062 do 0,299 mg/kg.



Rys. 4. Zawartość poszczególnych form Hg w próbkach – wartości uśrednione z podziałem na poszczególne rodzaje analizowanego materiału (na podstawie: Klojzy-Karczmarczyk i Mazurek 2014, 2019b, 2021)

Fig. 4. The mercury form content on the samples – averages mean for the various types of samples analyzed

Wymywalność rtęci kształtuje się w granicach od 5,1 do 11,5% w odniesieniu do zawartości całkowitej.

Uzyskane wyniki zawartości rtęci w odpadach i testach wymywania, w świetle aktualnie obowiązujących przepisów, nie wskazują na możliwość znacznego zagrożenia środowiska gruntowo-wodnego w wyniku oddziaływania analizowanych odpadów w zakresie uwalniania rtęci. Wyniki odniesiono do rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 15 lipca 2011 r. w sprawie kryteriów zaliczania odpadów wydobywczych do odpadów obojętnych, które generalnie stanowi, że odpady wykorzystywane do rekultywacji wyrobisk nie mogą powodować szkody w środowisku, co odnosi się bezpośrednio do konieczności zapewnienia poziomów zawartości rtęci w glebie lub produktach wymywania na określonym poziomie.

Podsumowanie i wnioski

Zastosowanie odpadów wydobywczych do wypełniania wyeksploatowanych wyrobisk odkrywkowych oraz w celu budowania warstwy uszczelniająco-ochronnej jest możliwe na etapie rekultywacji technicznej. Zastosowanie różnego rodzaju odpadów wydobywczych do wypełniania wyrobisk jest zagadnieniem złożonym zarówno w sferze przepisów odnoszących się do wymaganej jakości materiału odpadowego, jak i w zakresie prawidłowego wyznaczenia lokalizacji obszarów dozwolonych do takiego zagospodarowania odpadów.

Istotne jest rozpoznanie lokalizacji czynnych wyrobisk odkrywkowych na tle granic głównych zbiorników wód podziemnych (GZWP) oraz ich usytuowania w stosunku do lokalnych cieków wodnych. Analizie lokalizacji poddano wyrobiska, w których eksploatowane są surowce węglanowe z grupy kamienie łamane i bloczne oraz wyrobiska piasków i żwirów oraz piasków podsadzkowych, według stanu eksploatacji i analiz z lat 2015–2017 (Klojzy-Karczmarczyk i in. 2016a; Klojzy-Karczmarczyk i Staszczak 2017, 2019; Staszczak 2020). Analizowano teren województwa śląskiego jako obszar, na którym znajduje się wiele czynnych oraz nieczynnych wyrobisk odkrywkowych i są one zlokalizowane często w bliskiej, korzystnej ekonomicznie odległości od miejsc wytwarzania odpadów wydobywczych górnictwa węgla kamiennego. Analizy zostały wykonane zatem w różnych latach aktywności wyrobisk. W grupie surowców węglanowych (kamienie łamane i bloczne) aż 8 z 9 lub 6 z 9 wyrobisk, zlokalizowanych na terenie tego województwa, znajduje się na obszarze GZWP, co stanowi średnio 78%. Poza granicami GZWP oraz w odległości ponad 500 metrów od cieków powierzchniowych zlokalizowane są zaledwie 3 obiekty. W grupie piasków i żwirów 21 z 58 oraz 24 z 65 wyrobisk odkrywkowych znajduje się na obszarze GZWP, co stanowi 36–37%. Poza granicami GZWP oraz w odległości ponad 500 od cieków powierzchniowych znajduje się 19 obiektów.

Odrębnym zagadnieniem jest jakość odpadów przeznaczonych do rekultywacji wyrobisk. Przeprowadzone na podstawie wieloletnich badań analizy zawartości rtęci w próbkach odpadów oraz analizy wymywalności w środowisku obojętnym i kwaśnym (Klojzy-Karczmarczyk i Mazurek 2014, 2019a, b, 2021) wskazują na brak zagrożenia dla środowiska w świetle obowiązujących aktualnie przepisów. Uzyskane wyniki badań wskazują jednak na wyraźny

wzrost wielkości wmywania rtęci ze świeżych odpadów w przypadku zakwaszenia środowiska oraz w sytuacji, kiedy odpady składowane są na powierzchni terenu w dłuższym okresie czasu. Charakterystyka wmywania jest zróżnicowana dla różnych grup badanego materiału. Z wykonanych badań wynika, że wielkość wmywania rtęci z próbek węgla i odpadów jest zróżnicowana w zależności od zastosowanego medium ługującego. Generalnie zwiększenie wmywalności w środowisku kwaśnym jest około dwukrotne. Wynika z tego, że obniżone pH środowiska ma wyraźne znaczenie dla zwiększenia wielkości wmywania rtęci. Największy wpływ na zwiększenie uwalniania rtęci z analizowanego materiału odpadowego ma jednak czas sezonowania materiału i procesy wietrzeniowe, a zwiększenie wmywalności jest w tym przypadku trzy–sześciokrotne.

Ze względu na skalę wydobycia surowców oraz konieczność rekultywacji obszarów poksplatacyjnych możliwość zagospodarowania różnego rodzaju odpadów w procesie wypełniania wyrobisk jest interesującym kierunkiem ich wykorzystania. Jednak należy podkreślić, że wiele wyrobisk znajduje się w zasięgu obszarów głównych zbiorników wód podziemnych oraz w zasięgu oddziaływania cieków powierzchniowych, co zdecydowanie utrudnia możliwość zastosowania materiału odpadowego.

Publikacja zrealizowana w ramach badań statutowych Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk.

Literatura

- Baic, I. i Witkowska-Kita, B. 2011. Technologie zagospodarowania odpadów z górnictwa węgla kamiennego – diagnoza stanu aktualnego, ocena innowacyjności i analiza SWOT. *Rocznik Ochrona Środowiska* 13, s. 1315–1326.
- Czekaj, J. i Sobczyk, W. 2015. Zagospodarowanie terenu pogórniczego na przykładzie wyrobisk po kruszywach w powiecie krakowskim. *Górnictwo Odkrywkowe* 56(3), s. 29–35.
- Doniecki, T. i Siedlecka, E. 2006. Odpadowe muły węglowe jako element izolacji mineralnej składowisk odpadów. *Górnictwo i Geoinżynieria* 30(3/1), s. 41–46
- Góralczyk, S., red., 2011. *Gospodarka surowcami odpadowymi z węgla kamiennego*. Warszawa: IMBiGS, 327 s.
- Góralczyk, S. i Baic I., 2009. Odpady z górnictwa węgla kamiennego i możliwości ich gospodarczego wykorzystania. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* 12(2/2), s. 145–157.
- Kicki, J. i Sobczyk, E.J., red. 2016. *Prawne, techniczne, ekonomiczne i środowiskowe aspekty gospodarki skalą płonną w kopalniach węgla kamiennego*. Kraków: Wyd. IGSMiE PAN, s. 185.
- Klojzy-Karczmarczyk, B. i Mazurek, J. 2013. Studies of mercury content in selected coal seams of the Upper Silesian Coal Basin. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 29 (4), s. 95–106, DOI: 10.2478/gospo-2013-0047.
- Klojzy-Karczmarczyk, B. i Mazurek, J. 2014. Badania zawartości rtęci i siarki w odpadach z obszaru nieczynnej hałdy odpadów górnictwa węgla kamiennego. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* 17(4), s. 289–302.
- Klojzy-Karczmarczyk, B. i Mazurek, J. 2015. Uwarunkowania prawne i środowiskowe rekultywacji wyrobisk odkrywkowych z wykorzystaniem odpadów górnictwa węgla kamiennego lub produktów na bazie skały płonnej. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* nr 90, s. 67–78.
- Klojzy-Karczmarczyk, B. i Mazurek, J. 2017. Propozycje rozszerzenia działań celem zagospodarowania materiałów odpadowych z górnictwa węgla kamiennego. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* nr 98, s. 151–165.
- Klojzy-Karczmarczyk, B. i Mazurek, J. 2019a. Wielkość wmywania rtęci z próbek gruntów i odpadów różnego pochodzenia. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* nr 475, s. 85–92, DOI: 10.7306/bpig.10.

- Klojzy-Karczmarczyk, B. i Mazurek, J. 2019b. Wymywalność rtęci z węgla kamiennych i odpadów wydobywczych. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* nr 108, s. 141–154, DOI: 10.24425/znigsm.2019.128671.
- Klojzy-Karczmarczyk, B. i Mazurek, J. 2021. The leaching of mercury from hard coal and extractive waste in the acidic medium. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 37(2), s. 163–178, DOI: 10.24425/gsm.2021.137567.
- Klojzy-Karczmarczyk, B. i Staszczak, J. 2018. Zastosowanie mułów węglowych do uszczelnienia składowisk odpadów komunalnych – rozpoznanie możliwości. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* nr 105, s. 95–108.
- Klojzy-Karczmarczyk, B. i Staszczak, J. 2017. Czynne wyrobiska odkrywkowe surowców węglanowych na tle granic GZWP a możliwości ich rekultywacji przez wypełnienie odpadami. *Przegląd Geologiczny* 65(11/1), s. 979–982.
- Klojzy-Karczmarczyk, B. i Staszczak, J. 2019. Rozpoznawanie lokalizacji wyrobisk piasków i żwirów względem granic GZWP oraz cieków powierzchniowych na obszarze województwa śląskiego. *Biuletyn PIG* 475, s. 93–100.
- Klojzy-Karczmarczyk i in. 2016a – Klojzy-Karczmarczyk, B., Mazurek, J., Staszczak, J., Mucha, J. i Paw, K. 2016. Ocena możliwości rekultywacji odkrywkowych wyrobisk poeksploatacyjnych z wykorzystaniem kruszywa ze skał towarzyszących pokładom węgla kamiennego na przykładzie ZG Janina. *Górnictwo Odkrywkowe* 5, s. 23–33.
- Klojzy-Karczmarczyk i in. 2016b – Klojzy-Karczmarczyk B., Mazurek J., Paw K., 2016 – Możliwości zagospodarowania kruszyw i odpadów wydobywczych górnictwa węgla kamiennego ZG Janina w procesach rekultywacji wyrobisk odkrywkowych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 32(3), s. 111–134, DOI: 10.1515/gospo-2016-0030.
- Kopacz, M. 2015. Ocena kosztów gospodarki skałą płonną w funkcji zmiennego poziomu współczynnika uzysku węgla netto na przykładzie kopalni węgla kamiennego. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 31(3), s. 121–144, DOI: 10.1515/gospo-2015-28.
- Korban, Z. 2011. Problem odpadów wydobywczych i oddziaływania ich na środowisko, na przykładzie zwałowiska Nr 5A/W-1 KWK „X”. *Górnictwo i Geologia* 6(1), s. 109–120.
- Ostręga, A. i Uberman, R. 2010. Kierunki rekultywacji i zagospodarowania – sposoby wyboru, klasyfikacja i przykłady. *Górnictwo i Geoinżynieria* 34(4), s. 445–461.
- Sobik-Szołtysek i in. 2013 – Sobik-Szołtysek, J., Bień, J. i Milczarek, M. 2013. Analiza współczynnika filtracji w aspekcie możliwości stosowania alternatywnych materiałów do budowy barier izolacyjnych na składowiskach odpadów. *Rocznik Ochrona Środowiska* 15, s. 1393–1410.
- Staszczak, J. 2020. Operating Opencast Mines of Selected Groups in the Silesian Voivodeship Against a Background of Water Environment and Possibilities of Waste Placing. *Inżynieria Mineralna* 2(2), s. 147–152.
- Szufficki i in., red. 2017 – Szufficki, M., Malon, A. i Tyminski, M., red. 2017. *Bilans zasobów złóż kopalni w Polsce wg stanu na 31 XII 2016 r.* Warszawa: PIG-PIB.
- Szufficki i in., red. 2018 – Szufficki, M., Malon, A. i Tyminski, M., red. 2018. *Bilans zasobów złóż kopalni w Polsce wg stanu na 31 XII 2017 r.* Warszawa: PIG-PIB.

Rtęć w odpadach wydobywczych i możliwości ich zagospodarowania w wyrobiskach odkrywkowych województwa śląskiego

Słowa kluczowe: wyrobiska odkrywkowe, lokalizacja, rekultywacja, odpady wydobywcze, wymywanie zanieczyszczeń, rtęć

Streszczenie: Wypełnianie wyrobisk odkrywkowych odpadami wydobywczymi jest możliwe w procesie rekultywacji technicznej, ale wymaga szczegółowego rozpoznania warunków środowiskowych. Zastosowanie różnego rodzaju odpadów do wypełniania wyrobisk jest zagadnieniem złożonym w zakresie jakości materiału odpadowego oraz w zakresie określenia lokalizacji miejsc przeznaczonych do takiego zagospodarowania odpadów. Istotne jest rozpoznanie lokalizacji czynnych wyrobisk odkrywkowych na tle granic głównych zbiorników wód podziemnych (GZWP) oraz w pobliżu cieków wodnych. Analizie poddano wyrobiska, w których eksploatowane są surowce węglanowe oraz wyrobiska piasków i żwirów. Analizy zostały wykonane w różnych latach aktywności wyrobisk ((Klojzy-Karczmarczyk i in. 2016a; Klojzy-Karczmarczyk i Staszczak 2017, 2019; Staszczak 2020). W grupie surowców węglanowych (kamienie lamane i bloczne), poza granicami GZWP oraz w odległości ponad 500 metrów od cieków powierzchniowych zlokalizowane są zaledwie 3 obiekty. W grupie piasków i żwirów, poza granicami GZWP oraz w odległości ponad 500 od cieków powierzchniowych znajduje się 19 obiektów.

Zestawiono zawartość całkowitą rtęci oraz wielkość jej wymywania. Podano udział formy wymywalnej w całkowitej zawartości pierwiastka. Badania prowadzono w różnych warunkach pH środowiska. Analizę przeprowadzono na podstawie badań z lat 2014–2021 (Klojzy-Karczmarczyk i Mazurek 2014, 2019a, b, 2021). Odpady wydobywcze typu skała płonna (kruszywa) charakteryzują się wyższą zawartością rtęci całkowitej we frakcji najdrobniejszej i niższą we frakcjach grubszych. Udział formy wymywalnej rtęci w kruszywach jest na średnim poziomie 1,3–2,0%. Średni udział formy wymywalnej w mułach węglowych jest na poziomie 1,8%. Przy obniżaniu pH środowiska, udział ten wzrasta w każdym przypadku. Wyraźny wzrost wymywalności obserwuje się ponadto w odpadach zwietrzalnych. Ze względu na jakość materiału odpadowego, badania odpadów wydobywczych wykazały możliwość ich zastosowania do celów rekultywacji.

The mercury in extractive waste and the possibility of their management in open-pit workings of the Silesian Voivodeship

Keywords: open-pits, location, reclamation, extractive waste, leaching, mercury

Abstract: The open-cast workings filling with extractive waste is possible in the process of technical reclamation, but it requires a detailed recognition of environmental conditions. The use of various types of waste to fill the workings is a complex issue, in the field of the waste material quality and in the field of determining locations assigned for such waste management.

It is important to recognise the location of active opencast mines against a background of main groundwater basins (MGB) and close to watercourses. The workings, left after extraction of carbonate raw materials, as well as sands and gravels, were analysed. The analysis were performed in different years of the open pits activity (Klojzy-Karczmarczyk et al. 2016a; Klojzy-Karczmarczyk and Staszczak 2017, 2019; Staszczak 2020). In the carbonate raw materials group (crushed and block stone) only 3 facilities are situated outside the MGB area and at a distance of more than 500 m from surface watercourses. In the sands and gravels group only 19 facilities are situated outside the MGB area and at a distance of more than 500 m from surface watercourses.

Total mercury content and the amount of its leaching was compiled. The percentage of leachable form in the total content of the element was studied. The studies were carried out under various pH conditions of the environment. The analysis was based on the studies from 2014–2021 (Klojzy-Karczmarczyk and Mazurek 2014, 2019a, b, 2021). The extractive waste of the barren rock type (aggregate) features a higher content of total mercury in the finest fraction and a lower in coarser fractions. The share of mercury leachable form on average is 1.3–2.0%. The share of mercury leachable from coal sludge is approx. 1.8%. At pH reduction this share increases in each case. A clear increase in leachability is observed in the weathered waste. Because of the waste material quality, the studies on extractive waste have shown a possibility to use it for reclamation.

