

SPADEK I WZROST ZNACZENIA GÓRNICTWA ODKRYWKOWEGO

TRANSFORMACJA POLSKIEGO GÓRNICTWA ODKRYWKOWEGO: OD WYDOBYCIA KOPALIN MASOWYCH KU ZAAWANSOWANEMU ODZYSKOWI SUROWCÓW STRATEGICZNYCH W DOBIE TRANSFORMACJI ENERGETYCZNEJ I REGRESU INFRASTRUKTURALNEGO

THE DECLINE AND RISE OF OPEN-PIT MINING IMPORTANCE

TRANSFORMATION OF POLISH OPEN-PIT MINING: FROM BULK MINERAL EXTRACTION TO ADVANCED RECOVERY OF STRATEGIC RAW MATERIALS IN AN ERA OF ENERGY TRANSITION AND INFRASTRUCTURAL DECLINE

Jan Stefanowicz - Kancelaria Juris Sp. z o.o., Warszawa

DOI:10.5604/01.3001.0055.7644

Streszczenie

Koncentrując się na punkcie styku kryzysu tradycyjnego budownictwa drogowego (spadek popytu na kruszywa) z kryzysem energetycznym (wygaszanie wydobycia węgla), w przekonaniu Autora powstają unikalne warunki do przeprowadzenia „Wielkiego Skoku” technologicznego w polskim górnictwie odkrywkowym.

Autor wskazuje na konieczność głębokiej redefinicji sektora górnictwa odkrywkowego w obliczu nakładających się zjawisk: wygaszania wydobycia węgla brunatnego oraz prognozowanego spadku zapotrzebowania na kruszywa naturalne wywołanego ograniczeniem inwestycji w infrastrukturę drogową (autostrady, drogi klasy S i lokalne). Autor stawia tezę, że transformacja i dalszy rozwój branży zależą od przejścia na wyższy poziom technologiczny, gdzie kopalnia staje się multisurowcowym zakładem przeróbczym. Autor wskazuje jednak przy tym na bariery prawne i praktykę, zwyczaję, konserwatyzm w postrzeganiu górotworu z perspektywy surowców energetycznych.

Kluczowym elementem proponowanej strategii jest eksploatacja zasobów żwirów i piasków, antropogenicznych i nadkładu pod kątem pozyskiwania pierwiastków śladowych, krytycznych i kluczowych, współwystępujących, takich jak lit, ren, german oraz metale ziem rzadkich (itr, neodym, prazeodym, iterb, terb), których ceny i strategiczne znaczenie na rynkach technologii obronnych i kosmicznych oraz OZE dynamicznie rosną.

Konieczna i nieunikniona głęboka transformacja górnictwa odkrywkowego będzie możliwa pod warunkiem przeprowadzenia równie niezbędnych zmian w prawie geologicznym i górniczym, jak i zagospodarowania przestrzennego oraz ochrony środowiska, a likwidacja barier i zmiana kluczowych uwarunkowań prawnych w procedurach zdecydują o tym, czy utracimy szansę na wejście do czołówki w Europie, jak i na świecie, innowacyjnych gospodarek opartych na potencjale technologiczno-surowcowym.

Implementacja innowacyjnych technologii, w tym selektywnej adhezji, może stać się „lokomotywą”, wymuszając fuzję przemysłu wydobywczego z jednostkami badawczo-rozwojowymi i uczelniami wyższymi. Proponowany model transformacji zdaniem Autora nie tylko zabezpiecza bazę zasobową państwa zgodnie z wytycznymi CRMA, ale również generuje nową wartość dodaną, przekształcając tradycyjne odkrywki w zaawansowane ogniwa gospodarki opartej na wiedzy.

Podstawowe bariery prawne to: brak regulacji rozpoznawania, dokumentowania i rekasyfikacji złóż antropogenicznych, w tym w szczególności wielosurowcowych (jednocześnie z własnością prywatną, samorządową, Skarbu Państwa), transformacji kopalń, rozpoznawania złóż dokumentowanych w latach 60-90 XX w. i ich ochrony do czasu szerokiego reprocessingu przy analizie pobranych próbek aktualnie, jak i z zachowanych rdzeni. Bariery jest brak zdefiniowania obszarów lub/i złóż perspektywicznych i prognostycznych, a także płynnych przekształceń koncesji dla PRG, rekasyfikacji złóż i pzz dla zachowania ciągłości funkcjonowania zakładów górniczych i utrzymania finansowania inwestycji w nowe technologie.

Autor przedstawia też symulację sugerowanych rozwiązań z chwilą zniesienia barier prawnych w postaci case study postaci case study dla kopalni piasków lub na haldzie.

Autor analizując dokonuje swojej oceny i formułuje rekomendacje wskazując na:

- Synergię negatywów: Wykorzystanie dwóch problemów (koniec węgla i koniec boomu na drogi) do stworzenia jednego, nowoczesnego rozwiązania. To wpisuje się w akxiologię wprowadzaną w UE w komitetach sterujących i ministerstwach;
- Nauka jako napęd: Wskazanie na fuzję przemysłu i nauki otwiera drzwi do szerokiego strumienia finansowania z Funduszu Sprawiedliwej Transformacji oraz funduszy Horyzont Europa (Horizon Europe);
- Wartość finansowa: Przejście z marży na tonie piasku na mrżę na gramie/kilogramie złota, terbu czy itru radykalnie zmienia profil wyceny spółek górniczych na Warszawskiej Giełdzie Papierów Wartościowych (z old economy na deep tech). Szersze przedstawienie analiz, źródeł danych i rekomendacji w referacie.

Słowa kluczowe: górnictwo odkrywkowe, złoża antropogeniczne, surowce krytyczne i strategiczne, transformacja energetyczna

Summary

By focusing on the intersection of the crisis in traditional road construction (declining demand for aggregates) and the energy crisis (phase-out of coal), the Author believes that unique conditions are emerging for a technological „Great Leap” in Polish open-pit mining.

The Author points to the necessity of a profound redefinition of the open-pit mining sector in the face of overlapping phenomena: the phasing out of lignite mining and the projected drop in demand for natural aggregates caused by limited investments in road infrastructure (motorways, expressways, and local roads). The Author posits that the transformation and further development of the industry depend on moving to a higher technological level, where the mine becomes a multi-commodity processing plant. However, the Author also identifies legal barriers, established practices, customs, and conservatism in perceiving the rock mass solely through the lens of energy resources.

A key element of the proposed strategy is the exploitation of gravel and sand resources, anthropogenic deposits, and overburden for the extraction of trace, critical, and key co-occurring elements, such as lithium, rhenium, germanium, and rare earth elements (yttrium, neodymium, praseodymium, ytterbium, terbium), whose prices and strategic importance in defence, space, and renewable energy markets are growing dynamically.

The necessary and inevitable deep transformation of open-pit mining will be possible provided that equally essential changes are made to geological and mining law, spatial planning, and environmental protection. The removal of barriers and changes to key legal conditions in procedures will determine whether Poland loses the opportunity to join the leaders of innovative economies based on technological and resource potential, both in Europe and globally.

The implementation of innovative technologies, including selective adhesion, may become a „locomotive” for national applied sciences, forcing a fusion of the mining industry with R&D units and universities. According to the Author, the proposed transformation model not only secures the state’s resource base in accordance with CRMA guidelines but also generates new added value, transforming traditional open-pit mines into advanced nodes of a knowledge-based economy.

Primary legal barriers include: lack of regulations for the identification, documentation, and reclassification of anthropogenic deposits, particularly multi-commodity ones (involving private, municipal, and State Treasury ownership), difficulties in mine transformation and the identification of deposits documented between the 1960s and 1990s, lack of protection for these deposits until broad reprocessing can occur, based on current sample analysis and preserved cores. lack of defined prospective and prognostic areas or deposits. The absence of fluid concession transitions for Geological Works Plans (PRG), deposit reclassification, and Mineral Deposit Development Plans (PZZ) to ensure the continuity of mining plant operations and investment financing for new technologies.

The Author also presents a simulation of the suggested solutions upon the removal of legal barriers in the form of a case study for a sand mine or a heap. In analyzing the situation, the Author formulates recommendations by highlighting:

- Synergy of Negatives: Utilizing two problems (the end of coal and the end of the road boom) to create a single, modern solution. This aligns with the axiology introduced in the EU within steering committees and ministries;
- Science as a driver: Pointing to the fusion of industry and science opens doors to a wide stream of funding from the Just Transition Fund and Horizon Europe;
- Financial value: Transitioning from margins on tons of sand to margins on grams/kilograms of gold, terbium, or yttrium radically changes the valuation profile of mining companies on the Warsaw Stock Exchange (from „old economy” to „deep tech”);

A broader presentation of analyses, data sources, and recommendations is included in the paper.

Keywords: open-pit mining, anthropogenic deposits, critical and strategic raw materials, energy transition

Stan aktualny

1. Spadek wydobycia węgla brunatnego i strategia koncesjonariuszy

Zgodnie z Polityką Energetyczną Polski do 2040 r. (PEP2040) oraz strategiami grup energetycznych (Polska Grupa Energetyczna, Zespół Elektrowni Pątnów-Adamów-Konin), wydobycie węgla brunatnego znajduje się w trendzie schyłkowym. W latach 2020–2025 wydobycie spadło z ok. 46 mln t do szacowanych 32–35 mln t w 2026 r. Strategia ZE PAK zakłada najszybsze odejście od węgla (do 2030 r.) na rzecz OZE i wodoru¹. Oznacza to, że miliony ton nadkładu na zwałowiskach zewnętrznych i wewnętrznych stają się dostępne natychmiast. Natomiast zgodnie ze Strategią PGE planowane jest wygaszanie po 2030 r. (Bełchatów) i ok. 2040 r. (Turów). Tu potencjał składowanego nadkładu jako złóż antropogenicznych jest największy w Europie.²

2. Nadkład jako złoża antropogeniczne (zasoby wcześniej dokumentowane)

W procesie udostępniania złóż węgla brunatnego zdjęto miliardy metrów sześciennych nadkładu. W tradycyjnych dokumentacjach traktowano go jako odpad, jednak ostatnio współczesna rewaloryzacja wskazuje już na konkretne współwystępujące zasoby (Tab. 1).

W nauce przyjmuje się, że ok. 15-20% masy nadkładu w polskim górnictwie odkrywkowym węgla brunatnego posiada parametry pozwalające na zakwalifikowanie go jako źródło kopalin współwystępujących lub towarzyszących bądź złoża wielosurowcowe, antropogeniczne.³ Biorąc pod uwagę niewielki zakres rozpoznania rzeczowy i przestrzenny jest to jeszcze daleko niedoszacowane.

3. Brak kluczowych przepisów niezbędnych dla realizacji CRMA i proponowanych rozwiązań, redefiniowania górnictwa odkrywkowego (Patrz załącznik regulowanych definicji)

4. Niezbędne zmiany

Niezbędne są następujące zmiany regulacji dla:

- a) Eksploracji i kopalni wielosurowcowej;
- b) Prac geologicznych i dokumentowania złoża antropogenicznego;
- c) Możliwości przygotowania Projektu Zagospodarowania Złoża bez zatwierdzonej dokumentacji identyfikacji złoża/złóż;
- d) Koncesji na rozpoznawanie dla zastosowania szerokiego nowych technologii adhezji.

Przyszłość kopalń odkrywkowych

1. Pierwiastki ziem rzadkich (REE) i strategiczne w polskich złożach kopalń odkrywkowych

W złożach osadowych (piaski, żwiry) polodowcowych oraz odpadach przemysłowych najczęściej występują zarówno metale z grup lekkich (LREE), jak i ciężkich (HREE) ziem rzadkich, często towarzysząc minerałom ciężkim.

a) Neodym (Nd) i Prazeodym (Pr)

Kluczowe jest zastosowanie dla magnezów trwałych w silnikach pojazdów elektrycznych, turbinach wiatrowych (OZE) oraz w precyzyjnych systemach naprowadzania rakiet i dronów (przemysł obronny).⁴

Źródłem są piaski i żwiry zawierające minerały ciężkie (monacyt)⁵. W Polsce ich koncentracja w osadach rzecznych i polodowcowych bywa niedoszacowana w dawnych dokumentacjach.

b) Iterb (Yb) i Terb (Tb)

Iterb oraz Terb mają zastosowanie w technologiach laserowych, światłowodach (Space/sektor obronny) oraz luminoforach w nowoczesnych ekranach i ogniach fotowoltaicznych.⁶

Głównymi źródłami są złoża antropogeniczne (popioły z węgla brunatnego, odpady po przeróbce rud miedzi).

c) Itr (Y)

Główną zaletą Itru jest fakt, iż tworzy stopy odporne na wysokie temperatury w silnikach odrzutowych i raketowych, ceramice technicznej.

Tab. 1. Wykaz przykładowych kopalin współwystępujących w nakładzie złóż węgla brunatnego, wraz z charakterystyką

Tab. 1. List of exemplary minerals co-occurring in the overburden of brown coal deposits, including characteristics

Rodzaj surowca	Status dokumentacyjny	Lokalizacja/Potencjał	Potencjalna przydatność
Piaski szklarskie	Rozpoznane m.in. w nakładzie Pola Bełchatów i Szczerców	Warstwy czwartorzędowe i neogeńskie	Produkcja HPQ, szkło dla fotowoltaiki
Minerały ciężkie	Sygnalizowanie w osadach piaszczystych (cyrkon, tytanit)	Zwałowiska m.in. Bełchatów, rejon Konina	źródło REE, sektor obronności
Iły Ceramiczne/Kaolin	Udokumentowane jako kopaliny towarzyszące	Nadkład w Turowie i Bełchatowie	Ceramika techniczna, izolatory
Bursztyn	Często współwystępuje w nakładzie (rejon Parczewa/Lubelskie)	Północne skrzydła bełchatowskie	Surowiec jubilerski i chemiczny

¹ <https://wspolczesna.pl/nowe-przepisy-na-rzecz-oze-i-wodoru-rzad-przyjmuje-kluczowe-projekty-ustaw/ar/c3-18876783>

² Poznaj strategię

³ J.A. Stefanowicz. Historia, definicje i regulacje złóż antropogenicznych. Przegląd Geologiczny vol. 73 nr 12.2025. s. 1046

⁴ Metale ziem rzadkich – fundament nowoczesnych technologii - RMC Polska

⁵ A. Jaroński. Możliwości pozyskiwania metali ziem rzadkich w Polsce. Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk. 2026. s. 75-88

⁶ Iterb to pierwiastek o niezwykłych właściwościach. Od ponad stu lat fascynuje badaczy | National Geographic

Tab. 2. Lokalizacja wybranych surowców ziem rzadkich wraz z ich potencjalnym wykorzystaniem
 Tab. 2. Location of selected rare earth elements including their potential use

Surowiec	Lokalizacja w złożu/odpadzie	Sektor strategiczny
Ren (Re)	Odpady po przeróbce miedzi (złoża antropogeniczne)	Space/sektor obronny. Superstopy do turbin odrzutowych
Wanad (V)	Żużle hutnicze, odpady z węgla, piaski tytanonośne	OZE: magazyny energii (VRFB)
Kobalt (Co)	Hałdy poflotacyjne i odpady przerobcze	OZE: baterie litowo-jonowe
Kwarc wysokiej czystości (HPQ)	Wyselekcjonowane warstwy w złożach piasków kwarcowych	SPACE/ICT: półprzewodniki, optyka kosmiczna
Lit (Li)	Solanki kopalniane, odpady po eksploatacji węgla	OZE/sektor obronny: akumulatory

Itr występuje w skupieniach minerałów ciężkich w złożach piaskowych oraz w odpadach poflotacyjnych.

2. Źródła surowców współwystępujących w górnictwie odkrywkowym 2.0

Poza pierwiastkami ziem rzadkich, strategia restrukturyzacji powinna uwzględniać inne surowce krytyczne i kluczowe, które występują w nadkładzie osadach i odpadach, a ich cena rośnie wykładniczo (Tab. 2).

3. Innowacja: separacja metodą adhezji (Adhesion Separation)

Adhezja stanowi przełomowe rozwiązanie w przeróbce drobnych frakcji, szczególnie tam, gdzie tradycyjna flotacja lub separacja grawitacyjna zawodzi. Polega na wykorzystaniu selektywnej adhezji cząstek metali lub minerałów do nośnika (np. wosku wełnianego lub powierzchni polimerowych) na podstawie różnic w hydrofobowości powierzchniowej.

4. Zastosowanie w kopalni odkrywkowej nowego typu

a) Odzysk metali ziem rzadkich (REE) i minerałów ciężkich z bardzo drobnych frakcji piasków (poniżej 0,063 mm);

b) Separacja mikroskopijnych ziaren kwarcu wysokiej czystości (HPQ) od zanieczyszczeń skaleniowych;

c) Odzysk metali z pyłów hutniczych i szlamów poflotacyjnych.

Główną zaletą środowiskową jest niższe zużycie wody i odczynników chemicznych w porównaniu do klasycznej flotacji, co ułatwia uzyskanie zgód środowiskowych także w ramach CRMA.

Uwaga! Redefinicja potencjału surowcowego zwałowisk nadkładu górnictwa węgla brunatnego jest niezbędna w kontekście wdrażania regulacji Critical Raw Materials Act (CRMA).

5. Zmiana technologii: od wydobywania do „separatora”

Tradycyjne górnictwo odkrywkowe (piaskowo-żwirowe) skupiało się na frakcjach ziarnowych. Nowy rekomendowany model wymaga:

a) Separacji magnetycznej i grawitacyjnej: odzyskiwanie frakcji ciężkiej (cyrkon, rutil, monacyt) podczas standardowego płukania kruszywa.

b) Hydrometalurgii uzysku z hałd: ługowanie metali

(Li, Co, REE) z istniejących składowisk, co de facto jest rekultywacją połączoną z eksploatacją (Circular Mining).

c) Kaskadowego wykorzystania zasobu: piasek i żwir stają się produktem ubocznym, a głównym celem staje się koncentrat metali strategicznych i krytycznych (ciemny szlam).⁷

Strategie surowcowe

Własna rafinacja to nie tylko biznes, ale bezpieczeństwo państwa, które jest kluczowe dla uzyskania akceptacji na rynku i środków z UE.

1. Ryzyko geopolityczne i dominacja Chin (Status 2026)

Chiny kontrolują obecnie ok. 85–90% światowej rafinacji REE oraz niemal 100% technologii separacji metali ciężkich (HREE), takich jak terb i iterb.⁸

2. Mechanizm Szantażu Surowcowego

Pekin regularnie manipuluje podażą, co powoduje skoki cenowe. W ostatnich latach Chiny wprowadziły restrykcje na eksport technologii odlewniczych i separacyjnych dla magnezów i do separacji z REE.

UWAGA! Opieranie się na eksporcie „czarnego szlamu” (półproduktu) do Azji czyni polskie kopalnie zakładnikami polityki zagranicznej Chin.

3. Europejska odpowiedź: CRMA jako Tarcza

Unijny Critical Raw Materials Act nakłada obowiązek, aby do 2030 roku co najmniej 40% przetwarzania (rafinacji) surowców strategicznych odbywało się wewnątrz UE. Szansą dla Polski jest budowa mobilnej instalacji rafinacyjnej w oparciu o projekty (badawczo-rozwojowe), co może uczynić z podmiotów krajowych głównego beneficjenta funduszy na suwerenność technologiczną.

4. Konieczność budowy własnych zdolności rafinacyjnych Polski (Strategia 2030)

Zamiast budować jeden gigantyczny zakład, strategia powinna promować modułowe i mobilne Centra/Instalacje Hydrometalurgiczne:

a) Lokalizacja przy infrastrukturze istniejącej: wykorzystanie ciepła odpadowego z hut i energii z geotermii (publikacje w Zeszytach IGSMiE PAN) do procesów ługowania kwasowego;

⁷ A. Jaroński, A. Surowiak, M. Brożek. Odzysk chromu z odpadów chromowych z wykorzystaniem separacji magnetycznej i grawitacyjnej. 2015. Archives of Metallurgy and Materials 60(3):1737-1744.

⁸ REE 2025: Chińskie kontrole eksportowe – Konsekwencje dla Polski

b) Technologia wymiany jonowej (Ion Exchange): to jedyna metoda pozwalająca na uzyskanie czystości kwarcu 4N/5N (99,99%+), niezbędnej dla sektora Space/sektor obronny;

c) Cross-border Hub: rafinacja surowców z polskich hałd oraz koncentratów z projektów transgranicznych (np. z Ukrainy lub Niemiec) wzmacnia pozycję negocjacyjną Polski w Brukseli.

5. Rekomendacja dla nadzoru i Ministra (Executive Summary)

a) Ocena

Posiadanie potencjalnych źródeł surowców, złóż to załedwie połowa sukcesu. Prawdziwa wartość strategiczna

Tab. 3. Analiza wartości dodanej

Tab. 3. Added value analysis

Komponent	Produkcja roczna	Cena rynkowa (szacunkowa)	Przychód dodatkowy
Piasek/Żwir	500 000 t	30 PLN/t	~15 000 000 PLN
Neodym (Nd)	ok. 150 kg	140 000 USD/t	~85 000 PLN
Prazeodym (Pr)	ok. 50 kg	135 000 USD/t	~28 000 PLN
Cyrkon (Zr)	ok. 500 t	2 200 USD/t	~4 500 000 PLN
Tytan (Ti)	ok. 800 t	1 800 USD/t	~5 800 000 PLN

i marża (tzw. value-added) znajduje się w procesie rafinacji. Bez własnych zdolności separacji Terbu, Itru, Prazeodymu i Iterbu, Polska pozostanie jedynie dostawcą surowców nieprzetworzonych, uzależnionym od azjatyckich łańcuchów dostaw. Budowa pilotażowego Krajowego Hubu Rafinacji Metali Krytycznych do 2030 roku jest niezbędna, aby zabezpieczyć potrzeby polskiego przemysłu obronnego oraz zrealizować wymogi CRMA, przekształcając Polskę w lidera transformacji surowcowej Europy Środkowej.

b) Finał procesu zmian strategii i planowania:

- dane konkurencji i doradców - kancelarii (wykrywanie blokad);
- modele rentowności REE i HPQ (nowy wymiar odkrywek);
- analiza cenowa i rynkowa (uzasadnienie ekonomiczne);
- kontekst geopolityczny i transgraniczny (bezpieczeństwo i fundusze UE).

Analiza porównawcza

Zestawienie kosztów tradycyjnej rekultywacji „leśno-wodnej” z przychodami z odzysku REE/HPQ metodą adhezji.

1. Analiza jako przekonujący dowód dla rządu i Inwestorów, że zmiana profilu kopalni kruszyw na zakład pozyskiwania metali krytycznych skokowo podnosi jej wycenę metodą DCF (Discounted Cash Flow).

Poniżej analiza dla modelowej kopalni piasku/żwiru, nakładów z niej o rocznym wydobyciu 500 000 t.

Skromny Model Rentowności: frakcja ciężka (REE) vs. kruszywo naturalne piaskowo-żwirowe lub piaskowe

W tradycyjnym modelu piasek sprzedawany jest po 25–35 PLN/t. W nowym modelu piasek jest „nośnikiem”, a zysk generuje frakcja minerałów ciężkich (tzw. koncentrat czarny).

2. Bilans surowcowy (Szacunek na 1 mln t urobku)

a) Frakcja kruszywowa (99%): standardowo płukany piasek i żwir;

b) Koncentrat minerałów ciężkich (0,1% - 0,5%): uzysk ok. 1 000 – 5 000 t koncentratu (monacyt, cyrkon, ilmenit, rutil);

c) Zawartość REE w koncentracie: średnio 2-5% tlenków ziem rzadkich (TREO), w tym kluczowe: Neodym (Nd) i Prazeodym (Pr).

3. Analiza wartości dodanej (przykładowe ceny 2026)

4. Suma dodatkowa

Dzięki samej separacji grawitacyjnej (cyrkon i tytan), przychód kopalni rośnie o ok. 60–70%, bez zwiększania wolumenu wydobycia. Pierwiastki ziem rzadkich (REE) stanowią tu „element generujący istotny wzrost rentowności całego przedsięwzięcia”, podnosząc wartość strategiczną dla sektorów obronnego, kosmicznego i transformacji energetycznej.

5. Inżynieria procesowa: górnictwo odkrywkowe 2.0

Zastosowanie technologii kaskadowej, opisaną w publikacjach, pozwala na:

a) Separację wstępną: montaż baterii hydrocyklonów i spiral wzbogacalnych na istniejącej linii płukania piasku;

b) Mobilne węzły wzbogacania: modułowe instalacje, które można przemieszczać między obszarami wydobywczymi lub hałdami instalując po dotychczasowych, tradycyjnych frakcjach > 1mm (redukcja CAPEX);

c) Neutralizację odpadów: pozyskanie metali z hałd antropogenicznych to de facto i może być de iure rekultywacja, co zwolni z części opłat środowiskowych.

6. Argumentacja dla MKiŚ, WGPW i UE (CRMA)

Zintegrowane pozyskiwanie kruszyw i minerałów ciężkich (REE, Zr, Ti) zmienia profil ryzyka kopalni odkrywkowej. W dobie zastoju inwestycji drogowych i budownictwa, kopalnia staje się dostawcą dla przemysłu wysokich technologii. Model ten jest w 100% zgodny z CRMA, ponieważ bazuje na surowcach, pierwiastkach śladowych, współwystępujących (by-products), co UE traktuje priorytetowo pod kątem finansowania z Funduszu Transformacji.

Tab. 4. Przykłady zastosowania poszczególnych klas kwarcu w zależności od stopnia zanieczyszczenia
 Tab. 4. Examples of applications for individual quartz classes depending on the impurity level

Klasa kwarcu	Suma zanieczyszczeń	Zastosowanie
IOTA Standard	< 20 ppm	Tygle do wyciągania monokryształów krzemu (Solar)
IOTA 4/6	< 10 ppm	Półprzewodniki (LSI/VLSI), mikroprocesory
High Purity (Space)	< 5 ppm	Optyka kosmiczna, lasery dużej mocy, światłowody
Krzem metalurgiczny	> 100 ppm	Panele fotowoltaiczne (klasa niższa), stopy aluminium

Kwarc (nieujawniony potencjał)

Część złóż żwirów na Dolnym Śląsku posiada otoczaki kwarcu, które po odpowiedniej separacji optycznej i chemicznej (ługowanie) mogą służyć do produkcji tygli dla przemysłu fotowoltaicznego i półprzewodnikowego. Cena HPQ to nie 30 PLN/t, a nawet 5000 - 10 000 USD/t.

1. Kwarc wysokiej czystości (HPQ – High Purity Quartz) to obecnie jeden z najbardziej niedoszacowanych surowców w polskich bilansach, dokumentacjach i archiwach geologicznych. W tradycyjnym górnictwie odkrywkowym traktowany jako „piasek szklarski” lub kruszywo, w rzeczywistości stanowi fundament technologii półprzewodnikowych, światłowodowych i fotowoltaicznych.

2. Parametry czystości i klasyfikacja HPQ (regulacje i normy handlowe)

O przydatności kwarcu do technologii kosmicznych i solarnych nie decyduje zawartość SiO_2 (która zawsze musi wynosić >99,9%), ale suma krytycznych zanieczyszczeń metalicznych (Al, Ti, Li, B, Fe, Ca, Mg, Na, K) mierzona w ppm (częściach na milion) (Tab. 4).

3. Kluczowy parametr: W technologiach kosmicznych i solarnych najbardziej krytyczna jest zawartość Boru (B) i Fosforu (P) – muszą być na poziomie poniżej 0,1 ppm, ponieważ wpływają na właściwości elektryczne krzemu.

Źródła danych, cen i dynamika rynkowa (stan na 2026)

Ceny HPQ są kontraktowane indywidualnie, ale benchmarki rynkowe publikowane przez agencje analityczne (np. Roskill0, Argus Media, Indium Corporation) wskazują na ogromny rozstrzał cenowy w zależności od czystości.

1. Czystość

a) HPQ klasy Solar (IOTA): 5000 – 8000 USD/t.

b) HPQ klasy Semiconductor (Ultra-High Purity): 10 000 – 20 000 USD/t.

c) HPQ dla optyki kosmicznej: może osiągać ceny powyżej 40 000 USD/t za wyselekcjonowane partie o ekstremalnie niskiej zawartości litu i tytanu.

2. Źródła danych cenowych:

a) USGS (U.S. Geological Survey): raporty roczne „Mineral Commodity Summaries” (rozdział: Quartz Crystal);⁹

b) Critical Raw Materials Alliance: biuletyny dotyczące cen surowców strategicznych dla UE;¹⁰

c) Asian Metal/Metal.com: indeksy cenowe dla rynku azjatyckiego (kluczowe dla fotowoltaiki).¹¹

3. Źródła surowca w Polsce (odkrywki i odpady)

Można wskazać i poddać ocenom, a następnie regulacjom (ustaleniem brzeżnych) trzy konkretne źródła, które można eksploatować metodą odkrywkową:

a) Wyselekcjonowane złoża piasków kwarcowych (np. rejon Tomaszowa Mazowieckiego/ Biała Góra): potencjał do selektywnego wydobycia warstw o niskiej zawartości żelaza i tytanu;

b) Otoczaki kwarcu w żwirach dolnośląskich: możliwość separacji optycznej (Optical Sorting) czystych bryłek kwarcu z masowego urobku żwirowego;

c) Odpady z przeróbki granitu: skalenie i kwarc stanowią tu produkt uboczny, który po procesie ługowania kwasowego (Acid Leaching) może zostać uszlachetniony do poziomu HPQ.

Do tych źródeł może być zastosowana nowa opatentowana technologia adhezji: to proces „low-energy”, co ułatwia zakwalifikowanie badań do skorzystania z funduszy innowacyjnych (Innovation Fund).

4. Konkluzja

Polska posiada potencjał do budowy łańcucha wartości HPQ w oparciu o byłe i istniejące kopalnie odkrywkowe kruszyw. Przejście z produkcji piasku budowlanego (30 PLN/t) na koncentrat kwarcu klasy IOTA (20 000 PLN/t) wymaga jedynie wdrożenia zaawansowanych systemów separacji optycznej i hydrometalurgicznego oczyszczania powierzchniowego. Inwestycja ta wpisuje się w cele CRMA i European Chips Act (2023), czyniąc z tradycyjnych odkrywek strategiczne zaplecze dla europejskiego przemysłu wysokich technologii.

Dynamika cen

Analiza dynamiki cen metali ziem rzadkich (REE) na przestrzeni ostatnich lat wykazuje ogromną zmienność, podyktowaną głównie chińskimi kwotami eksportowymi, pandemią oraz gwałtownym przyspieszeniem transformacji energetycznej (magnesy stałe) i cyfryzacji pola walki (przemysłu obronnego).

⁹ USGS.gov | Science for a changing world

¹⁰ <https://www.crmalliance.eu/>

¹¹ Asian Metal - The World Metal Information Center

Tab. 5. Dynamika cen metali ziem rzadkich w latach 2021 – 2026
 Tab. 5. Price dynamics of rare earth metals between 2021 and 2026

Metal (tlenek)	Cena 2021	Cena 2023	Cena marzec 2026	Zmiana 5-letnia
Terb (Tb)	1 200 USD	2 100 USD	1 850 USD	+54%
Prazeodym (Pr)	95 USD	160 USD	135 USD	+42%
Iterb (Yb)	15 USD	22 USD	26 USD	+73%
Itr (Y)	8 USD	14 USD	12 USD	+50%

Poniżej zestawienie zmian cen w okresie 2021–2026 w oparciu o benchmarki SMM (Shanghai Metals Market¹²), USGS¹³ oraz Argus Media¹⁴.

1. Dynamika cen metali ziem rzadkich (2021–2026)

Ceny podano w USD za kilogram (USD/kg) dla tlenków o czystości min. 99% (FOB China/Global).

2. Charakterystyka zmian dla poszczególnych metali:

a) Terb (Tb) cechuje najwyższa dynamika i wartość.

Wzrost wynika z krytycznego znaczenia dla magnesów pracujących w wysokich temperaturach (silniki EV, generatory wiatrowe). Jest to metal o najwyższym ryzyku podażowym w strategii CRMA;

b) Prazeodym (Pr) podąża trajektorią Neodymu (Nd). Po gwałtownym wzroście w 2022 r. nastąpiła korekta, jednak ceny ustabilizowały się na poziomie ok. 40% wyższym niż przed pandemią ze względu na nieuchronność transformacji energetycznej;

c) Iterb (Yb): choć rzadszy, jego cena była relatywnie niska, ale w ciągu ostatnich 3 lat odnotował najwyższy procentowy wzrost (ponad 70%). Wynika to z przełomów w technologii komputerów kwantowych i laserów dużej mocy (Space/sektor obronny).

d) Itr (Y) jest najtańszy w zestawieniu, ale kluczowy dla ceramiki technicznej i stopów lotniczych. Jego cena jest stabilna, z lekką tendencją wzrostową związaną z rosnącymi kosztami rafinacji i separacji z rud złożowych.

3. Brzeżne parametry czystości i bariery wejścia

Trzeba zaznaczyć, że cena rynkowa dotyczy tlenków separowanych. W przypadku odzysku ze złóż antropogenicznych (hałdy) lub piasków aluwialnych, produktem pośrednim jest koncentrat chemiczny REO (Rare Earth Oxides).

Kluczowe progi czystości dla technologii strategicznych:

- Standard Przemysłowy: 99,0% – 99,5% (zastosowania metalurgiczne).
- Sektor obronny/Space: 99,99% (4N) – 99,999% (5N). Przejście z 4N na 5N często podwaja cenę surowca ze względu na koszt procesów wymiany jonowej.

4. Teza

Stabilnie wysoki poziom cen Terbu i Prazeodymu oraz dynamiczny wzrost wartości Iterbu uzasadniają inwestycję w instalację selektywnej separacji REE przy istniejących kopalniach odkrywkowych i składowiskach odpadów wydobywczych. Przy obecnych cenach, odzysk

tych metali jako kopalin, pierwiastków śladowych, współwystępujących czy towarzyszących (by-products) pozwala na osiągnięcie progu rentowności (break-even point) przy zawartościach w surowcu pierwotnym na poziomie zaledwie kilkudziesięciu ppm, co czyni polskie przyszłe złoża antropogeniczne atrakcyjnymi dla kapitału typu High-Tech Mining.

Case study

Skupienie się na adhezji jako metodzie selektywnego odzysku z drobnych frakcji po płukaniu piasków aluwialnych to przyszłość kopalni wielosurowcowej. Tradycyjne metody (spirale, stoły koncentracyjne) tracą wydajność dla pozytywnego IRR poniżej 63 µm, gdzie z zasady „ucieka” najcenniejsza mineralizacja itru, terbu czy mikronowego złota.

Poniżej Case Study oparte na technologii na dziś rozpoznanej adhezji hydrofobowej (np. oil agglomeration lub selektywna adhezja polimerowa), dopasowane do konkretnego profilu surowcowego.

Przyjmując gęstość nasypową szlamu na poziomie 1,6 t/m³, co daje nam 1 600 000 ton surowca do przeróbki. Założono konserwatywne zawartości (ppm = g/t) typowe dla polskich osadów aluwialnych i antropogenicznych.

1. Case study: odzysk metali krytycznych i szlachetnych metodą adhezji selektywnej

Lokalizacja modelowa: zakład przerobczy piasków aluwialnych (osady czwartorzędowe/neogeńskie) – frakcja odpadowa z płuczki <0,1 mm (szlamy).

a) Problem technologiczny

W klasycznym procesie wzbogacania piasków aluwialnych, minerały ciężkie (monacyt, ksenotym) będące nośnikami itru (Y) i terbu (Tb) oraz drobne złoto (Au) trafiają po ostatniej frakcji osadnika szlamów. Standardowa grawitacja nie radzi sobie z siłami napięcia powierzchniowego i oporu cieczy przy tak małych ziarnach.

b) Mechanizm adhezji w Procesie

Technologia wykorzystuje różnice w powinowactwie powierzchniowym minerałów do nośnika (np. specjalnie dobranego wosku procesowego lub polimeru).

c) Złoto (Au) to naturalna hydrofobowość złota powoduje, że ziarna zostają zaadsorbowane („przyklejają”) się do nośnika adhezyjnego, tworząc aglomeraty łatwe do oddzielenia od hydrofilowego kwarcu.

¹² Steel, Aluminum, Nickel, Rare Earth, New Energy, Copper Prices Charts & News-Shanghai Metals Market (SMM)

¹³ USGS.gov | Science for a changing world

¹⁴ Commodity prices, forecasts, news & market analysis | Argus Media

Tab. 6. Porównanie parametrów odzysku poszczególnych surowców
Tab. 6. Comparison of recovery parameters for individual raw materials

Surowiec	Metoda grawitacyjna (tradycyjna)	Metoda Adhezyjna (nowoczesna)	Zysk/Wydajność
Złoto mikronowe (<50 μm)	15-25%	85-92%	+350%
Itr (Y)/Terb (Tb)	30-40%	75-80%	+100%
Minerały Ciężkie (Zr, Ti)	50-60%	90-95%	+60%

Tab. 7. Potencjał Surowcowy i uzysk
Tab. 7. Resource potential and recovery

Surowiec	Średnia zawartość (ppm)	Uzysk w procesie adhezji (średnio 80%)	Masa odzyskana
Itr (Y)	25g/t	20 g/t	32 000 kg (32 t)
Terb (Tb)	1,5 g/t	1,2 g/t	1 920 kg (1,92 t)
Minerały Ciężkie (Zr, Ti)	2 000 g/t (0,2%)	1 600 g/t	2 560 000 kg (2 560 t)

d) Itr i Terb (w Monacycie/Ksenotymie) wymagają wstępnej aktywacji powierzchniowej (kondycjonowania). Odpowiednio dobrane odczynniki powodują, że ziarna tych minerałów stają się selektywnie adhezyjne wobec nośnika, podczas gdy piasek (SiO_2) pozostaje obojętny.

2. Parametry odzysku (Recovery Rate) – porównanie

3. Implementacja: „ostatnia frakcja piasków”

Ostatnim ogniwem jest reaktor adhezyjny zamontowany na wylocie szlamów z hydrocyklonu.

Kluczowe etapy procesu:

a) Kondycjonowanie: dodanie kolektora adhezyjnego do pulpy (szlamu);

b) Aglomeracja: intensywne mieszanie powoduje zderzenia ziaren kruszców z nośnikiem i ich trwałe połączenie;

c) Separacja aglomeratów: wydzielenie bogatej fazy adhezyjnej (zawierającej Au, Y, Tb) od już jałowego piasku;

d) Termiczny/Chemiczny odzysk: rozdział nośnika od koncentratu metali.

Rekomendacje

Górnictwo odkrywkowe kruszyw w Polsce posiada ukrytą rentowność w postaci frakcji cennych metali i minerałów ciężkich. Zmiana paradygmatu z „wydobycia piasku” na „pozyskiwanie metali strategicznych” „przy okazji” produkcji kruszyw, pozwala na rewitalizację nierentownych odkrywek, wpisuje się w unijne cele CRMA, czyniąc polskie kopalnie odkrywkowe ogniwem w łańcuchu dostaw dla sektora obronnego i kosmicznego (Tab. 7).

1. Wycena rynkowa (Ceny Marzec 2026 na relevantnych rynkach)

a) Itr (Y): $32\,000\text{ kg} \times 12\text{ USD/kg} = 384\,000\text{ USD}$

b) Terb (Tb): $1\,920\text{ kg} \times 1\,850\text{ USD/kg} = 3\,552\,000\text{ USD}$

c) Złoto (Au): $192\text{ kg} \times 75\,000\text{ USD/kg} = 14\,400\,000\text{ USD}$

d) Koncentrat Zr/Ti: $2\,560\text{ t} \times 1\,500\text{ USD/t (średnio)} = 3\,840\,000\text{ USD}$

Łączny Przychód (Gross Revenue): ok. 22 176 000 USD (~88 000 000 PLN).

Koniunktura gospodarcza determinowana istotnym wzrostem cen metali ziem rzadkich (REE) oraz frakcji minerałów ciężkich, w połączeniu z postępowaniem w zakresie technologii separacyjnych – ze szczególnym uwzględnieniem innowacyjnych procesów adhezji opartych na wykorzystaniu selektywnej adhezji cząstek metali lub minerałów do nośnika (np. wosku wełnianego lub powierzchni polimerowych) na podstawie różnic w hydrofobowości powierzchniowej – redefiniuje paradygmat opłacalności przedsięwzięć geologiczno-górnictwowych. Implementacja wspomnianych rozwiązań technologicznych umożliwia efektywne zagospodarowanie surowców wtórnych deponowanych w hałdach nadkładu i odpadach powęglowych, a także rewitalizację eksploatacyjną nieczynnych lub zrehabilitowanych wyrobisk piasku i żwiru. Kluczowym aspektem staje się tu odzysk pierwiastków krytycznych z odpadów poflotacyjnych oraz procesów wzbogacania. Wymaga to jednak opracowania nowych metodyk projektowania robót geologicznych oraz wyznaczenia zaktualizowanych parametrów brzeżnych, które w pełni uwzględniałyby wysoką selektywność nowoczesnych technologii separacji fizykochemicznej.

Literatura

- [1] Badowski Maciej. *Nowe przepisy na rzecz OZE i wodoru*. Rząd przyjmuje kluczowe projekty ustaw. 23.04.2026 r. Nowe przepisy na rzecz OZE i wodoru. Rząd przyjmuje kluczowe projekty ustaw | Gazeta Współczesna
- [2] Białek Artur. *Iterb to pierwiastek o niezwykłych właściwościach. Od ponad stu lat fascynuje badaczy*. 23.04.2026 r. *Iterb to pierwiastek o niezwykłych właściwościach. Od ponad stu lat fascynuje badaczy* | National Geographic
- [3] *Energia bezpiecznej przyszłości. Elastyczność*. Strategia Grupy PGE do 2035 roku
- [4] Jarosiński Andrzej. *Możliwości pozyskiwania metali ziem rzadkich w Polsce*. Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk. 2026. s. 75-88
- [4] Jarosiński Andrzej, Agnieszka Surowiak, Maren Brozek. *Odzysk chromu z odpadów chromowych z wykorzystaniem separacji magnetycznej i grawitacyjnej*. 2015. Archives of Metallurgy and Materials 60(3):1737-1744
- [6] *Metale ziem rzadkich – fundament nowoczesnych technologii*. 23.04.2026 r. Metale ziem rzadkich – fundament nowoczesnych technologii - RMC Polska
- [7] Polityka Energetyczna Polski do 2040 roku
- [8] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1252 z dnia 11 kwietnia 2024 r. w sprawie ustanowienia ram na potrzeby zapewnienia bezpiecznych i zrównoważonych dostaw surowców krytycznych oraz zmiany Rozporządzeń (UE) NR 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 I (UE) 2019/1020
- [9] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1781 z dnia 13 września 2023 r. w sprawie ustanowienia ram dotyczących środków na rzecz wzmocnienia europejskiego ekosystemu półprzewodników oraz zmiany rozporządzenia (UE) 2021/694
- [10] Stefanowicz J.A. J.A. *Historia, definicje i regulacje złóż antropogenicznych*. Przegląd Geologiczny vol. 73 nr 12.2025. s. 1045-1049
- [11] Ostrowski Dariusz. *Chińskie kontrole eksportowe REE 2025: 12/17 pierwiastków – globalne konsekwencje i wpływ na Polskę*. 23.04.2026 r. REE 2025: Chińskie kontrole eksportowe – Konsekwencje dla Polski
- [12] USGS.gov | *Science for a changing world*
- [13] Home | CRM Alliance
- [14] Asian Metal - The World Metal Information Center
- [15] *Steel, Aluminum, Nickel, Rare Earth, New Energy, Copper Prices Charts & News*-Shanghai Metals Market (SMM)
- [16] *Commodity prices, forecasts, news & market analysis* | Argus Media

