

---

# Identyfikacja, metody pozyskania i wykorzystanie metali krytycznych na Dolnym Śląsku

---

Rozprawa doktorska

mgr inż. Wojciech Kaczan

Pod promotorstwem:

prof. dr hab. inż. Herbert Wirth

prof. dr hab. inż. Adam Piestrzyński

Wrocław, 20 czerwca 2023  
POLITECHNIKA WROCŁAWSKA



Wydział Geoinżynierii, Górnictwa  
i Geologii



Praca doktorska współfinansowana ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, nr projektu POWR.03.02.00-00-I003/16

# Abstrakt

Wyzwania, takie jak walka ze zmianami klimatu, redukcja zanieczyszczeń oraz zmniejszenie wykorzystywania zasobów zintensyfikowały światowe starania o ochronę Ziemi. Są one ujęte w siedemnastu Celach Zrównoważonego Rozwoju. Ich zrealizowanie możliwe jest dzięki transformacji energetycznej oraz wprowadzaniu założeń gospodarki o obiegu zamkniętym na wielu poziomach. Te wyzwania łączą się z koniecznością zużycia liczących, zazwyczaj rzadko występujących surowców, z których istotną grupą są metale wykorzystywane w wysokich technologiach.

Podaż na surowce zabezpieczono poprzez sformułowanie list surowców krytycznych. Pozwala to na ukierunkowanie działań politycznych oraz inwestorskich na konkretne surowce, które zapewnią Polsce i innym krajom europejskim miejsce wśród państw niezależnych, zielonych i wysoko rozwiniętych.

Moja rozprawa doktorska dotyczy bezpośrednio zagadnienia metali krytycznych oraz możliwości zapewnienia ich podaży. Koncentruje się na jednym z najbardziej rozwiniętych, a jednocześnie zasobnych w metale regionów w Polsce – Dolnym Śląsku. Podjąłem się zarówno analizy potencjalnych zasobów geogenicznych, jak i antropogenicznych (w postaci odpadów górniczych, przerobczych i hutniczych).

Rozprawa ma charakter metodyczny, wobec tego jej głównym celem jest zebranie i opisanie metod i technik, które pozwolą na określenie potencjału metali krytycznych w danym miejscu. Takie ujęcie wymagało zgłębienia zróżnicowanych metod analitycznych i badawczych, w tym też autorskiego podejścia do części z nich, co pozwoliło na zaprezentowanie logicznego ciągu kroków prowadzących do określenia obszaru potencjalnych zasobów.

Tytuł pracy zawiera trzy główne zagadnienia: (1) identyfikację, (2) metody pozyskania i (3) wykorzystanie. Takie ujęcie tematyczne pozwoliło stworzyć ramy poszukiwania i rozpoznawania zasobów metali krytycznych, metod ich eksploatacji i przerobu oraz wykorzystania dla analitycznie wyselekcjonowanych obszarów. Największy nacisk położyłem jednak na fundament, jakim jest identyfikacja potencjału.

Wynikiem pracy są dwa zbiorcze opracowania (dotyczące geosfery i antroposfery) dla Dolnego Śląska. Dane zebrałem z rzetelnych źródeł i przedstawiłem w postaci geoprzestrzennych baz. Na ich podstawie wyselekcjonowałem obszary i przeprowadziłem analizy pozwalające na określenie potencjału metali krytycznych, ale również wskazałem kierunki dalszego rozwoju ewentualnych badań i prac prowadzących do pozyskania i wykorzystania ich potencjału na tych terenach.

Rezultaty wskazują na wyzwania, jakie niesie możliwość pozyskania metali krytycznych na obszarze Dolnego Śląska. Są one związane ze stosunkowo niskimi zawartościami tych surowców w złożach geogenicznych oraz trudnościami w ich wydobyciu. W przypadku zasobów antropogenicznych pewną barierę stanowi również potencjał ekonomiczny. Jako szansę zaprezentowałem ujęcie ich wartości jako wypadkowej wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym.



# Podziękowania

Dziękuję

Dominice za to, że jesteś i wspierasz mnie każdej chwili, tej dobrej i tej złej.

Promotorowi Herbertowi Wirthowi za wsparcie w trakcie mojego rozwoju osobistego i za wskazywanie drogi w trakcie pracy doktorskiej

Promotorowi Adamowi Piestrzyńskiemu za wsparcie w trakcie badań.

Mamie, Tacie, Piotrkowi, Ani, Oli, Maćkowi, Jakubowi, Ewie, Jagodzie, Adeli, Joannie, Arturowi, Hani, Mai, Krzysztofowi i Marice, za to, że jesteście.

Dziadkom, choć już was nie ma, wiem, że trzymaliście za mnie kciuki.

Doktorowi Adamowi Góreckiemu za merytoryczne wsparcie i wprowadzenie do świata kartografii

Pawłowi Trybale, Profesorowie Pawłowi Zagożdżonowi, Doktorce Annie Gogolewskiej za pracę zespołową

Cezaremu Srodze za merytoryczne i rzetelne wprowadzenie do zagadnienia surowców Dolnego Śląska oraz, w szczególności, hałd i osadników.

Profesorom Jerzemu Decowi i Włodzimierzowi Jerzemu Mościckiemu za racjonalne wprowadzenie w świat Nauki.

Sobie za długą i ciężką pracę.



#### Wykorzystane skróty

ONZ Organizacja Narodów Zjednoczonych  
OECD Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju  
UE Unia Europejska  
UNFC United Nations Framework Classification for Resources  
GOZ gospodarka o obiegu zamkniętym  
SDG (ang. Sustainable Development Goals) Cele Zrównoważonego Rozwoju  
LCA (ang. Life Cycle Assessment) analiza cyklu życia  
OZE odnawialne źródła energii  
SMM Shanghai Metals Market  
LME London Metal Exchange  
PSP Polityka Surowcowa Państwa  
EIT European Institute of Innovation & Technology

#### Wykorzystane miary

PPM (ang. parts per million) liczba części na milion  
PPB (ang. parts per bilion) liczba części na miliard  
1 lb = 0,454 kg  
1 uncja (oz) = 28,3 g  
1 uncja trojańska = 31,103 g





## Wykorzystane symbole

He	hel	Te	tellur
Li	lit	Cs	cez
Be	beryl	Ba	bar
B	bor	La	lantan
F	fluor	Ce	cer
Mg	magnez	Pr	prazeodym
Al	glin	Nd	neodym
Si	krzem	Sm	samar
P	fosfor	Eu	europ
K	potas	Gd	gadolin
Sc	skand	Tb	terb
Ti	tytan	Dy	dysproz
V	wanad	Ho	holm
Cr	chrom	Er	erb
Mn	mangan	Tm	tul
Co	kobalt	Lu	lutet
Ni	nikiel	Hf	hafn
Cu	miedź	Ta	tantal
Zn	cynk	W	wolfram
Ga	gal	Re	ren
Ge	german	Ir	iryd
As	arsen	Pt	platyna
Se	selen	Bi	bizmut
Rb	rubid	U	uran
Sr	stront	PGM	(ang. platinum group metals) platynowce
Y	itr	REE	(ang. rare earth elements) pier- wiastki ziem rzadkich
Zr	cyrkon	REO	(ang. rare earth oxides) tlenki pierwiastków ziem rzadkich
Nb	niob	LREE	(ang. light rare earth elements) lekkie pierwiastki ziem rzadkich
Mo	molibden	HREE	(ang. heavy rare earth ele- ments) ciężkie pierwiastki ziem rzadkich
Ru	ruten		
Rh	rod		
Pd	pallad		
In	ind		
Sn	cyna		
Sb	antymon		



# Spis treści

Rozdział 1. Wprowadzenie .....	15
1.1. Inspiracja rozprawy .....	17
1.2. Znaczenie pracy.....	19
1.3. Zakres pracy i jej struktura .....	23
1.4. Pytania badawcze i hipotezy .....	24
Rozdział 2. Studium literatury .....	27
2.1. Surowce krytyczne .....	29
2.1.1. Terminologia .....	29
2.1.1. Metodyka wyznaczania list surowców krytycznych .....	30
2.1.2. Występowanie metali krytycznych i bazowych w skorupie ziemskiej .....	35
2.1.3. Główni producenci surowców krytycznych .....	40
2.2. Globalne wyzwania branży surowcowej .....	42
2.3. Metale krytyczne w geosferze – metody poszukiwania i rozpoznawania .....	45
2.4. Metale krytyczne w antroposferze – metody poszukiwania i rozpoznawania ....	46
2.6. Wykorzystanie i ceny metali krytycznych .....	49
2.6. Potencjał metalogeniczny Dolnego Śląska.....	54
Rozdział 3. Wykorzystane materiały i metody .....	59
3.1. Materiały ogólne.....	61
3.1.2. Materiały - analiza ekonomiczna .....	61
3.2. Materiały wykorzystane w analizie potencjałów geogenicznych .....	61
3.2.1. Materiały zbiorcze (lub bazy danych).....	61
3.2.2. Próby rdzeni oraz wyniki analiz geochemicznych .....	61
3.3. Materiały wykorzystane w analizie potencjałów antropogenicznych .....	62
3.3.1. Materiały kartograficzne .....	62
3.3.2. Bazy danych występowania obiektów odpadowych .....	62
3.3.3. Próby skalne oraz żużlowe .....	62
3.4. Główne metody badawcze wykorzystane w analizie potencjałów geogenicznych	63
3.4.1. Autorska propozycja analizy utraty metali w procesie górniczym .....	63
3.4.2. Analiza geostatystyczna (eksploracyjna analiza danych, korelacja Pearsona, wyznaczenie furty) .....	65
3.4.3. Analiza pod mikroskopem kruszcowym oraz mikrosondą elektronową .....	66
3.4.4. Metal ekwiwalentny .....	66
3.4.5. Analiza SWOT – PESTEL.....	66
3.5. Główne metody badawcze wykorzystane w Rozdziale Antropogen .....	66

3.5.1.	Autorska propozycja metody historycznego poszukiwania i rozpoznawania złóż kopalin	66
3.5.2.	DBSCAN – gęstościowo-przestrzenne grupowanie danych	68
3.5.3.	Obliczenie objętości	69
Rozdział 4.	Rezultaty badań – wprowadzenie	71
4.1.	Proponowana metodyka identyfikacji potencjałów	73
4.2.	Analiza ekonomiczna	75
4.2.1	Ceny produktów metali oraz wyznaczenie wskaźników cen dla ekwiwalentu	75
4.2.2	Wzór na metal ekwiwalentny dla potencjalnych zasobów geogenicznych i antropogenicznych	79
4.2.3	Szacunek wartości potencjalnego zasobu antropogenicznego	80
4.3.	Analizy wprowadzające dla potencjalnych projektów geologiczno-górnicych dla zasobów antropogenicznych metali krytycznych	82
Rozdział 5.	Geosfera – potencjał Dolnego Śląska jako obszaru pozyskania metali krytycznych ze złóż geogenicznych	87
5.1.	Baza danych miejsc występowania metali krytycznych na Dolnym Śląsku i selekcja obszarów istotnych	91
5.2.	Szklary – identyfikacja potencjału	93
5.3.	Szklary – metody pozyskania	94
5.4.	Niemstów-Wielowieś – identyfikacja potencjału	96
5.3.1.	Wprowadzenie	96
5.3.2.	Analiza utraty kobaltu w procesie geologiczno-górnicych ZG Lubin	96
5.3.3.	Eksploacyjna analiza danych	98
5.3.4.	Charakterystyka otworów	102
5.3.6.	Strefa wzbogacona w otworach na obszarze Niemstów-Wielowieś oraz obliczenia metalu ekwiwalentnego	107
5.3.7.	Przestrzenne występowanie metali na obszarze ZG Lubin i Niemstów-Wielowieś	108
5.5.	Niemstów-Wielowieś – metody pozyskania	110
5.4.1.	Metody górnicze	110
5.4.2.	Technologie przeróbcze	110
Rozdział 6.	Antroposfera – potencjał metali krytycznych w odpadach górniczych, przeróbczych i hutniczych zeskładowanych na obszarze Dolnego Śląska	111
6.1.	Baza potencjalnych zasobów antropogenicznych na Dolnym Śląsku	115
6.2.	Stare Zagłębie Miedziowe – identyfikacja potencjału	117
6.2.1.	Lokalizacja obiektów	117
6.2.2.	Objętości obiektów	118
6.3.	Krobica-Gierczyn-Przecznica – identyfikacja potencjału	120
6.3.1.	Lokalizacja obiektów	120

6.3.2. Objętości obiektów.....	120
6.4. Szklary – identyfikacja potencjału .....	121
6.4.1. Lokalizacja obiektów .....	121
6.4.2. Objętości obiektów.....	122
6.4.3. Poszukiwanie i rozpoznawanie hałd na terenie Szklar przy wykorzystaniu metody historycznego poszukiwania i rozpoznawania .....	124
6.4.4. Analizy geochemiczne prób żużla z hałdy w Szklarach .....	124
6.4.6. Analiza SWOT hałdy.....	128
6.5. Szklary – metody pozyskania .....	130
Rozdział 7. Wykorzystanie metali krytycznych na Dolnym Śląsku.....	131
Rozdział 8. Dyskusja .....	135
Rozdział 9. Podsumowanie i wnioski .....	139
Spis załączników .....	143
Słownik wykorzystanych pojęć.....	143
Spis tabel .....	145
Spis obrazów i wykresów.....	146
Literatura .....	149
Streszczenie w języku polskim .....	159
Streszczenie w języku angielskim .....	160



---

# Rozdział 1. Wprowadzenie

---

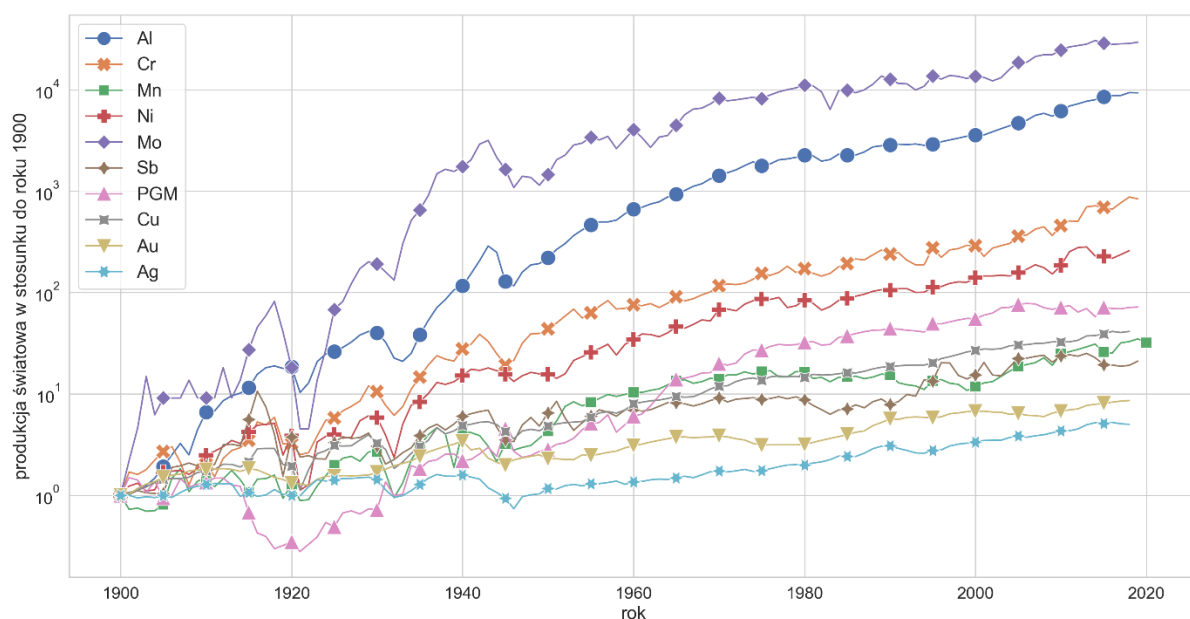




## 1.1. Inspiracja rozprawy

W celu zabezpieczenia podaży metali krytycznych niezbędne jest prowadzenie badań w zakresie poszukiwania i rozpoznawania złóż ich kopalin. Ze względu na zwiększającą się świadomość środowiskową oraz coraz intensywniej rozwijającą się gospodarkę o obiegu zamkniętym (GOZ) badania te mogą uwzględniać zarówno źródła leżące w geosferze, czyli pochodzenia naturalnego, jak i te leżące w antroposferze. Pierwsze z nich określane są jako geogeniczne złoża zasobów kopalin mineralnych, natomiast drugie – jako złoża (lub zasoby) antropogeniczne. Respektowanie strategii GOZ wiąże się z ograniczaniem wytwarzania odpadów na każdym etapie cyklu życia produktu (ang. Life Cycle) oraz możliwie największym stopniem wykorzystania zasobów. Takie spojrzenie wymaga analizowania potencjalnej działalności górniczej w możliwie szerokim kontekście, aby już na etapie poszukiwania i rozpoznawania złóż rud metali rozpatrywać kwestie takie jak: (1) występowanie innych metali, możliwych do wyekstrahowania; (2) identyfikowanie strumieni surowców, które mogą stać się kopalinami towarzyszącymi i powinny zostać zagospodarowane; (3) występowanie czynników wpływających na środowisko; (4) ograniczanie emisji do powietrza i wód.

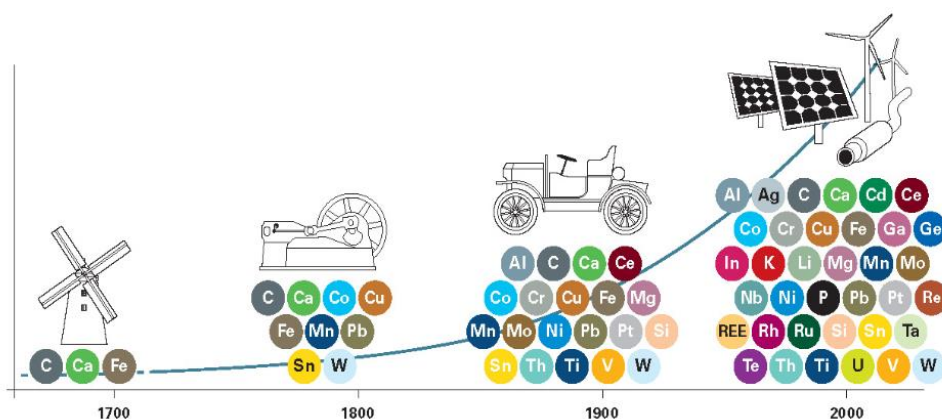
Przedstawione w pracy zagadnienia dotyczą wyzwań z obszaru *inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki* oraz *nauk o Ziemi i środowisku*, które związane są z zasadniczym pytaniem, łączącym te dyscypliny: *w jaki sposób zaspokajać surowcowe potrzeby człowieka, nie ograniczając jego dobrobytu, z jednoczesnym uszanowaniem środowiska naturalnego?* Kwestia ta jest złożona, a jej fundamenty leżą w globalnych wyzwaniach wynikających z rosnącej populacji Ziemi, stałym zwiększaniem się konsumpcji surowców na osobę i związanym z tym wzrostem światowej ich produkcji (rys. 1), potrzebą minimalizowania wpływu na środowisko, walką ze zmianami klimatycznymi oraz postępującą cyfryzacją i robotyzacją.



Rys. 1. Produkcja górnicza metali per capita w odniesieniu do roku 1900, opracowanie własne na podstawie danych USGS [1], inspirowane pracą [2].

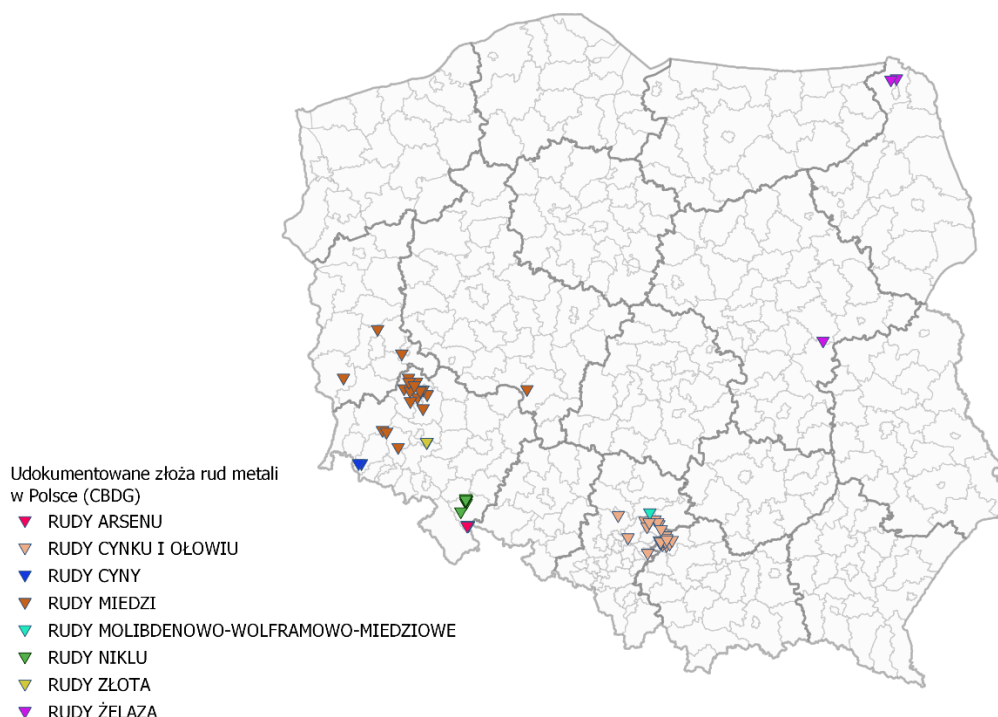
Wymienione wyzwania nakładają na współczesnych geologów i górników potrzebę poszukiwania źródeł surowców niezbędnych w rozwoju technologii dla transformacji energetycznej oraz cyfrowej, które mogą być eksploatowane w zrównoważony sposób. Wysokie technologie wymagają wykorzystania licznych, różnorodnych surowców [3], w szczególności metali, których podaż jest niejednokrotnie zagrożona niewystarczającymi zasobami lub kwestiami geopolitycznymi (rys. 2). W Unii Europejskiej zostały one opisane w 2008 roku jako surowce krytyczne, co zostało również

przyjęte w strategii Polski w roku 2022. Wzorem była tu definicja powstała w Stanach Zjednoczonych.

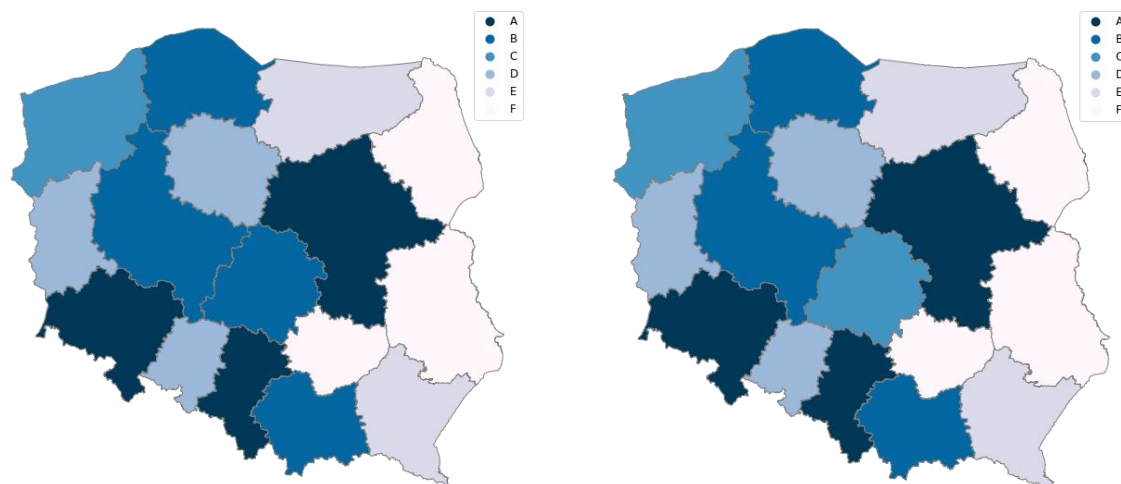


Rys. 2. Zmiana w ilości i różnorodności wykorzystywanych metali na przestrzeni czasu [3].

W skali kraju obszarem o największym znaczeniu górnictwem w kwestii surowców metalicznych jest woj. dolnośląskie (rys. 3). Obszar ten cechuje się skomplikowaną budową geologiczną, na którą składają się trzy główne struktury: monoklina przedsudecka, blok przedsudecki oraz Sudety. Każda z tych struktur była w przeszłości przedmiotem działalności górnictwa, ze względu na swoją metaloność [4]. Działalność ta pozostawiła liczne ślady w postaci wyrobisk górniczych oraz obiektów odpadowych: hałd i osadników. Jednocześnie Dolny Śląsk jest jednym z najbardziej rozwiniętych przemysłowo i technologicznie oraz atrakcyjnych inwestycyjnie regionów Polski, a na jego obszarze inwestują międzynarodowe korporacje, takie jak Mercedes czy LG Chem rozwijające technologie akumulatorowe [5, 6] (rys. 4).



Rys. 3. Udokumentowane złoża rud metali w Polsce, opracowanie własne przy wykorzystaniu danych CBDG [4].



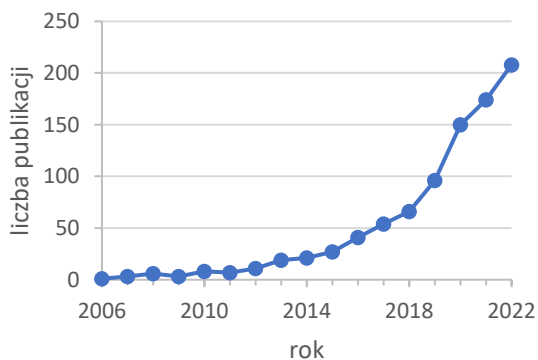
Rys. 4. (1) atrakcyjność regionów dla przemysłu, (2) istotność dla gospodarki narodowej, opracowanie własne na podstawie [6].

Tematem przygotowanej przeze mnie rozprawy doktorskiej jest *Identyfikacja, metody pozyskania i wykorzystanie metali krytycznych na Dolnym Śląsku*. Celem pracy było spojrzenie na współczesne wyzwania branży surowcowej i próba odpowiedzi na pytanie, jaki potencjał zasobowy surowców niezbędnych do transformacji energetycznej może stanowić obszar Dolnego Śląska oraz jak w systematyczny sposób można dokonać jego oceny. Wobec powyższych, praca skupia się wokół zagadnień związanych z poszukiwaniem i rozpoznawaniem potencjalnych zasobów złóż geogenicznych, ale również antropogenicznych (odpady górnicze, przerobcze oraz żużle). Ze względu na metodyczny charakter pracy przedstawiono możliwe uniwersalne, systematyczne podejście do różnych źródeł pozyskania surowców. Praca, ze względu na swój charakter, w znacznej mierze skupia się na pierwszym składniku tematu, jakim jest identyfikacja. Stanowi ona fundament dalszej działalności geologiczno-górnictwej, a jednocześnie wskazuje obszar wymagający dalszego zgłębiania. Pozostałe dwa człony tytułu, czyli metody pozyskania oraz wykorzystanie, pozwalają zobaczyć pełen obraz cyklu życia metali krytycznych na Dolnym Śląsku.

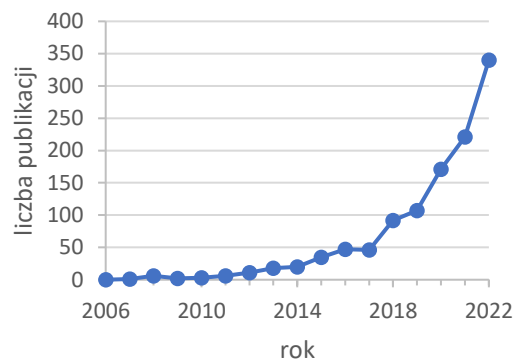
## 1.2. Znaczenie pracy

Problematyka poruszana w rozprawie doktorskiej dotyczy zagadnień poszukiwania i rozpoznawania złóż surowców na początkowym etapie poszukiwań oraz skupiona jest wokół metali krytycznych, należących do grupy surowców krytycznych. Trend zainteresowania tematem jest widoczny w literaturze naukowej indeksowanej w bazach naukowych Scopus [7] oraz Dimensions.ai [8] (rys. 5 (1)(2)). Zauważalny jest również wzrost liczby publikacji w obszarze poszukiwania i rozpoznawania złóż surowców krytycznych sensu stricto (rys. 5 (3)(4)).

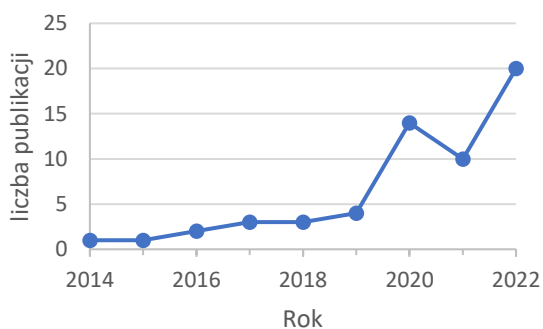
W skali krajowej wielu naukowców również podjęło próby rozwinięcia tematyki surowców krytycznych [9] (rys. 5 (5) (6)). Wśród głównych autorów w tym obszarze są Biel K., Blaschke W., Szamałek K., Jaroński A., Kulczyka J., Mazurek S., Radwanek-Bąk B., Witkowska-Kita B., Zglinicki K., Galos K., Nieć M., Sermet E., Auguścik J. Należy zauważyć, że znaczna część publikacji w języku polskim to artykuły przeglądowe lub dotyczące metodyki ustalania list surowców krytycznych, strategicznych i kluczowych. Prace bezpośrednio związane z poszukiwaniem i rozpoznawaniem złóż surowców krytycznych w obszarze Polski były publikowane przez m.in. Mikulski S. i in., Wołkiewicz S. i in., Zglinicki K. i in. Jonczy I. [9].



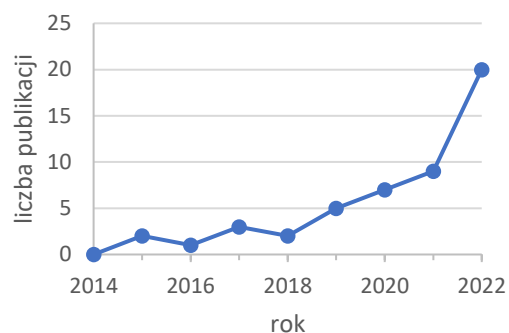
(1)



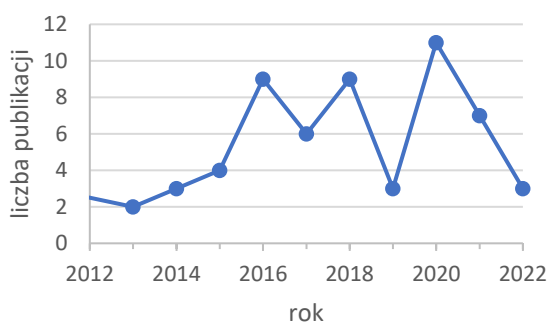
(2)



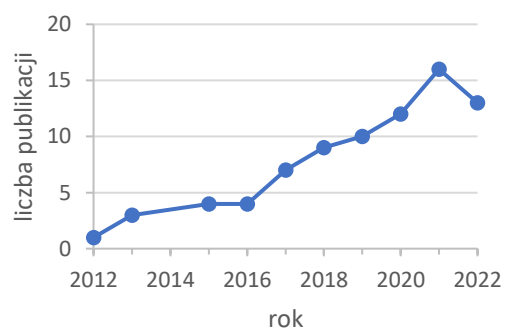
(3)



(4)



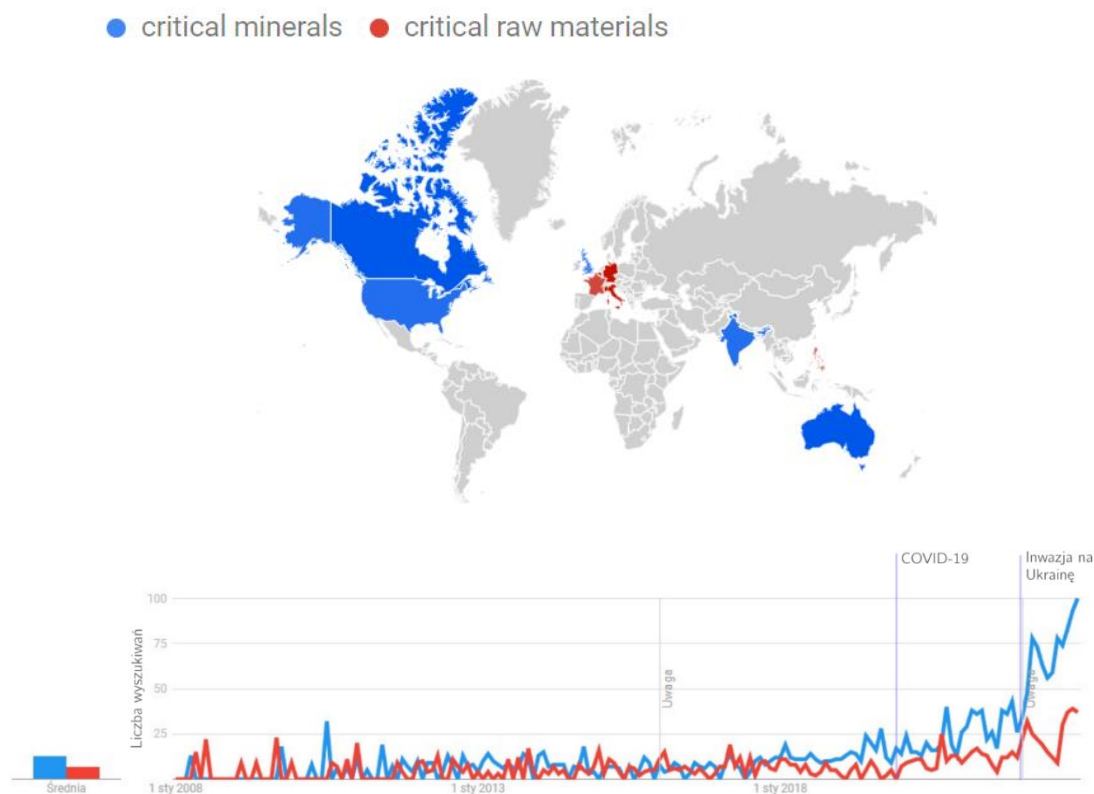
(5)



(6)

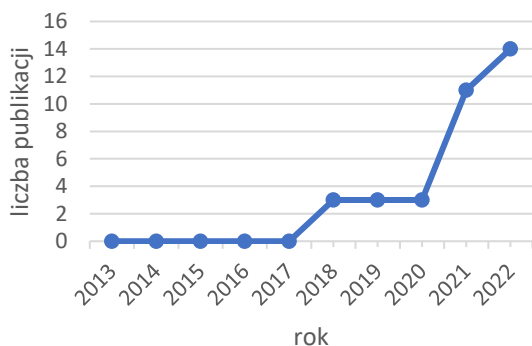
Rys. 5. Liczba wystąpień wyrażenia w tytułach, abstraktach w podziale na rok: (1) „critical raw materials” OR „critical minerals” (baza Scopus); (2) „critical raw materials” OR „critical minerals” (baza Dimensions.ai); (3) „critical raw materials” AND exploration (baza Scopus); (4) „critical raw materials” AND exploration (baza Dimension.ai); (5) „surowce krytyczne” (baza BazTech); (6) „critical raw materials” i afiliacja „Poland” (Scopus) [7].

Wzrost zainteresowania pojęciem surowców krytycznych obserwowany jest również w sferze publicznej, czego dowodem jest rosnący trend wyszukiwania pojęć „critical raw materials” w krajach europejskich oraz „critical minerals” w krajach używających tego terminu, tj. w Kanadzie, USA, Indiach oraz Australii przy wykorzystaniu przeglądarki Google [10] (rys. 6). Szczególny wzrost nastąpił w roku 2019 oraz 2022, co może być powiązane z zachwianiem łańcuchów dostaw surowców spowodowanych kolejno epidemią COVID-19 i inwazją Rosji na Ukrainę.

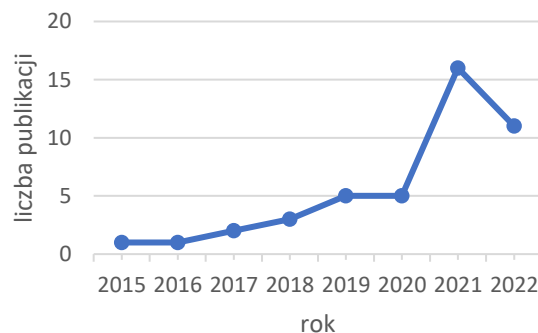


Rys. 6. Częstość występowania haseł „critical minerals” oraz „critical raw materials” w wyszukiwarce Google [10].

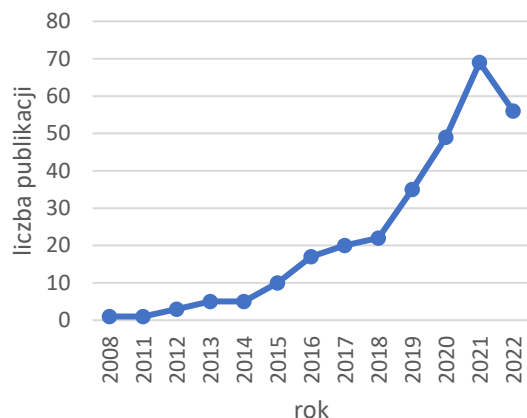
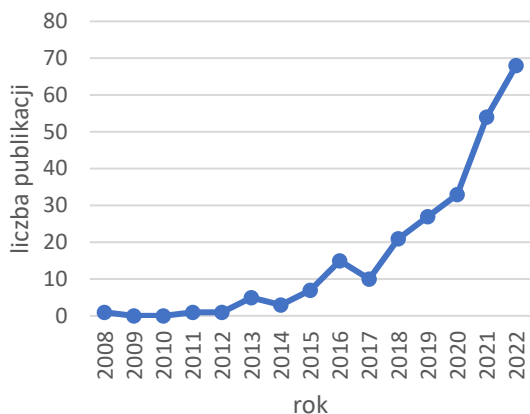
Rozprawa doktorska podzielona jest na dwie główne części dotyczące obszarów pozyskiwania metali krytycznych: potencjały geogeniczne oraz antropogeniczne. W przypadku tych pierwszych tematyka jest objęta porządkiem prawnym oraz systematyką globalną i krajową. W przypadku drugiego z wymienionych, tj. źródeł antropogenicznych, temat jest na etapie dyskusji naukowej i wiele zagadnień nie zostało uporządkowanych i poddanych jednoznacznemu określeniu. Wobec tego występuje pewien brak systematyki dotyczącej zarówno samego zdefiniowania problematyki, jak i procesu poszukiwawczo-rozpoznawczego. Kwestia ta jest zauważalna zarówno w globalnych bazach naukowych [7, 8] (rys. 7). jak i tych krajowych [9], w których indeksowane jest 1-3 publikacji dotyczących złóż antropogenicznych rocznie.



(1)



(2)



(3)

(4)

Rys. 7. Liczba wystąpień wyrażenia w podziale na rok: (1) („critical raw materials” OR „critical minerals”) AND tailing\* (baza Dimensions) (2) („critical raw materials”) OR „critical minerals”) AND tailing\* (baza Scopus) (3) („critical raw materials”) OR „critical minerals”) AND waste? (baza Dimensions) (4) („critical raw materials”) OR „critical minerals”) AND waste? (baza Scopus).

Nacisk na pozyskanie surowców krytycznych ze źródeł geogenicznych i antropogenicznych jest również zauważalny w projektach finansowanych ze środków europejskich, między innymi przez inicjatywę EIT RawMaterials oraz Horyzont 2020. Wśród kwestii dotyczących poszerzenia wiedzy z zakresu pozyskania surowców krytycznych ze źródeł geogenicznych i antropogenicznych można wyróżnić:

- 1) INCO-Piles – projekt mający na celu rozwój współpracy i wymianę wiedzy w obszarze pozyskania surowców krytycznych ze źródeł odpadowych; realizowany w latach 2020-2021 [11];
- 2) RIS-CuRE – projekt mający na celu ustanowienie sieci interesariuszy we wschodniej i południowo-wschodniej części Europy skupionych wokół tematyki odzysku metali z odpadów pochodzących z dawnego górnictwa miedzi; realizowany w latach 2019-2021 [12];
- 3) RIS-RECOVER – celem projektu było opracowanie studium wyzwań ekonomicznych, technologicznych, prawnych, środowiskowych i społecznych dla odzysku metali z obiektów odpadowych na terenie Macedonii; realizowany w latach 2018-2021 [13];
- 4) ORAMA – projekt mający na celu optymalizację jakości informacji dotyczącej surowców mineralnych geogenicznych i antropogenicznych w krajach europejskich; realizowany w latach 2017-2019 [14];
- 5) ProSUM – w trakcie projektu opracowano sieć interesariuszy oraz zebrano dane z wybranych krajów europejskich; projekt realizowano w latach 2015-2017 [15];
- 6) FutuRaM – projekt mający na celu budowę bazy wiedzy dotyczącej pozyskania surowców krytycznych ze źródeł antropogenicznych; projekt rozpoczął się w roku 2022 i potrwa do końca roku 2026 [16].

Rozprawa doktorska wiąże ze sobą zagadnienia (1) geologiczne poszukiwania złóż (geogenicznych i antropogenicznych) surowców krytycznych, (2) rynkowe metali krytycznych, (3) środowiskowe związane z potencjalną działalnością górnictwem. Zaprojektowane interdyscyplinarne podejście łączące geologię z ekonomią i ochroną środowiska pozwala na wniesienie nowego spojrzenia na kwestie wyznaczania potencjalnych złóż, w szczególności tych antropogenicznych, i daje możliwość skwantyfikowania potencjalnych zasobów, które mogłyby stać się podstawą do określenia bilansu złóż antropogenicznych dla Polski. Praca również wnosi systematykę w obszar nauki, który – w szczególności w skali krajowej – jest wciąż na etapie dyskusji naukowej.

### 1.3. Zakres pracy i jej struktura

Rozprawa doktorska, zgodnie z *art. 187. Prawa o szkolnictwie wyższym i nauce* <sup>[17]</sup>, prezentuje moją ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Struktura pracy została zaplanowana tak, aby zachować najwyższe standardy prowadzenia prac badawczych oraz aby jej wynikiem było oryginalne rozwiązanie problemu naukowego poprzez wykorzystanie własnych badań naukowych (rys. 8).

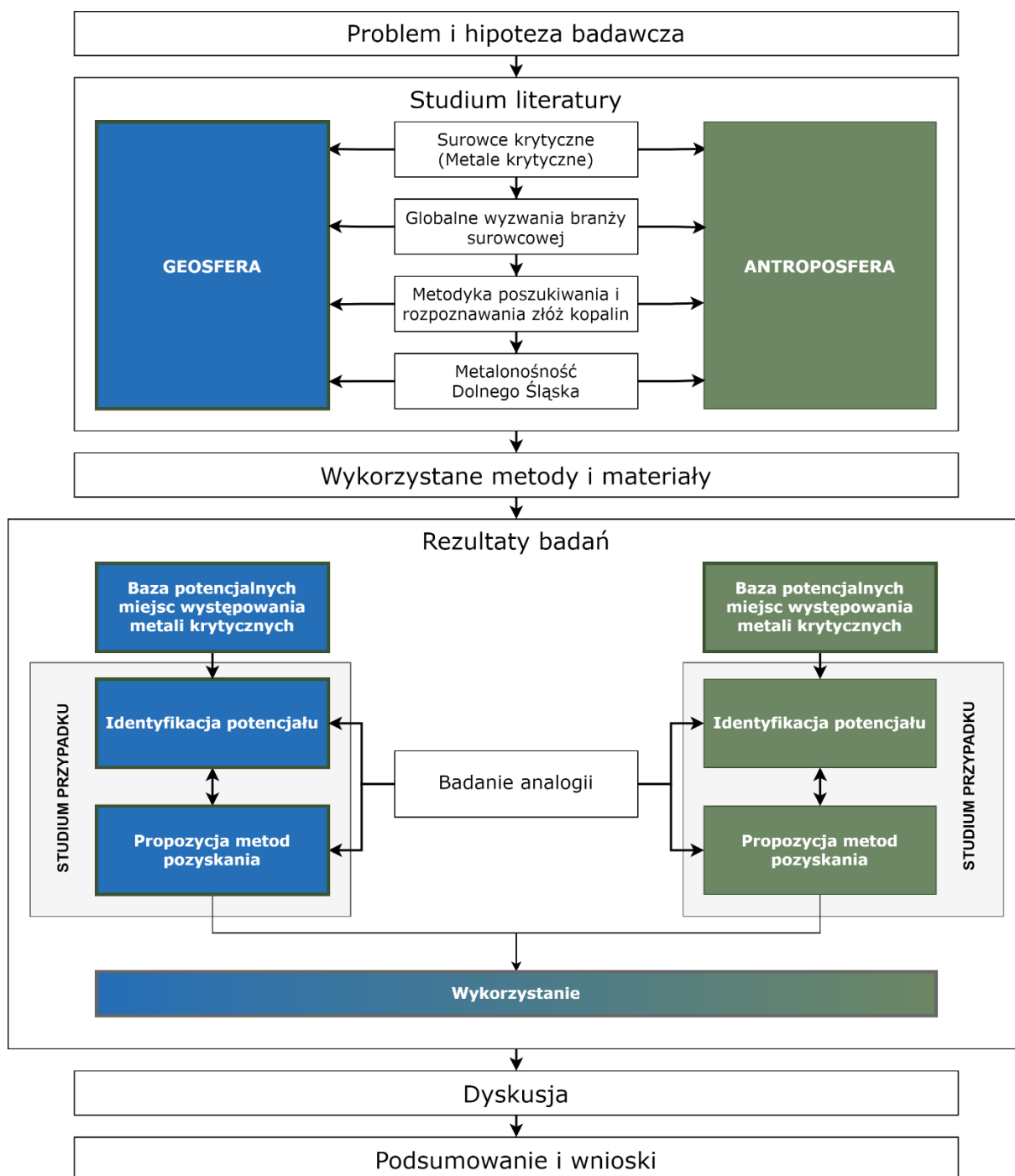
Wiedza dotycząca zagadnień (1) globalnych wyzwań branży surowcowej, (2) surowców krytycznych, (3) metodyki poszukiwania i rozpoznawania złóż kopalin oraz (4) wystąpień metali na Dolnym Śląsku została zebrana oraz usystematyzowana w *Rozdziale 2. Studium literatury*. Przed studium literatury zdefiniowano problem oraz hipotezę badawczą. Zostały one skorygowane po wstępnym rozpoznaniu problematyki zagadnienia. Studium literatury pozwoliło na zaplanowanie badań i dobór odpowiednich metod badawczych. Ich opis przedstawiono w *Rozdziale 3. Metody i materiały badawcze*. Wyniki otrzymanych badań zostały przedstawione w *Rozdziale 4. Rezultaty badań*. W *Rozdziale 5. Możliwości wdrożenia wyników badań* przedstawiono potencjał wdrożeniowy uzyskanych rezultatów. Praca zakończona jest dyskusją nad otrzymanymi wynikami w *Rozdziale 6. Dyskusja* oraz podsumowaniem w *Rozdziale 7. Podsumowanie*.

Największym wyzwaniem w pracy była część związana z przeprowadzeniem badań i sformułowaniem ich rezultatów ze względu na pewien stopień skomplikowania, jako że w celu stworzenia systematycznej metodyki niezbędne było iteracyjne podchodzenie do kolejnych kroków i korygowanie uprzednio stworzonych rysów. Ostatecznie badania pozwoliły na stworzenie autorskiej metodyki dla określenia potencjału zasobowego metali krytycznych w złożach geogenicznych oraz w złożach antropogenicznych.

Tematyka rozprawy jest ściśle związana z poszukiwaniem i rozpoznawaniem surowców kopalin, z tego względu pojawiają się istotne ograniczenia dla prowadzenia działalności badawczej w tym obszarze. Są to m.in.:

- 1) Wysokie koszty wykonywania prac poszukiwawczo-rozpoznawczych, które w znacznej mierze realizowane są przez podmioty prowadzące działalność gospodarczą i budujące swoją wartość na wynikach badań. Podobny stopień finansowania jest często nieosiągalny dla prowadzenia działalności naukowej.
- 2) Dane oraz materiały do badań są ograniczone ze względu na zastrzeżenie jej posiadania przez podmioty gospodarcze prowadzące działalność poszukiwawczo-rozpoznawczą. Przedsiębiorstwa te często nie decydują się na ich udostępnienie, co miało miejsce również w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej.
- 3) Dostępność i jakość danych są również ograniczone ze względu na brak prowadzenia systematycznych prac i publikacji ich wyników (m.in. dotyczących odpadów komunalnych) oraz do ograniczonego otwartego dostępu (m.in. do danych geologicznych). Zagadnienie to w pewnym stopniu wpływało na ograniczenie zakresu prac, ale również było wyzwaniem.

Prace nad rozprawą doktorską były prowadzone w okresie znaczących zmian na świecie związanych z pandemią COVID-19, która wpłynęła na możliwość swobodnego realizowania prac badawczych, ale w szczególności ograniczyła możliwości wyjazdów krajowych i stażów oraz wizyt zagranicznych mających istotne znaczenie dla rozwoju tematu.



Rys. 8. Schemat struktury rozprawy doktorskiej.

## 1.4. Pytania badawcze i hipotezy

W początkowym stadium pracy przyjęto jeden główny problem badawczy oraz dwa szczegółowe. Przedstawiono je poniżej.

*Czy na Dolnym Śląsku występują potencjalne źródła metali krytycznych w utworach geogenicznych i antropogenicznych?*

- 1) Czy znane obszary występień mineralizacji polimetalicznych na Dolnym Śląsku mogą stanowić potencjał złożowy metali krytycznych?
- 2) Czy potencjał metali krytycznych w utworach antropogenicznych na Dolnym Śląsku jest określany przy wykorzystaniu systematycznych prac poszukiwawczo-rozpoznawczych?



Do tak postawionych pytań sformułowano wstępną hipotezę ogólną oraz dwie hipotezy szczegółowe:

*Na Dolnym Śląsku występują potencjalne źródła metali krytycznych w utworach geogenicznych i antropogenicznych.*

- 1) Systematyczna analiza znanych wystąpień mineralizacji polimetalicznych na Dolnym Śląsku pozwala na określenie ich potencjału metali krytycznych.
- 2) Systematyczna metodyka poszukiwawczo-rozpoznawcza pozwala na określenie potencjału mineralizacyjnego metali krytycznych w utworach antropogenicznych na Dolnym Śląsku.

Po dokonaniu wstępnych badań i rozpoznaniu głównych wyzwań z obszaru tematyki przeformułowano hipotezę ogólną i szczegółowe, nadając im brzmienie:

*Na Dolnym Śląsku występują nagromadzenia metali krytycznych w utworach geogenicznych i antropogenicznych, które w przyszłości mogą stać się przedmiotem eksploatacji.*

- 1) Systematyczna analiza znanych wystąpień utworów polimetalicznych na Dolnym Śląsku, oparta o zasady gospodarki o obiegu zamkniętym i analizę ekonomiczną, pozwala na określenie ich potencjału metali krytycznych.
- 2) Systematyczna metodyka poszukiwawczo-rozpoznawcza, oparta o analizę historyczną i ekonomiczną, pozwala na wyselekcjonowanie obszarów podwyższonego potencjału metali krytycznych na Dolnym Śląsku.



---

## Rozdział 2. Studium literatury

---



## 2.1. Surowce krytyczne

### 2.1.1. Terminologia

Początki terminu „surowce krytyczne” związane są z okresem pierwszej wojny światowej, kiedy to Amerykanie dostrzegli zachwianie podaży cyny, niklu, platyny, azotanów i potasu niezbędnych dla produkcji zbrojeń, maszyn do przemysłu i nawozów dla rolnictwa. Z tego powodu w roku 1917 stworzono pierwszą nieoficjalną listę surowców strategicznych i krytycznych dla Stanów Zjednoczonych [18]. Termin ten zyskał na aktualności potrzebom zmian w podejściu gospodarczym (decoupling), dążeniu do zrównoważonego rozwoju (SGDs), transformacji energetycznej, rozwojowi przemysłu 4.0 oraz postępującej digitalizacji gospodarek. Wyzwania te zwiększają wymagania branży poszukiwawczej i wydobywczej. Obserwowane jest odejście od nacisku na pojedyncze surowce, a rolę przejmuje wykorzystanie ich spektrum do produkcji nowoczesnych technologii. Jako główny przykład wskazywane są baterie, których produkcja notuje znaczący wzrost, co wynika z ich niezbędności dla rozwoju elektromobilności, magazynów energii w OZE oraz nowoczesnej elektroniki. Do wytworzenia jednej baterii niezbędna jest miedź, grafit, krzem, tytan, kobalt, lit, mangan, nikiel, aluminium, niob i inne.

Z tego względu rozwój wysokich technologii uzależniony jest od zaopatrzenia w różnorodne pierwiastki. Są to głównie surowce metaliczne, które pomimo najmniejszego udziału w masie surowców, mają znaczenie w gospodarce ze względu na trudności z ich pozyskaniem i zastąpieniem. Warunki geologiczne oraz kwestie geopolityczne powodują, że występuje duże ryzyko uzależnienia dostaw poszczególnych, niezbędnych surowców od pojedynczych krajów.

W Polsce termin „surowce krytyczne” został oficjalnie zdefiniowany w Polityce Surowcowej Państwa do 2050 roku, przyjętej przez Radę Ministrów 1 marca 2022 r. i brzmi: *„Za surowce krytyczne dla polskiej gospodarki zostały przyjęte takie surowce strategiczne, których możliwości pozyskania, zarówno ze źródeł pierwotnych, jak i wtórnych, są obciążone albo dużym ryzykiem albo istnieją bardzo duże trudności ich pozyskania, a możliwości ich substytucji są niewielkie. Są to w szczególności surowce znajdujące się na liście surowców krytycznych dla Unii Europejskiej, ale także takie surowce, które mimo występowania w dużej ilości są niemożliwe do pozyskania, np. z powodu uwarunkowań planistycznych, protestów społecznych itp.”* [19].

Ostateczna zaproponowana lista surowców jest konsensusem działań kilku zespołów badawczych, którzy część swoich prac publikowali przed rokiem 2022 [36 – 38]. Ostatecznie na liście znalazły się: gaz ziemny, ropa naftowa, antymonu surowce, boksyty i alumina, chromu surowce, krzem metaliczny, magnez metaliczny, manganu surowce, molibdenu surowce, pierwiastki ziem rzadkich, platynowce, węgiel kamienny koksowy/węgiel koksujący, wolfram metaliczny, bursztyny, fosfor elementarny, fosforany wapnia/fosforyty, grafit naturalny (tab. 2).

PSP definiuje również dwie grupy surowców strategicznych. Jest to pojęcie szersze niż zdefiniowane powyżej surowce krytyczne i obejmuje:

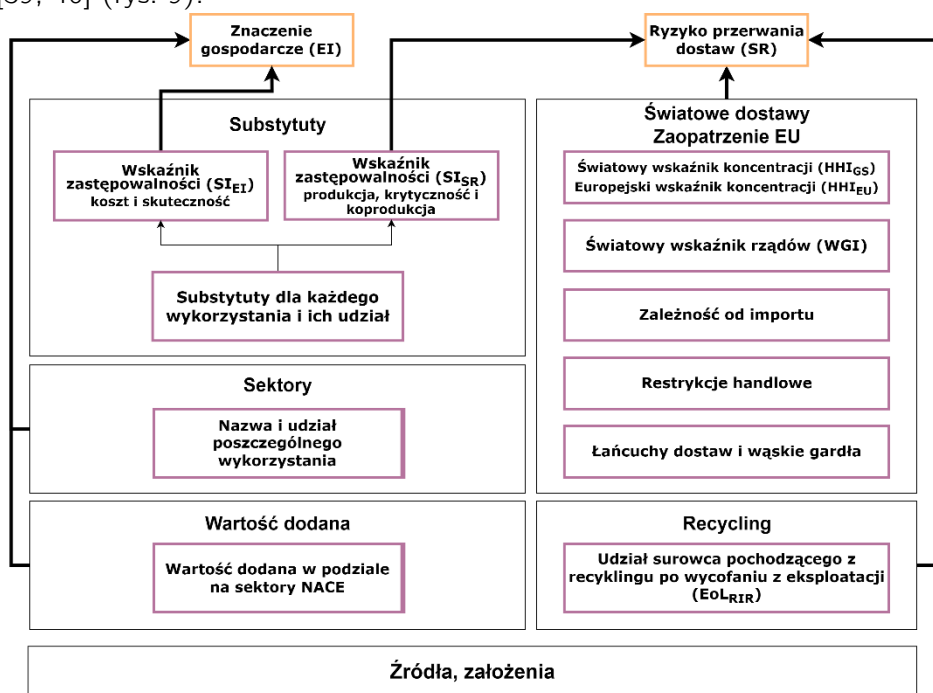
*„1. Surowce strategiczne o podstawowym znaczeniu dla prawidłowego funkcjonowania gospodarki i zaspokojenia potrzeb bytowych społeczeństw, których trwała podaż musi być zapewniona – zarówno takie, których krajowa baza zasobowa jest duża i które dzięki jej wykorzystaniu są podstawą działania przemysłu, jak i ważne surowce deficytowe (pochodzące w całości lub w większości z importu).*

*2. Surowce strategiczne o podstawowym znaczeniu dla bezpieczeństwa narodowego i innowacyjnych technologii – surowce, które nie są w sposób wystarczający (min. 90%) pozyskiwane ze źródeł krajowych lub których możliwości trwałego pozyskania z tych źródeł są ograniczone lub zagrożone oraz inne surowce niepozyskiwane w kraju (deficytowe) niezbędne dla obronności kraju i bezpieczeństwa narodowego oraz rozwoju innowacyjnych technologii”* [19].

Polski termin krytyczności w sposób bezpośredni nawiązuje do metodologii zaproponowanej przez Komisję Unii Europejskiej [23], w której definicji surowców nadano brzmienie: „Surowce krytyczne (ang. Critical raw materials (CRM)) są to surowce o wysokim znaczeniu dla gospodarki Unii Europejskiej oraz których podaż jest związana z wysokim ryzykiem”.

### 2.1.1. Metodyka wyznaczania list surowców krytycznych

Dwoma głównymi parametrami niezbędnymi do określania listy surowców krytycznych są (1) znaczenie ekonomiczne, (2) ryzyko przerwania dostaw. Jako krytyczne określane są te, które przekraczają progi ustalone przez Komisję Europejską. Jednocześnie nie hierarchizuje ona poszczególnych surowców, mówi jedynie o ich krytyczności lub jej braku. Aktualne szczegóły dotyczące określania wartości tych parametrów zostały opisane przez Komisję Europejską w metodologii z roku 2017 [39, 40] (rys. 9).



Rys. 9. Struktura metodyki wyznaczenia krytyczności, opracowanie własne na podstawie [40 – 42].

Początki ustaleń dotyczących opracowania polityki w tym zakresie rozpoczęły się w roku 2008. Utworzono wtedy Europejską Inicjatywę Surowcową (ang. European Raw Materials Initiative (RMI)). Celami, którym miała sprostać było: (1) zabezpieczenie uczciwej i zrównoważonej podaży surowców w handlu międzynarodowym, (2) wspieranie zrównoważonej dostawy surowców w obrębie Unii Europejskiej oraz (3) zwiększanie efektywności wykorzystania zasobów i promowanie recyklingu [27]. Wynikiem działań była opublikowana w roku 2011 lista surowców krytycznych dla Unii Europejskiej. Po przeprowadzeniu analizy 41 surowców, ostatecznie wybrano 14, które pojawiły się na oficjalnej liście: antymon, beryl, kobalt, fluoryt, gal, german, grafit, ind, magnez, niob, platynowce, pierwiastki ziem rzadkich, tantal i wolfram [28]. Ze względu na zmieniające się warunki gospodarcze oraz rozwój nauki i technologii, lista ta wymaga co pewien czas aktualizacji. Sugerowanym interwałem dla weryfikacji i uaktualnienia określono 3 lata [38, 43]. Wobec tego kolejna lista ukazała się w roku 2014, kiedy to przeanalizowano 54 surowce i ostatecznie wybrano 20: antymon, beryl, borany, chrom, kobalt, węgiel koksujący, fluoryt, gal, german, ind, magnezyt, magnez, grafit naturalny, niob, fosforyt, metale z grupy platynowców, metale ciężkie ziem rzadkich, metale lekkie ziem rzadkich, krzem metaliczny i wolfram [29]. Kolejna lista europejska pojawiła się w roku 2017. Powstała na bazie analizy 58 surowców oraz 3 grup pierwiastków (łącznie 78 surowców) i zawierała: antymon, beryl, borany, kobalt, węgiel koksujący, fluoryt, gal, german,

ind, magnez, grafit naturalny, niob, fosforyt, krzem metaliczny, wolfram, platynowce, ciężkie pierwiastki ziem rzadkich, lekkie pierwiastki ziem rzadkich, baryt, bizmut, hafn, hel, kauczuk naturalny, skand, tantal oraz wanad [30]. Kolejne zestawienie zostało opublikowane w drugiej połowie 2020 roku (tab. 2). Po ocenie 63 surowców i 3 grup pierwiastków (łącznie 83 surowce) wybrano 27 surowców i 3 grupy pierwiastków. Poprzednia lista została rozszerzona o boksyty, lit, tytan oraz stront. Usunięto natomiast hel, ponieważ jego znaczenie gospodarcze spadło [31].

Najnowsza lista została opublikowana już po zakończeniu znacznej części prac związanych z niniejszą rozprawą. Z listy usunięto *ind* oraz *naturalny kauczuk*, pojawiły się natomiast *arsen*, *skaleń*, *hel* i *mangan*. Dodatkowo uwzględniono *miedź* i *nikiel*. Nie osiągnęły one co prawda kryteriów krytyczności, ale ujęto je jako surowce strategiczne [26] (tab. 2).

Ze względu na brak globalnej definicji pojęcia „surowców krytycznych” podejście do krytyczności w różnych krajach i regionach świata jest rozumiane w różny sposób. Znajduje to przełożenie w ich ostatecznych zestawieniach. Przykładem jest Australia, gdzie termin jest rozumiany w sposób bliski europejskiej definicji, jednak sama lista surowców krytycznych (ang. critical minerals) jest inna. Odnosi się ona do dużego potencjału geologicznego kraju oraz bazuje na strategicznych potrzebach głównych partnerów (USA, EU, Japonii, UK, Indii, Korei Południowej oraz Kanady) [32]. Na tej podstawie określono 26 głównych surowców, które są szansą dla Australii na stanie się globalnym liderem ich dostarczania (tab. 2). Ze względu na ujęcie problematyki, lista ta jest swego rodzaju odbiciem globalnego zapotrzebowania na surowce.

W Kanadzie aktualna lista (2022) zawiera 31 surowców (ang. critical minerals), które: (1) są niezbędne dla bezpieczeństwa gospodarki i ich podaż jest zagrożona lub (2) są niezbędne dla transformacji energetycznej lub (3) są zrównoważonym źródłem wysoce strategicznych surowców krytycznych dla partnerów i sojuszników kraju [33] (tab. 2).

W Stanach Zjednoczonych pierwsza nieoficjalna lista surowców krytycznych (ang. critical minerals) została stworzona w roku 1917 i zawierała 5 surowców. Na przestrzeni lat powstawały kolejne listy, które oparte były o zróżnicowane metodologie ich wyznaczania. Aktualny spis powstał w roku 2022 i zawiera aż 50 surowców (w stosunku do 35 z roku 2018) (tab. 2). Są one uważane za krytyczne ze względu na: (1) ich rolę w bezpieczeństwie narodowym lub rozwoju gospodarczym; (2) musi istnieć jasna strategia ich łańcucha dostaw, ponieważ są one w większości importowane i zgodnie z definicją USA ich dostawy są podatne na zakłócenia; (3) nie są to paliwa kopalne [34, 50].

Politykę w zakresie surowców krytycznych prowadzi również od 1984 roku Japonia, która utworzyła listę (ang. rare metals). Pojawiała się ona w niezmienionej formie w dokumentach formalnych jeszcze w roku 2014. Niedawno została zaktualizowana i obejmuje 34 surowce krytyczne oraz dwie grupy pierwiastków [35] (tab. 2).

Oficjalne listy były też publikowane m.in. przez Indie oraz Wielką Brytanię (po 18 surowców) [32] (tab. 2).

Analiza strategii (tab. 1) oraz formułowanych na świecie list surowców krytycznych pozwala na zauważenie istotnych różnic, które utrudniają jednoznaczne porównywanie ze sobą podejść różnych krajów i regionów. Przykładem jest nacisk na znaczenie surowców w transformacji energetycznej. W przypadku Stanów Zjednoczonych pojawia się w definicji jednoznaczny wpis niepozwalający na ujęcie na liście paliw kopalnych. Tego typu strategia nie została przyjęta w Polsce, gdzie jako krytyczne określono węgiel kamienny, gaz ziemny i ropę naftową. Jednocześnie, ze względu na różne metodologie wyznaczania list, pojawiają się różnice w ujmowaniu poszczególnych pierwiastków, grup pierwiastków czy surowców. Jako przykład mogą posłużyć pierwiastki ziem rzadkich, które w Stanach Zjednoczonych były określane jako grupa do 2022 roku, jednak na aktualnej liście zostały rozbite na poszczególne pierwiastki. Jako grupa są one wciąż ujmowane w Polsce, Kanadzie czy Australii. W Unii Europejskiej zdecydowano się natomiast na wyszczególnienie lekkich pierwiastków ziem rzadkich i ciężkich pierwiastków ziem rzadkich.

Tab. 1. Porównanie strategii politycznych odnośnie surowców krytycznych w różnych krajach/regionach [35, 51].

	Stany Zjednoczone	Unia Europejska	Japonia	Polska
Termin w dokumentach strategicznych	critical minerals	critical raw materials	rare metals	surowce krytyczne – critical raw materials
Główne rozwiazane obszary	wymagania obronności, bezpieczeństwo gospodarki; konkurencyjność przemysłu; brak skupienia na czystej energii	konkurencyjność gospodarki w sektorze czystej energii; polityczny wkład w neutralność klimatyczną	konkurencyjność gospodarki	bezpieczeństwo gospodarki; konkurencyjność przemysłu po odejściu od węgla; wsparcie dywersyfikacji źródeł dostaw dla transformacji energetycznej
Kierunki rozwoju i innowacyjności	wspieranie rozpoznania zasobów krajowych; procesy separacji i przeróbki; rozwój substytucji; technologie recyklingu	procesy separacji i przeróbki; rozwój substytucji; technologie recyklingu	rozwój substytucji; technologie recyklingu	wspieranie rozpoznania zasobów krajowych; rozwój substytucji (m.in. odpady górnicze)
Współpraca międzynarodowa	współpraca nakierowana na sojuszników. konfrontacyjne nastawienie do Chin	waga współpracy wewnątrz Unii Europejskiej oraz w jej bliskości	handel i inwestycje z krajami zasobnymi w surowce. inwestowanie w krajach rozwijających się i zasobnych w surowce w celu budowania potencjału	partnerstwo surowcowe z krajami zasobnymi w surowce; aktywna współpraca w obrębie grup eksperckich UE
Problemy z dostępem do obszarów	zezwozenia	zezwozenia	nie dotyczy	dokumentowanie złóż i ujmowanie ich w dokumentacjach planistycznych; wspierające warunki prawne dla inwestorów
Problemy z kadrą pracowniczą	pracownicy branży wydobywczej i specjaliści w przeróbce	pracownicy branży wydobywczej i specjaliści w przeróbce	specjaliści w substytucji oraz naukowcy w technologiach recyklingu	nie podkreślone w PSP w odniesieniu do surowców krytycznych. prowadzenie działań edukacyjnych dla społeczeństwa
Lista surowców krytycznych	50, lista z roku 2022	34, lista z roku 2023, aktualizowana co 3 lata	34, zmieniona lista z 2014 roku	17, lista z 2022 roku
Zapasy	na potrzeby departamentu obrony	brak na poziomie Unii Europejskiej oraz krajów członkowskich	od roku 1983 na potrzeby przemysłu, krajowego (70%) i prywatnego (30%)	nie podkreślone w PSP

W rozprawie rozważaniom poddałem 14 metali oraz 2 grupy metali (tab. 2). Wybór został podparty odniesieniem do polityki europejskiej oraz do strategii krajowej [19,25]. Analizom poddałem także nikiel, który był pod szczególnym monitoringiem Unii Europejskiej ze względu na swoje znaczenie przy transformacji energetycznej, a w roku 2023 pojawił się na liście jako surowiec strategiczny. W pracy używałem terminu odnosiłem się do grupy pierwiastków ziem rzadkich (REE), który jest szeroko wykorzystywany w dokumentacji polskiej. Stanowiło to ułatwienie ze względu na charakter pracy doktorskiej (analiza danych historycznych) i trudność w uzyskaniu danych dla podziału stosowanego przez Unię Europejską (lekkie i ciężkie pierwiastki ziem rzadkich) lub pełnego podziału na pierwiastki jak na liście USA.

Dodatkowo specyfika analizy obszarów potencjalnych złóż mineralnych wymagała ode mnie, abym w pewnym zakresie rozważył charakterystykę oraz występowanie takich metali jak: miedź, cynk, srebro, cynę, ren, złoto, ołów, które w przeważającej części stanowią podstawową kopalinę.



Tab. 2. Surowce krytyczne dla USA, UE, Australii, Japonii oraz Polski (opracowanie własne w oparciu o [19,26,28–32,36–39]), na niebiesko oznaczono surowce ujęte w ramach rozprawy doktorskiej.

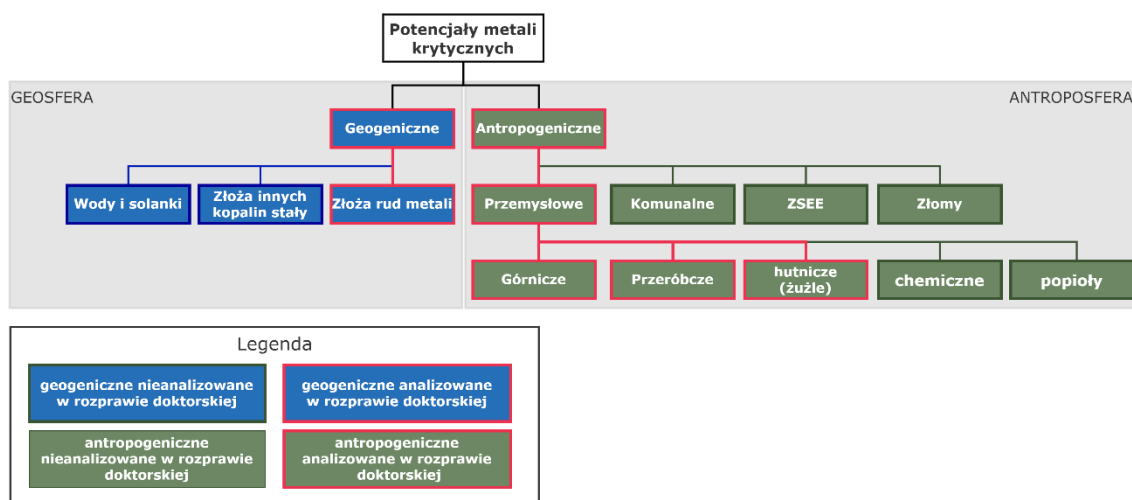
Sym.	Surowiec	USA 2018	USA 2022	Kanada 2021	Australia 2022	Wielka Brytania 2022	Indie 2016	Japonia 2014	UE 2011	UE 2014	UE 2017	UE 2020	UE 2023	Polska 2022	Polska prod. 2022*	Ta rozprawa
He		X		X	X								X			
Li		X	X	X	X	X	X	X				X	X			X
Be		X	X		X		X	X	X	X	X	X	X			
B	borany							X		X	X	X	X			
F	fluoryt	X	X	X				X	X	X	X	X	X			
Mg	magnez metaliczny	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		
Al	boksyt	X	X	X								X	X	X		X
Si	krzem metaliczny					X	X	X		X	X	X	X	X		
P	fosfor elementarny										X	X	X	X		
K		X	X	X												
Sc		X	X	X	X						X	X	X			
Ti		X	X	X	X			X				X	X			X
V		X	X	X	X	X	X	X			X	X	X			X
Cr	chromu surowce	X	X	X	X		X	X		X				X		X
Mn	manganu surowce	X	X	X	X			X					X	X		X
Co		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
Ni			X	X				X					X		X	X
Cu				X									X		X	
Zn			X	X											X	
Ga		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
Ge		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X			X
As		X	X										X			
Se								X							X	
Rb		X	X					X								
Sr		X						X			X	X	X			
Zr		X	X		X		X	X								
Nb		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
Mo	molibdenu surowce			X				X						X		X
In		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
Sn		X	X	X		X										
Sb	antymonu surowce	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
Te		X	X	X		X		X								
Cs		X	X	X				X								
Ba	baryt	X	X					X			X	X	X			
Hf		X	X		X			X			X	X	X			
Ta		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X			
W	wolfram metaliczny	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X
Re		X			X		X								X	
Bi		X	X	X	X	X	X				X	X	X			

Sym.	Surowiec	USA 2018	USA 2022	Kanada 2021	Australia 2022	Wielka Brytania 2022	Indie 2016	Japonia 2014	UE 2011	UE 2014	UE 2017	UE 2020	UE 2023	Polska 2022	Polska prod. 2022*	Ta rozprawa
U		X		X												
	węgiel koksujący									X	X	X	X	X	X	
	węgiel kamienny							X							X	
	ropa naftowa													X	X	
	gaz ziemny													X	X	
	grafit naturalny	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X		
	magnezyt									X					X	
	fosforyt (fosforany wapnia)									X	X	X	X	X		
	plagioklasy												X			
	kauczuk naturalny										X	X				
	bursztyny													X		
PGM	platynowce (jako grupa)	X		X	X		X	X	X	X	X	X		X		X
Ru			X													
Rh			X													
Pd			X			X									X	
Ir			X													
Pt			X			X							X		X	
LREE	lekke pierwiastki ziem rzadkich (jako grupa)									X	X	X	X			
HREE	ciężkie pierwiastki ziem rzadkich (jako grupa)									X	X	X	X			
REE	pierwiastki ziem rzadkich (jako grupa)	X		X	X	X	X	X	X					X		X
Y			X													
La			X													
Ce			X													
Pr			X													
Nd			X													
Sm			X													
Eu			X													
Gd			X													
Tb			X													
Dy			X													
Ho			X													
Er			X													
Tm			X													
Yb			X													
Lu			X													
	suma	35	50	31	24	18	18	31	14	20	27	30	34	17	12	16

\*surowce produkowane przez Polskę

## 2.1.2. Występowanie metali krytycznych i bazowych w skorupie ziemskiej

Metale krytyczne jak i pozostałe metale mogą występować w dwóch sferach (1) geosferze – związanej z naturalnymi nagromadzeniami tych surowców oraz (2) antroposferze, czyli sferze wynikającej z działalności człowieka. Podział ten jest wykorzystywany przez UNFC i pozwala na uporządkowanie spojrzenia na kwestię wykorzystania surowców odpadowych [40]. W rozprawie doktorskiej analizie poddałem potencjalne złoża rud metali będące częścią geosfery oraz odpady przemysłowe: górnicze, przeróbcze oraz hutnicze (rys. 10). Pozostałe potencjalne źródła metali również stanowią istotne obszary badawcze i powinny stać się częścią kolejnych opracowań. W sferze geogenicznej są to wody i solanki oraz złoża innych kopalin stałych (np. surowce skalne). W sferze antropogenicznej są to odpady komunalne, zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny oraz złomy. Wśród dodatkowych, istotnych wystąpień w odpadach przemysłowych należy wziąć pod uwagę te chemiczne oraz popioły (np. z przemysłu energetycznego).



Rys. 10. Podział na geosferę oraz antroposferę oraz potencjalne źródła metali krytycznych.

Zrozumienie złożonego i heterogenicznego rozkładu występowania metali w skorupie ziemskiej stanowi jedną z podstaw mojej pracy doktorskiej. W poszukiwaniu i rozpoznawaniu złóż surowców mineralnych wykorzystywane są wskaźniki będące m.in. stosunkiem zawartości danego pierwiastka w badanym ośrodku rudnym do:

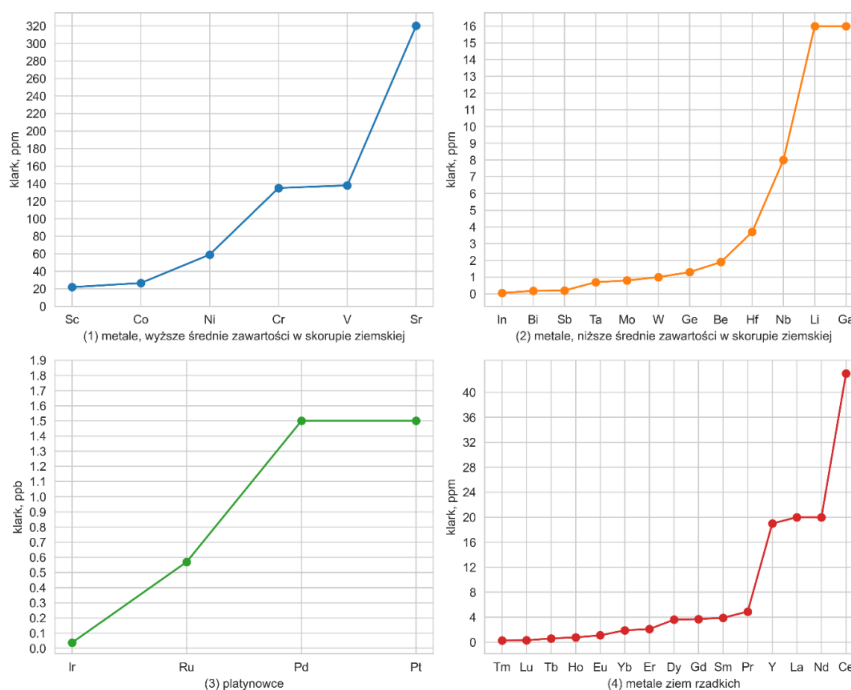
- średniej zawartości tego pierwiastka w skorupie ziemskiej (klarka);
- średniej zawartości tego pierwiastka w danej formacji skalnej (magmaowej, metamorficznej, osadowej);
- zawartości pierwiastka w innych, analogicznych złożach będących przedmiotem eksploatacji.

Badania nad średnią zawartością pierwiastków w skorupie ziemskiej prowadzone są od wielu dziesięcioleci, a jakość szacunków wzrasta z postępem zarówno w obszarze dokładności badań laboratoryjnych, jak i w ilości danych dotyczących występowania poszczególnych pierwiastków w utworach geologicznych [41–43] (tab. 3–4).

Dominującym składnikiem kontynentalnej skorupy ziemskiej są tlenki krzemu ( $\text{SiO}_2$ ), aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), żelaza ( $\text{FeO}$ ), wapnia ( $\text{CaO}$ ) oraz magnezu ( $\text{MgO}$ ), które stanowią 94,28% jej masy. Jednak metale krytyczne, takie jak lit, kobalt i pierwiastki ziem rzadkich (REEs), pomimo ich rosnącego znaczenia w naszym technologicznie rozwijającym się społeczeństwie, występują w stosunkowo niewielkich ilościach. Najwięcej wśród nich jest nikiel, chrom, wanad i stront, których zawartości w skorupie ziemskiej sięgają od 21,9 do 320 ppm (rys. 11). Dużo mniej jest indu, bizmutu, antymonu, tantalumu, molibdenu, wolframu, germanu, berylu, hafnu, niobu, litu i galu,

których zawartości wahają się od 0,059 ppm do 16 ppm. Metale ziem rzadkich, mimo swojej nazwy, sumarycznie charakteryzują się średnią zawartością w skorupie powyżej 100 ppm. Aczkolwiek dla pierwiastków jak terb, holm, tul, i lutet nie przekraczają one 1 ppm [42].

Koncentracja pierwiastków jest też zależna od skał, w których występują. Skrajnym przykładem jest chrom, którego średnia zawartość w skorupie to zaledwie 135 ppm, natomiast w skałach magmowych ultrazasadowych osiąga zawartości rzędu 1600-3400 ppm [44].



Rys. 11. Średnie zawartości poszczególnych metali w skorupie ziemskiej.

W początkowych etapach poszukiwania złóż kopalin mineralnych te zawartości, a raczej ich brak, dostarczają kluczowych informacji, które kierują procesami decyzyjnymi. Zrozumienie geochemicznego rozkładu tych elementów pozwala przewidzieć prawdopodobne miejsca występowania ekonomicznie opłacalnych złóż i określić możliwość ich wydobycia. Ponadto pomaga ono w projektowaniu strategii poszukiwawczych, wskazując obszary wymagające bardziej szczegółowych badań geofizycznych i geochemicznych.

Rzadkość występowania w połączeniu z nierównomiernym rozkładem to to, co charakteryzuje elementy 'krytyczne'. Wymagają one dogłębnego zrozumienia zachowania geochemicznego i opracowania innowacyjnych, efektywnych i zrównoważonych podejść do poszukiwań, wydobycia i przeróbki. W miarę postępów rozprawy będę wyjaśniać te wyzwania i proponować rozwiązania, przyczyniając się tym samym do rozwijania dziedziny poszukiwania metali krytycznych.

Procesy magmowe, pomagmowe, metamorficzne, ultrametamorficzne oraz hipergeniczne, które są warunkowane hydrosferą, atmosferą i biosferą, regulują obieg pierwiastków chemicznych w różnych środowiskach skorupy ziemskiej. Te procesy prowadzą do tworzenia się różnorodnych minerałów, skał i złóż [44].

Magma jest w większości złożona z  $\text{SiO}_2$ , a w podrzędnych, zmiennych ilościach występują także  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ . Dodatkowo zawiera też składniki lotne, takie jak para wodna,  $\text{CO}_2$  oraz gazowe połączenia siarki, chloru, fluoru, boru i innych. W magmie mogą też znajdować się składniki stałe, które nie uległy całkowitemu upłynnieniu. Głównym składnikiem skał magmowych jest krzemionka ( $\text{SiO}_2$ ), stanowiąca o podziale tych skał na ultrazasadowe (<44%  $\text{SiO}_2$ ), zasadowe (44-53%), pośrednie (53-65%) i kwaśne (>65%). Magma pierwotna, poza głównymi składnikami skałotwórczymi, może zawierać prawie wszystkie pierwiastki chemiczne. Ich udział natomiast zależy jest między innymi od cyklu procesów magmowych

i pomagmowych. We wczesnych procesach krystalizacji powstają produkty, takie jak m.in. rudy żelazisto-tytanowe, perydotyty oraz piroksenity, w których występują chrom, wanad, nikiel, kobalt oraz platynowce, a w stopie siarczowym również miedź. W skałach zasadowych i pośrednich spotyka się najczęściej arsen, gal, german, mangan, skand, strony, cynk, cyrkon i lantanowce, a w skałach kwaśnych rubid, bar, cez, ołów i inne. Znacząca ilość rzadkich pierwiastków związana jest z procesami pomagmowymi, w których znajdują sprzyjające warunki do koncentracji w takich ilościach, aby wykształcić własne minerały, a czasem również złoża. Do tych pierwiastków zalicza się srebro, arsen, złoto, bor, beryl, bizmut, miedź, fluor, rtęć, lit, mangan, molibden, niob, antymon, cyna, tantal, wolfram, cynk, a także lantanowce i uran [44].

Tab. 3. Zawartość metali krytycznych w skorupie ziemskiej

Symbol	Liczba atomowa	Jednostka [8]	Górna warstwa litosfery [8]	Środkowa warstwa litosfery [8]	Dolna warstwa litosfery [8]	Litosfera średnio [8]
Li	3	ppm	24	12	13	16
Al	13	% wag.	15,4 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,9 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,9 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ti	22	% wag.	0,64 TiO <sub>2</sub>	0,69 TiO <sub>2</sub>	0,82 TiO <sub>2</sub>	0,72 TiO <sub>2</sub>
V	23	ppm	97	107	196	138
Cr	24	ppm	92	76	215	135
Mn	25	ppm	1000 MnO	1000 MnO	1000 MnO	1000 MnO
Co	27	ppm	17,3	22	38	26,6
Ni	28	ppm	47	33,5	88	59
Cu	29	ppm	28	26	26	27
Ga	31	ppm	17,5	17,5	13	16
Ge	32	ppm	1,4	1,1	1,3	1,3
Nb	41	ppm	12	10	5	8
Mo	42	ppm	1,1	0,6	0,6	0,8
Ag	47	ppb	53	48	65	56
Sb	51	ppm	0,4	0,28	0,1	0,2
W	74	ppm	1,9	0,6	0,6	1
PGM						
Ru	44	ppb	0,34		0,75	0,57
Pd	46	ppb	0,52	0,76	2,8	1,5
Pt	78	ppb	0,5	0,85	2,7	1,5
REE						
Y	39	ppm	21	20	16	19
La	57	ppm	31	24	8	20
Ce	58	ppm	63	53	20	43
Pr	59	ppm	7,1	5,8	2,4	4,9
Nd	60	ppm	27	25	11	20
Sm	62	ppm	4,7	4,6	2,8	3,9
Eu	63	ppm	1	1,4	1,1	1,1
Gd	64	ppm	4	4	3,1	3,7
Tb	65	ppm	0,7	0,7	0,48	0,6
Dy	66	ppm	3,9	3,8	3,1	3,6
Ho	67	ppm	0,83	0,82	0,68	0,77
Er	68	ppm	2,3	2,3	1,9	2,1
Tm	69	ppm	0,3	0,32	0,24	0,28
Yb	70	ppm	2	2,2	1,5	1,9
Lu	71	ppm	0,31	0,4	0,25	0,3

Tab. 4. Zawartość metali bazowych w skorupie ziemskiej.

Symbol pierwiastka	Liczba atomowa	związek, jednostka [8]	Górna warstwa litosfery [8]	Środkowa warstwa litosfery [8]	Dolna warstwa litosfery [8]	Litosfera [8]
Cu	29	ppm	28	26	26	27
Zn	30	ppm	67	69,5	78	72
Ag	47	ppb	53	48	65	56
Sn	50	ppm	2,1	1,3	1,7	1,7
Re	75	ppb	0,198		0,18	0,188
Au	79	ppb	1,5	0,66	1,6	1,3
Pb	82	ppm	17	15,2	4	11

Lit (Li) występuje między innymi w pegmatytowych złożach. Przykładem jest Greenbushes w Australii, które zawiera między 15 000 a 40 000 ppm  $\text{Li}_2\text{O}$ . Inne typy złóż, takie jak nagromadzenia hektorytowe (z typową zawartością 4000 ppm  $\text{Li}_2\text{O}$ ), są zlokalizowane np. w Kings Valley w Nevadzie, w USA, a jadarytowe w Jadar w Serbii (zawiera około 15 000 ppm  $\text{Li}_2\text{O}$ ) (tab. 5).

Metale ziem rzadkich (REE) są wydobywane z różnych typów złóż. Przykładowo, złoża karbonatytowe, takie jak Bayan Obo w Chinach, zawierają około 45 000 ppm węglanów REE. Inne złoża REE, takie jak te związane ze skałami alkalicznymi, to np. Thor Lake i Strange Lake w Kanadzie, które mają około 19 600 ppm REO (tab. 5).

Nie można też pomijać innych metali krytycznych, takich jak aluminium, tytan, wanad, chrom, kobalt, nikiel, niob, molibden, ind, tantal, wolfram, miedź, cynk, srebro, złoto i ołów. Każdy z nich ma swoje unikalne złoża i właściwości geologiczne, które wpływają na eksploatację i przyszły potencjał.

Na przykład aluminium jest głównie ekstrahowane z boksytów laterytowych, takich jak te w Weipa w Australii, z typową zawartością 240 000 ppm Al. Z kolei tytan jest głównie wydobywany z intruzji maficznych (ilmenit), jak te w Lac Tio w Kanadzie, z typową zawartością 80 000 ppm Ti (tab. 5), lub ze złóż okrucowych ilmenitu w Ukrainie w okolicach obszaru Irszańska.

Zasoby wanadu są głównie zlokalizowane w warstwowych intruzjach maficznych (magnetyt), takich jak Kompleks Bushveld w Południowej Afryce, z typową zawartością 2 000 ppm V. Natomiast zasoby chromu są znajdowane w warstwowych intruzjach maficznych (chromit), również takich jak Kompleks Bushveld, ale z typową zawartością 160 000 ppm Cr (tab. 5) lub w złożach typu podiform np. Troodos na Cyprze <sup>[45]</sup>.

Kobalt jest eksploatowany z różnych typów złóż, takich jak stratoidalne w skałach osadowych, hydrotermalne, magmowe złoża siarczkowe, lateryty oraz jeszcze nieekonomiczne głębokomorskie konkrecje manganowe. Przykłady obejmują złoża Tenke Fungurume w Demokratycznej Republice Kongo, Bou Azzer w Maroku wszystkie z typową zawartością 1 000 ppm Co (tab. 5).

Nikiel jest wydobywany głównie z magmowych złóż siarczków Ni-Cu, takich jak Jinchuan i Bajijazuizi w Chinach oraz Norylsk-Talnach, z typową zawartością 13 000 ppm Ni. Niob jest ekstrahowany z karbonatytów, takich jak Seis Lagos w Brazylii, z typową zawartością 1900 ppm Nb. Molibden jest wydobywany z porfirowych złóż molibdenu, takich jak Climax w Kolorado, USA, z typową zawartością 2 000 ppm Mo (tab. 5).

Inne metale krytyczne, takie jak ind, tantal, wolfram, miedź, cynk, srebro, złoto i ołów, są również ważnym elementem dyskusji. Każdy z nich ma swoje unikalne złoża, które różnią się pod względem typowej zawartości metalu i zasobów. Na przykład złoto jest wydobywane zarówno z hydrotermalnych złóż żyłowych, takich jak Muruntau w Uzbekistanie, jak i ze zmodyfikowanych archaicznych złóż aluwialnych, takich jak Witwatersrand Basin w Południowej Afryce (tab. 6).

Każdy z tych metali ma swoje unikalne źródła, które wpływają na ich potencjał geogeniczny. Zrozumienie tych różnic jest kluczowe dla zrównoważonego wykorzystania zasobów. Z tego powodu połączenie interdyscyplinarnych badań geologicznych, geochemicznych, ekonomicznych i środowiskowych jest niezbędne do efektywnego i zrównoważonego zarządzania zasobami tych metali krytycznych.

Tab. 5. Przykładowe typy złóż dla metali krytycznych.

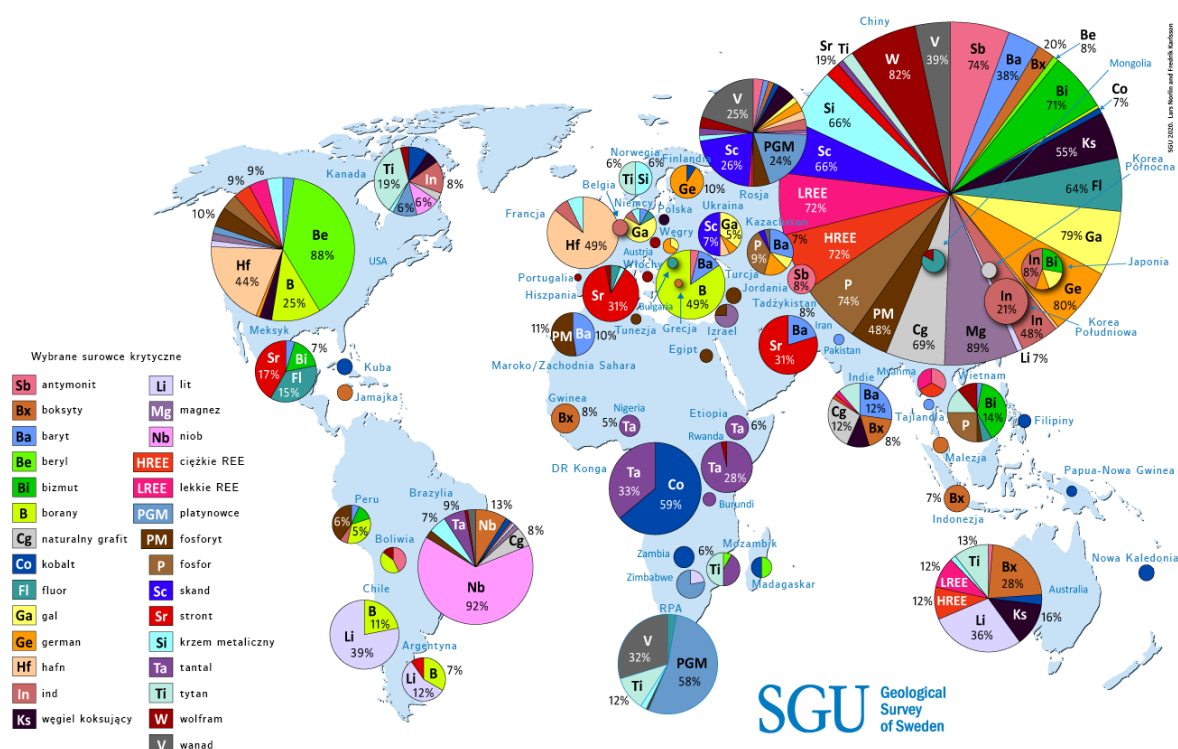
sym	przykładowe typy złóż	typowa zawartość metalu w typie złoża [ppm]	Przykład złoża	Zawartość	źródło
Li	Pegmatytowe	15000 - 40000 Li <sub>2</sub> O	Greenbushes, Australia	1.5%-4%	[46]
	Hektorytowe	4000 Li <sub>2</sub> O	Kings Vallet, Nevada, USA	0.40%	[46]
	Jadarytowe	15000 Li <sub>2</sub> O	Jadar, Serbia	1.50%	[46]
Al	Boksyty laterytowe	240 000	Weipa (Australia)	28%	[42]
Ti	Intruzje maficzne (ilmenit)	80 000	Lac Tio (Kanada)	14%	[42]
V	Warstwowe intruzje maficzne (magnetyt)	2 000	Bushveld Complex (RPA)	0.80%	[42]
Cr	Warstwowe intruzje maficzne (chromit)	160 000	Bushveld Complex (RPA)	19%	[42]
Co	Stratoidalne w skałach osadowych	1000-4000	Tenke Fungurume (DRC)	0,1-0,4%	[47]
	hydrotermalne/wulkanogeniczne	1 000	Bou Azzer (Maroko)	0,1%	[47]
	Magmowe złoża siarczkowe	1 000	Noril'sk (Rosja)	0,1%	[47]
	Lateryty	500-1500	Koniambo Massif, Nowa Kaledonia	0,05-0,15%	[47]
	Konkrety manganowe	25000	Obecnie nieekonomiczne	2,5%	[47]
Ni	Magmowe złoża siarczków Ni-Cu	13 000	Jinchuan, Bajjazuizi (Chiny)	1.10%	[42]
Nb	Karbonatyty	1 900	Seis Lagos (Brazylia)	2%	[42]
Mo	Porfirowe złoża molibdenu	2 000	Climax (Kolorado, USA)	0.22%	[42]
In	Wulkanogeniczne masywne złoża siarczkowe VMS	24	Kidd Creek (Kanada)	50 g/t	[42]
Ta	Pegmatytowe	1 800	Tanco (Kanada)	0.18%	[42]
W	Skarny, złoża żyłowe	3 300	Shizhuayan (Chiny)	0.22%	[42]
PGM	Magmowe złoża siarczków PGE-Ni-Cu	3	Bushveld Complex (RPA)	2.3 g/t	[42]
	Złoża typu Merensky	5 do 7 Pt+Pd	Merensky Reef, Bushveld complex, RPA		[48]
	Chromity	4 do 8 Pt+Pd, 0,3-0,6 Rh	UG2, RPA		[48]
	Złoża kontaktowe	1 do 4 Pt+Pd	Platreef, Bushveld Complex		[48]
	Dunity	3 do 2000	Onverwacht, Driekop i Mooihoek, Bushveld Complex		[48]
RE	Złoża związane z karbonatytami	45000 REO	Bayan Obo, Chiny	4.5% REO	[42]
E	Złoża związane ze skałami alkaicznymi	19600 REO	Thor Lake i Strange Lake, Kanada	1.96% REO	[49]
	morskie	460 Monazite	Jangardup	0.046% Monazite	[49]
	lłaste	300-350 REO	bd	0.03-0.35% REO	[49]

Tab. 6. Przykładowe typy złóż dla metali bazowych.

sym.	przykładowe typy złóż	typowa zawartość metalu w typie złoża [ppm]	Przykład złoża	Zawartość	źródło
Cu	Porfirowe złoża miedzi	5 000	El Teniente (Chile)	1.30%	[42]
	Stratoidalne w skałach osadowych	23 000	Lubin (Polska)	2%	[42]
Zn	Warstwowe złoża Pb-Zn-Ag	87 000	Broken Hill (Australia)	11%	[42]
Ag	Żyły polimetaliczne	160	Cerro Rico de Potosi (Boliwia)	116 g/t	[42]
Au	Żyły hydrotermalne	2	Muruntau (Uzbekistan)	2.4 g/t	[42]
	Zmodyfikowane archaiczne złoża aluwialne	5	Witwatersrand Basin (RPA)	5 g/t	[42]
Pb	Warstwowe Pb-Zn-Ag deposits	47 000	Broken Hill (Australia)	10%	[42]

### 2.1.3. Główni producenci surowców krytycznych

Drugim aspektem jest ryzyko przerwania dostaw, związane w szczególności z uzależnieniem od importu surowców z innych krajów lub regionów. W przypadku strategii europejskiej, ale również amerykańskiej, w ostatnich latach został położony duży nacisk na uniezależnienie od importu z Chin, które są największym lub znaczącym producentem większości z surowców krytycznych, m.in. REE, magnezu, wolframu, antymonu, galu czy germanu (rys. 12, tab. 7). Przewaga Chin na polu surowcowym jest głównym powodem tak mocnego nacisku na wzmocnienie działań w pozostałych częściach świata. Innymi przykładami są Republika Demokratyczna Kongo odpowiadająca za 59% produkcji kobaltu, Rosja i Republika Południowej Afryki – 82% produkcji platynowców, USA – 88% berylu i Brazylia – 92% niobu.



Rys. 12. Globalni producenci surowców krytycznych, przetłumaczono [50].

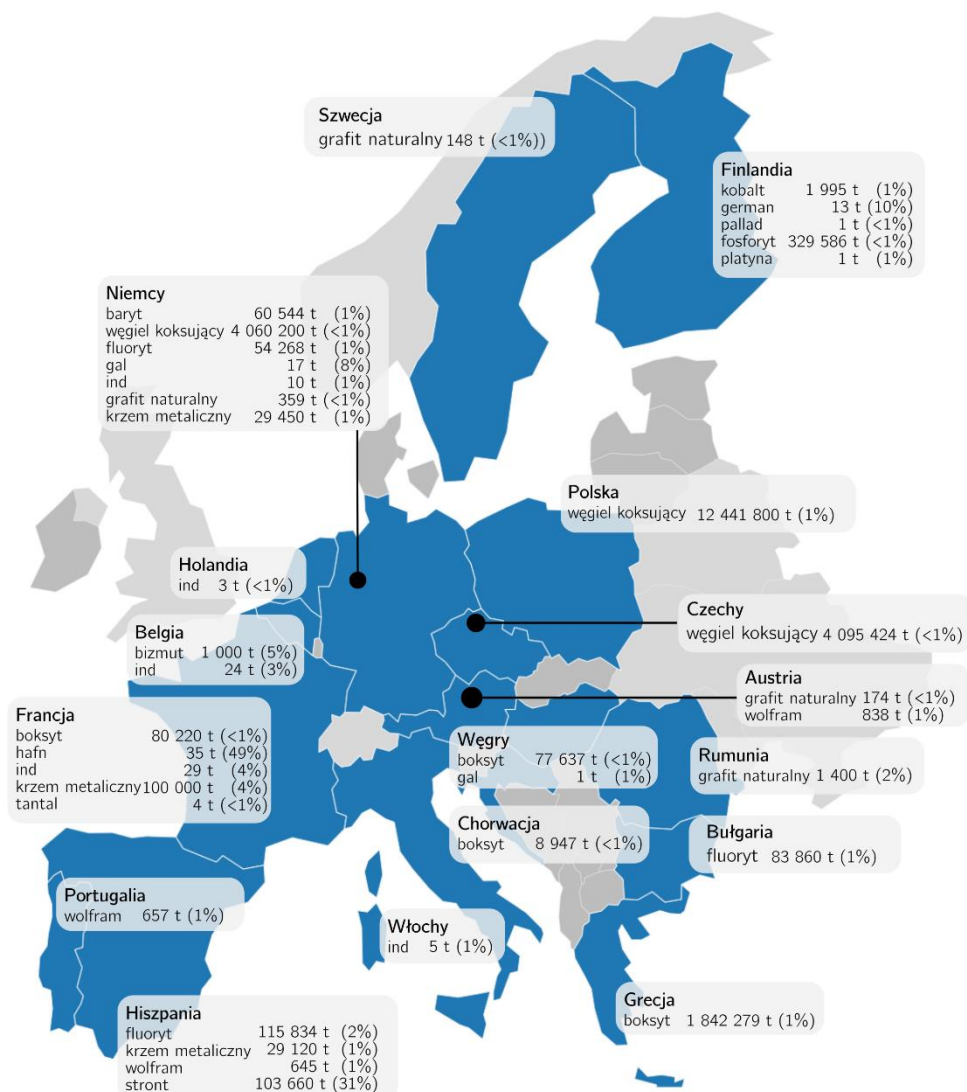
Polska jest producentem czterech surowców znajdujących się na liście krajowej (węgiel koksujący, ropa naftowa, gaz ziemny, platynowce (platyna i pallad)), dwóch surowców z aktualnej listy UE (węgiel koksujący, platynowce (platyna i pallad)), czterech surowców z listy USA (nikiel, cynk, pallad, platyna), czterech z listy kanadyjskiej (nikiel, miedź, cynk, platynowce (platyna, pallad)), dwóch z listy australijskiej (ren, platynowce (platyna i pallad)), czterech z listy japońskiej (nikiel, selen, węgiel kamienny, platynowce (platyna i pallad)), dwóch z listy Wielkiej Brytanii (platyna i pallad) oraz dwóch z listy indyjskiej (ren, platynowce). W skali globalnej jednak wielkości naszej produkcji są stosunkowo niskie. Wyjątek stanowi węgiel koksujący – polski udział to około 1% [39].

Wśród najważniejszych producentów surowców krytycznych dla UE jest Francja, wytwarzająca 49% światowego hafnu, 4% indu, <1% boksytu, 4% krzemu metalicznego, <1% tantalu; Hiszpania z 31% udziałem na rynku strontu, 2% fluorytu, 1% wolframu i 1% krzemu metalicznego; Finlandia wytwarzająca 10% germanu, 1% kobaltu, <1% palladu, <1% fosforytu, 1% platyny; Belgia wytwarzająca 5% bizmutu i 3% indu; Niemcy produkujące 8% galu, 1% indu, 1% fluorytu, <1% węgla koksującego, 1% barytu, <1% naturalnego grafitu, 1% indu (rys. 13). Wśród mniej



znaczących producentów, poza Polską, wymienia się Holandię (1% globalnej produkcji indu), Czechy (<1% węgla koksującego), Szwecję (<1% naturalnego grafitu), Portugalię (1% wolframu), Włochy (1% indu), Austrię (<1% naturalnego grafitu, 1% wolframu), Węgry (<1% boksytu, 1% galu), Bułgarię (1% fluorytu) i Grecję (1% boksytu) [24] (rys. 13).

Wśród analizowanych pierwiastków jest również nikiel, którego ważniejszym producentem jest Finlandia (1,7% globalnej produkcji). Na uwagę zasługuje również Ukraina, która wytwarza 3,6% manganu i 6,4% TiO<sub>2</sub> i 1% grafitu [39].



Rys. 13. Producenci surowców krytycznych w Europie, opracowanie własne na podstawie [24].

Sytuacja surowcowa Europy jest dynamiczna. Zwiększone starania w dążeniu do niezależności znajdują swoje odzwierciedlenie w nowych projektach geologiczno-górnictwowych, jak i w odkryciach, które są szeroko omawiane w mediach publicznych. Do takich przykładów należy ogłoszenie w roku 2022 planów rozpoczęcia produkcji litu w kopalni kaolinu Beauvoir (Francja) [51]. Projekt Emili zakłada produkcję 34 000 t LiOH, H<sub>2</sub>O rocznie [52]. Innym przykładem jest doniesienie z roku 2023 o odkryciu na terenie arktycznej Szwecji największego złoża pierwiastków ziem rzadkich w Europie [53]. Firma LKAB ogłosiła odkrycie na obszarze Kiruny zasobów metali ziemi rzadkich w postaci tlenków na poziomie miliona ton [54]. Tego typu informacje pozwalają mieć nadzieję na uzyskanie niezależności Europy od importowanych surowców krytycznych. Adekwatne jest jednak zachowanie pewnego poziomu sceptycyzmu, ponieważ proces od ogłoszenia odkrycia do produkcji jest czasochłonny. Przykładem jest głośne doniesienie z Turcji z roku 2022. Ogłoszono odkrycie

drugiego największego złoża pierwiastków ziem rzadkich, które miałyby wystarczyć na 1000 lat. Informacje te zostały poddane w późniejszym czasie krytyce ze względu na brak transparentności w odniesieniu do jakości i zawartości składników użytecznych w rudzie. Wobec tego, poddano ogłoszone estymacje pod wątpliwość i wskazano, że tureckie złoża mogą stanowić mniej niż 33% zasobów chińskich [55].

Tab. 7. Globalni producenci metali krytycznych na rok 2020, opracowanie własne

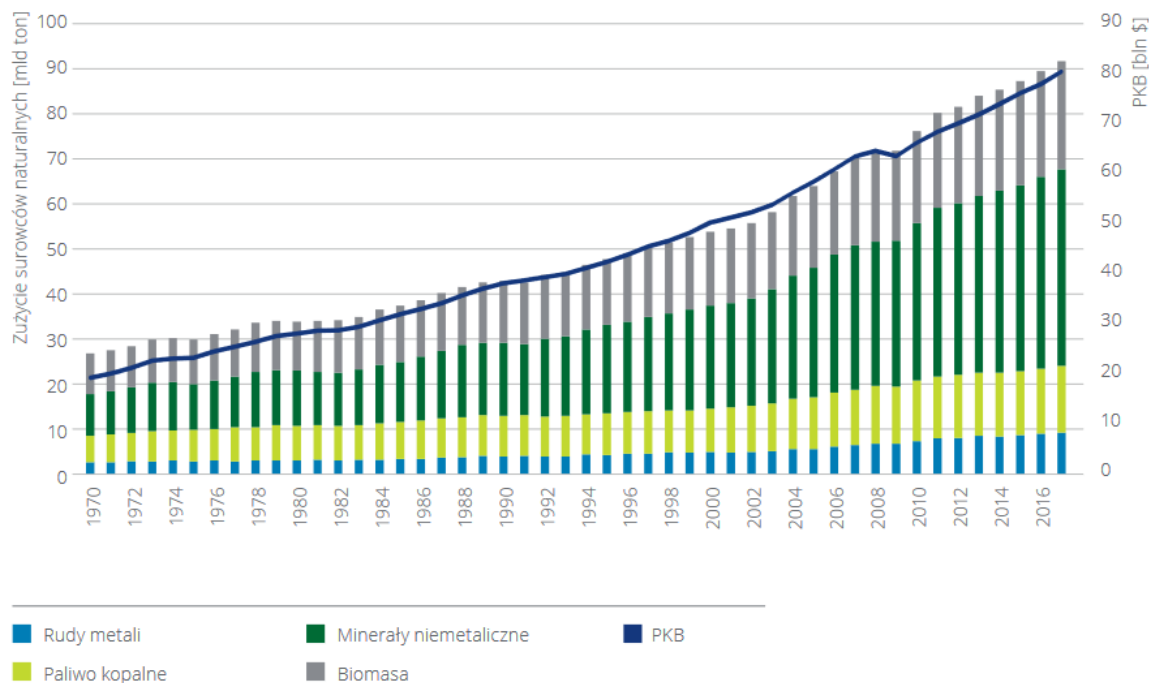
Sym.	Prod. 1	Prod. 2	Prod. 3	Prod. 4	Prod. 5	Prod. 6	Prod. 7	Prod. 8	Prod.9	Prod. 10
Li <sup>1</sup>	Australia 47,60%	Chile 26,8%	Chiny 15,5%	Argentyna 6,8%	Brazylia 2%					
Al <sup>1</sup>	Australia 27,3%	Gwinea 23,2%	Chiny 18,5%	Brazylia 8,7%	Indonezja 6,8%	Indie 5,4%	Jamajka 2%	Rosja 1,8%	Arabia Saudyjska 1,4%	Kazachstan 1,1%
Ti <sup>1</sup>	Chiny 34,6%	RPA 11,3%	Mozambik 10,4%	Australia 9,9%	Ukraina 6,4%	Kanada 5,7%	Senegal 3,5%	Kenia 3%	Norwegia 2,7%	Madagaskar 2,6%
V <sup>1</sup>	Chiny 66,1%	Rosja 18,5%	RPA 8,1%	Brazylia 7,2%						
Cr <sup>1</sup>	RPA 45,5%	Kazachstan 16,5%	Indie 11,2%	Turcja 9,1%	Zimbabwe 4,8%	Finlandia 4%	Brazylia 1,9%	Albania 1,8%	Rosja 1,6%	Oman 1,3%
Mn <sup>1</sup>	RPA 31%	Gabon 19,2%	Australia 17,4%	Chiny 6,3%	Indie 4,4%	Ghana 4,3%	Ukraina 3,6%	Wybrzeże Kości Słoniowej 2,8%	Brazylia 2,6%	Malezja 1,9%
Co <sup>1</sup>	DR Kongo 67,1%	Rosja 7,5%	Australia 4,4%	Kuba 33%	Kanada 2,9%	Filipiny 2,8%	Papua Nowa Gwinea 2,3%	Maroko 1,9%	Chiny 1,7%	Nowa Kaledonia 1,7%
Ni <sup>1</sup>	Indonezja 32,8%	Filipiny 13,2%	Rosja 9,4%	Nowa Kaledonia 8%	Australia 6,8%	Kanada 6,7%	Chiny 4,2%	Brazylia 3,1%	Gwatemala 2%	Kuba 1,9%
Ga <sup>1</sup>	Chiny 95,4%	Rosja 1,6%	Ukraina 1,3%	Japonia 1%						
Ge <sup>1</sup>	Chiny 89,6%	Rosja 5,2%	Japonia 2,1%	USA 2,1%	Ukraina 1%					
Nb <sup>1</sup>	Brazylia 91,5%	Kanada 6,8%								
Mo <sup>1</sup>	Chiny 33,8%	Chile 20,9%	USA 18%	Peru 11,3%	Meksyk 7,3%	Armenia 4,2%	Iran 1,2%	Mongolia 1%		
Sb <sup>1</sup>	Chiny 47,7%	Tadżykistan 25%	Rosja 13,7%	Mjanma 5,2%	Australia 3,1%	Boliwia 2,1%	Turcja 2%			
W <sup>1</sup>	Chiny 81,7%	Wietnam 9,2%	Rosja 2,6%	Boliwia 1,5%	Rwanda 1,2%	Austria 1%				
PGM <sup>2</sup>	RPA 52,3%	Rosja 27,4%	Zimbabwe 7,2%	Kanada 7,1%	USA 4,4%					
REE <sup>1</sup>	Chiny 62,1%	USA 17,3%	Mjanma 9,3%	Australia 8,6%	Rosja 12%					

Tabelę opracowano w oparciu o dane na rok 2020 dostępne w bazie <sup>1</sup>World Mining Data [39] oraz <sup>2</sup>BGS. Wybrano dziesięciu największych producentów, dla których udział w globalnej produkcji wyniósł co najmniej 1%. Dodatkowe informacje dla poszczególnych pierwiastków: Li – Li<sub>2</sub>O, Be – koncentrat, Al – boksyt, Ti – TiO<sub>2</sub>, Cr – Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nb – Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Ta – Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, REE – REO. Sr – minerały strontu [39].

## 2.2. Globalne wyzwania branży surowcowej

Zużycie zasobów naturalnych istotnie wzrosło w ostatnich dekadach ze względu na globalne zwiększenie populacji, rozwój ekonomiczny i technologiczny oraz zmiany w schematach ich

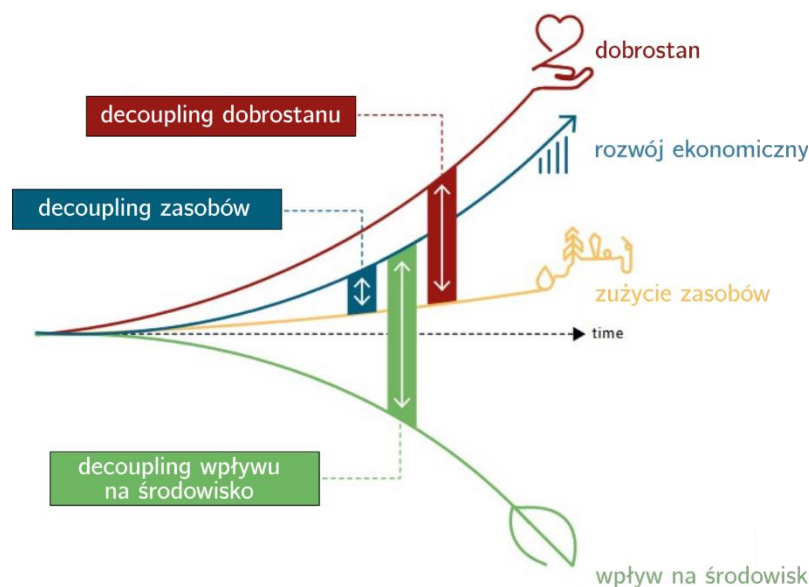
zużywania. Sytuacja ta spowodowała dyskusję o możliwości dalszego rozwoju w takim tempie przy jednoczesnym zużyciu zasobów naturalnych. Jednym z ważniejszych ustaleń była publikacja *Granice Wzrostu Klubu Rzymskiego* (1972) [56], w której podniesiono kwestię ograniczonych zasobów naturalnych, czy też ryzyka przeludnienia. Bliższym współczesności ustaleniem było Porozumienie Paryskie Organizacji Narodów Zjednoczonych (2015) [57,58]. Mimo tych doniesień i przyjętych ustaleń, wciąż nie widać ograniczenia w zużyciu zasobów naturalnych (rys. 14).



Rys. 14. Globalne zużycie surowców naturalnych i produkt krajowy brutto w okresie 1970-2017 [59]

W celu przeciwdziałania temu wyzwaniu została wypracowana koncepcja zamknięta w terminie „decoupling”. Występuje on, kiedy zużycie zasobów naturalnych lub presja na środowisko lub ludzki dobrostan rośnie wolniej niż działalność je powodująca (decoupling względny ang. relative decoupling) lub spada (jest całkowicie oddzielone), podczas gdy rozwój ekonomiczny wciąż rośnie (decoupling bezwzględny/całkowity ang. absolute decoupling). Termin ten został zaproponowany przez Organizację Współpracy Gospodarczej i Rozwoju (OECD) w roku 2001 oraz International Resource Panel (IRP) przy Organizacji Narodów Zjednoczonych (ONZ) w roku 2011 i 2014 jako drogowskaz dla decydentów [19, 20, 22]. Używany jest podział na:

- 1) decoupling podwójny (double decoupling) występuje, kiedy rozwój ekonomiczny jest oddzielony od zużycia zasobów, a zużycie zasobów jest oddzielone od wpływu na środowisko;
- 2) decoupling wpływu na środowisko (ang. impact decoupling) występuje, kiedy wynik ekonomiczny i/lub zużycie surowców oddzielone jest od negatywnego wpływu na środowisko;
- 3) decoupling zasobów (ang. resource decoupling) oznacza rozdział zużycia zasobów od wzrostu ekonomicznego;
- 4) decoupling dobrostanu (ang. well-being decoupling) oznacza rozdział zużycia zasobów od dobrostanu (rys. 15) [23, 24].

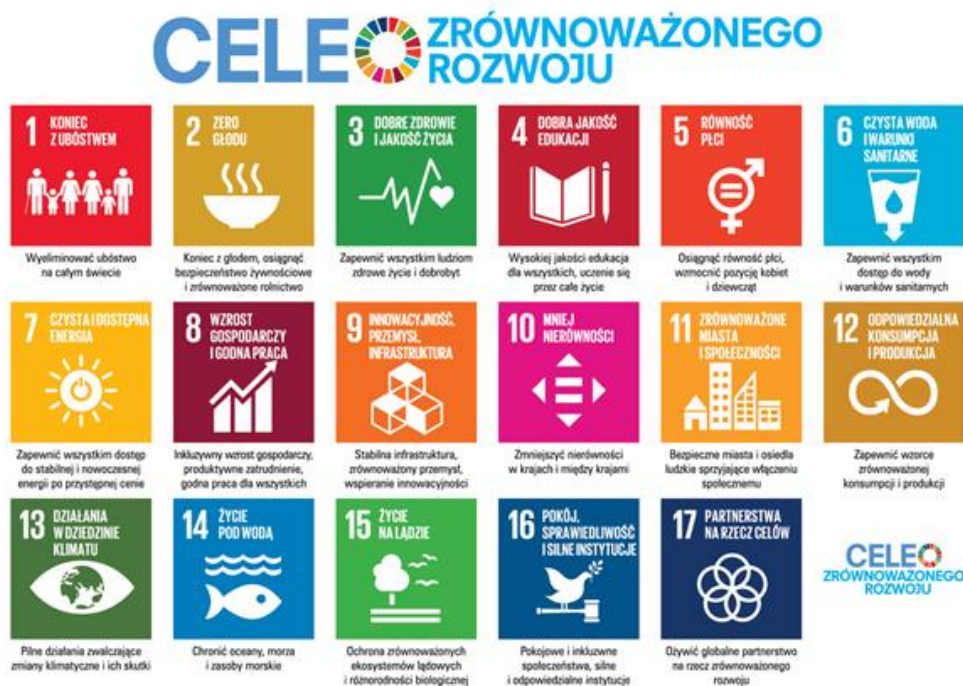


Rys. 15. Koncepcja decouplingu, tłumaczenie z [62].

Należy zauważyć, że mimo przyjęcia decouplingu w głównej agendzie ONZ, sama jej idea krytykowana jest medialnie i naukowo. Naukowiec Vaclav Smil poddał ją pod wątpliwość, mówiąc, że fakty historyczne pokazują, że nie ma szans na rozdzielenie wzrostu ekonomicznego oraz zużycia surowców. Wobec tego jedyną możliwością na uzyskanie równowagi jest zmniejszenie oczekiwań w stosunku do rozwoju ekonomicznego [63]. Krytyczne poglądy pojawiają się w artykułach naukowych. Fletcher i Rammelt (2017) wskazują, że decoupling jest oparty na bardzo wątpliwych założeniach i wykorzystanie go do stworzenia agendy nadającej kierunek światu może mieć negatywne skutki [64]. Również meta-analiza oparta na 179 artykułach naukowych opublikowanych między 1990 a 2019 wskazuje, że wciąż nie jest obserwowany zarówno decoupling zasobów, jak i decoupling wpływu na środowisko. Jedynym odnotowanym zjawiskiem jest oddzielenie emisji CO<sub>2</sub> od wzrostu ekonomicznego [65].

Decoupling jest kierunkiem wskazywanym współczesnemu społeczeństwu przez największe i najbardziej renomowane organizacje. Jest on określany jako szansa utrzymania dobrostanu ludzkiego. Niestety dotychczas podjęte starania nie są wystarczające, aby jednoznacznie potwierdzić szansę na osiągnięcie rozdziału między wzrostem ekonomicznym a zużyciem surowców oraz wzrostem ekonomicznym a wpływem na środowisko. Natomiast optymistyczne są rezultaty globalnych starań o ograniczenia emisji CO<sub>2</sub>, które zauważalnie rozdzielają emisje tego gazu od ludzkiego dobrostanu.

Opisywana koncepcja decouplingu jest kluczowym czynnikiem umożliwiającym pełny rozkwit Celów Zrównoważonego rozwoju 2030 (ang. Sustainable Development Goals – SDGs) [58]. Jest to plan działania na rzecz przemian i przeobrażeń świata, w którym potrzeby obecnego pokolenia mogą być zaspokojone w sposób zrównoważony, z szacunkiem dla środowiska oraz z uwzględnieniem potrzeb przyszłych pokoleń [66,67]. Dokument ten został zatwierdzony w dniach 25-27 września 2015 roku w Nowym Jorku poprzez przyjęcie przez kraje ONZ deklaracji „Przekształcania naszego świata: Agenda na Rzecz Zrównoważonego Rozwoju – 2030”. W ramach tego planu wyznaczono 17 Celów Zrównoważonego Rozwoju i związanych z nimi 169 działań skupionych wokół 5 obszarów: ludzie, planeta, dobrobyt, pokój i partnerstwo (rys. 16). Cele mają być osiągnięte przez rządy państw, organizacje międzynarodowe i pozarządowe, sektor biznesu i naukę oraz obywateli.



Rys. 16. Cele zrównoważonego rozwoju [66].

Jednym z ważnych narzędzi do realizacji SGDów jest gospodarka o obiegu zamkniętym (ang. Circular Economy). Jej głównym założeniem jest utrzymywanie materiałów i produktów w obiegu tak długo, jak to możliwe [68]. Jest to opozycja do modelu linearnego, gdzie następują kolejne procesy: wydobycie, przetworzenie, wykorzystanie, składowanie. GOZ to systemowe podejście, które obejmuje procesy przemysłowe oraz działalność gospodarczą i prowadzi do nacisku na trzy główne elementy: redukcję materiałów do wytworzenia produktu, ponowne wykorzystanie produktu oraz recykling [68]. Strategia ta bardzo szybko zyskała na popularności i obecnie staje się standardem na poziomie biznesowym. GOZ jest formalnie umocowane zarówno w legislacjach europejskich [69], jak i w krajowych [70]. W ramach polskich strategii w roku 2019 przyjęto dokument „Mapa Drogowa Transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym”. Wskazuje on na konieczność działań horyzontalnych, które dotyczą największego wycinka życia społeczno-gospodarczego. Ponadto przedstawia priorytetyzację tych obszarów, których rozwój umożliwi wykorzystanie szans stojących przed Polską i jednocześnie stanowi odpowiedź na istniejące lub spodziewane zagrożenia [70]. Alarmujące jest, że globalne zużycie zasobów (minerałów, rud, paliw kopalnych, biomasy) przekroczyło 100 miliardów ton w roku 2020, a jedynie 8,6 miliarda zostało ponownie wykorzystane [71].

Realizacja zagadnień gospodarki o obiegu zamkniętym wymaga prześledzenia całej drogi surowców, co sprowadza się do analizy cyklu życia (ang. Life-Cycle Assessment). Takie ujęcie problemu pozwala na detekcję procesów, w których dochodzi do wytworzenia odpadów. W przypadku planowanych przedsięwzięć odpowiednie podejście pozwoli uniknąć śmiecia oraz emisji na każdym etapie.

### 2.3. Metale krytyczne w geosferze – metody poszukiwania i rozpoznawania

Na poziomie krajowym Prawo geologiczne i górnicze definiuje złoża kopaliny jako naturalne nagromadzenie minerałów i skał oraz innych substancji stałych, gazowych i ciekłych, których wydobywanie może przynieść korzyść gospodarczą. Wykonywanie prac geologicznych w celu

ustalenia i wstępnego udokumentowania złoża kopaliny nazywane jest poszukiwaniem. Natomiast wykonywanie prac geologicznych na obszarze wstępnie udokumentowanego złoża kopaliny jest rozpoznawaniem [72].

Wobec tego a poszukiwanie oraz rozpoznawanie składają się prace, których głównym celem jest poszerzenie informacji geologicznej oraz dokumentowanie złoża. W celu pozyskania informacji geologicznej konieczne jest przyjęcie metodyki, na którą mogą składać się różnorodne metody badawcze. W Polsce najaktualniejszym i najbardziej kompleksowym opracowaniem jest *Metodyka dokumentowania złóż kopalni stałych* (2014) [73–76]. Poprzednim istotnym opracowaniem była *Geologia kopalniana* (1990) [77].

Na poziomie międzynarodowym zostały wypracowane standardy, pozwalające na wykorzystywanie przejrzystej ścieżki pozyskiwania i przedstawienia informacji. Jest to w szczególności system JORC Code [78].

Wśród współcześnie najszerzej wykorzystywanych poszukiwania i rozpoznawania złóż są wiercenia, geofizyka otworowa i powierzchniowa (tab. 8). Obecnie rzadziej wykonuje się prace górnicze w celu pozyskania informacji, choć w przypadku złóż bliskich powierzchni lub o anomaliami możliwych do detekcji na powierzchni (porfirowe złoża miedzi) wciąż wykorzystywane są chociażby rowy/szurfy. Dlatego typu złóż również coraz istotniejsze stają się metody pośrednie – teledetekcyjne jak np. multi- i hiperspektralne analizy przesłanek powierzchniowych przy wykorzystaniu sensorów na satelitach, samolotach i dronach (tab. 8).

Tab. 8. Ewolucja metod poszukiwawczo-rozpoznawczych oraz sposobów prezentacji informacji geologicznej, uzupełniona wersja tabeli przedstawionej w artykule [79]

Rodzaj prac		1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010	2020	
poziyskiwanie danych	kartowanie geologiczne na powierzchni									
	prace górnicze	szybiki*								
		rowy*								
		sztolnie*								
	wiercenia									
	geofizyka	otworowa								
		powierzchniowa								
	teledetekcja	satelitarna								
		lotnicza								
		bezzałogowe Statki Powietrzne								
prezentacja informacji geologicznej	mapy i przekroje 2D, interpretacja bezpośrednia									
	diagramy blokowe 3D, interpretacja bezpośrednia									
	proste metody obliczania zasobów									
	metody statystyczne									
	metody geostatystyczne									
	komputeryzacja prezentacji map i przekrojów 2D									
	komputeryzacja prezentacji blokowych modeli złóż 3D									
dynamiczne modelowanie geologiczne złoża										

## 2.4. Metale krytyczne w antroposferze – metody poszukiwania i rozpoznawania

Ostatnie lata przyniosły zainteresowanie pozyskiwaniem surowców ze źródeł alternatywnych, do których należą odpady górnicze i przerobcze oraz żużle [80]. Wiele państw prowadziło i prowadzi prace inwentaryzacyjne występujących na ich obszarach składowisk odpadów wydobywczycych. Działania podyktowane nie były potrzebami surowcowymi, ale względami ochrony zdrowia ludzi i środowiska. W Unii Europejskiej kierunek ten został podyktowany dyrektywą 2006/21/EC [81], a w szczególności art. 20 mającym brzmienie:

Państwa Członkowskie zapewniają, aby spis zamkniętych obiektów unieszkodliwiania odpadów, włącznie z opuszczonymi obiektami unieszkodliwiania odpadów, zlokalizowanych na ich terytorium, które wywierają poważny negatywny wpływ na środowisko lub mogą stać się w średnio- lub krótkoterminowej perspektywie poważnym zagrożeniem dla zdrowia ludzkiego lub środowiska był sporządzany i okresowo uaktualniany. Taki spis, który zostanie udostępniony

społeczeństwu, zostanie sporządzony do dnia 1 maja 2012 r., z uwzględnieniem metodologii, o których mowa w art. 21, jeżeli są one dostępne. W celu jego spełnienia przygotowany został protokół<sup>[82]</sup>.

Wiele krajów prowadziło prace inwentaryzacyjne jeszcze przed ustaleniami na poziomie Unii Europejskiej, jednak od czasu wprowadzenia dyrektywy widoczne jest zwiększenie systematyki w metodologiach pozyskiwania danych o obiektach unieszkodliwiania odpadów i idącej za tym harmonizacji zbiorów danych o nich w krajach członkowskich. Stan prac w poszczególnych krajach wygląda następująco:

1) Węgry – inwentaryzacja obiektów prowadzona była w latach 80. Do roku 1987 udokumentowano wszystkie obiekty, a ważniejsze z nich poddano opróbowaniu i analizom (skład ziarnowy, analizy chemiczne, parametry fizyczne), ilość odpadów jest od tego czasu publikowana w rocznych raportach surowcowych. Współcześnie wykonano również prace nad stworzeniem bazy danych odpadów w oparciu o zdjęcia lotnicze (Google Earth), prace terenowe, mapy topograficzne 1:10000 oraz dane zgromadzone we wcześniejszych projektach. Baza nie jest dostępna publicznie <sup>[83]</sup>.

2) Irlandia – W latach 2007-2009 przeprowadzono inwentaryzację obszarów dawnej działalności górniczej w Irlandii. Wykonano zwiady terenowe, opróbowano poszczególne miejsca, wykonano analizy, między innymi na obecność metali ciężkich. Każdy z obiektów zmierzono, dokonano obliczeń, obserwacji lub oszacowania: powierzchni, ilości ( $m^3$ ), składu chemicznego, odcieków (tak/nie), analiz odcieków (w przypadku wystąpienia), ilości odcieków <sup>[83]</sup>. Wyniki prac są opublikowane na oficjalnej stronie Environmental Protection Agency<sup>[84]</sup>.

3) Norwegia – W Norwegii nie stworzono inwentarza danych geoprzestrzennych obiektów pogórnich oraz hałd i osadników. Nie były prowadzone systematyczne prace inwentaryzacyjne. Dostępne informacje są fragmentaryczne, nieustandaryzowane i nie zawierają informacji o składzie odpadów. Do bazy ProSUM zostało dodanych 137 obiektów przekraczających 1000  $m^3$  objętości. Prace dotyczące zanieczyszczonych obszarów (pobór prób i analizy geochemiczne) zostały przeprowadzone przez Norweską Służbę Geologiczną (ang. The Geological Survey of Norway). Norweska Agencja Środowiska (ang. The Norwegian Environment Agency) zbiera roczne dane dotyczące emisji zanieczyszczeń ze składowisk odpadów komunalnych i wydobywczych <sup>[83,85]</sup>.

4) Słowenia – W odpowiedzi na wymagania dyrektywy 2006/EC/21 wykonano inwentaryzację zamkniętych obiektów składowania odpadów z górnictwa i innej działalności wydobywczej. Dane zostały zebrane i upublicznione w postaci czterech raportów. Pierwszy z nich zawierał informacje o zamkniętych i opuszczonych kopalniach, które wytwarzały odpady w przeszłości. Każdy z obiektów opisano, podając: nazwę, lokalizację, współrzędne geograficzne, typ kopaliny, status (zamknięta, opuszczona, zrehabilitowana), ilość uzyskanych ze złoża surowców (metale, węgiel, minerały) i literaturę. Dla wszystkich obiektów, poza odkrywkowymi kopalniami surowców niemetalicznych, uwzględniono informacje o: stratygrafii, litologii, historii, geologii, opis techniczny, dane hydrogeologiczne i inżynierskie, potencjał i prospekty.

W drugim raporcie przedstawiono informacje o odpadach pochodzących z obiektów wymienionych w pierwszym zestawieniu, takie jak: nazwę, obszar rudny, lokalizację, współrzędne geograficzne, wartościowe surowce, powierzchnię, objętość, typ odpadów, skład skał, substancje zanieczyszczające, dodatkowe uwagi, status rekultywacji i literaturę.

W trzecim raporcie uwzględniono informacje o wpływie na środowisko 61 obiektów wybranych z poprzedniego raportu. Kierowano się ich potencjalnym negatywnym wpływem na środowisko lub zdrowie ludzkie w krótkim lub średnim terminie. Zawarto informacje, takie jak stabilność i ocena geomechaniczna (koncentracje 53 pierwiastków w kwasie królewskim, skład chemiczny i mineralogiczny cząstek zawierających metale) osadów z odcieków. Dla

8 największych obiektów sporządzono charakterystykę geochemiczną wraz z dodatkowymi danymi dotyczącymi stężeń metali w roztworach wodnych pobranych z próbek odpadów górniczych, mierzonych zgodnie z normą EN 12457-4:2002 [83,86]. Ostatni raport zawierał dane dotyczące monitoringu obiektów z raportu trzeciego i ocenę ich potencjalnego wpływu na środowisko. Pierwsze dwa dokumenty dostępne są jedynie na życzenie i za zgodą Ministerstwa Środowiska. Dwa pozostałe udostępniono publicznie. Zebrane w bazie danych informacje nie są ogólnodostępne [83,86–88].

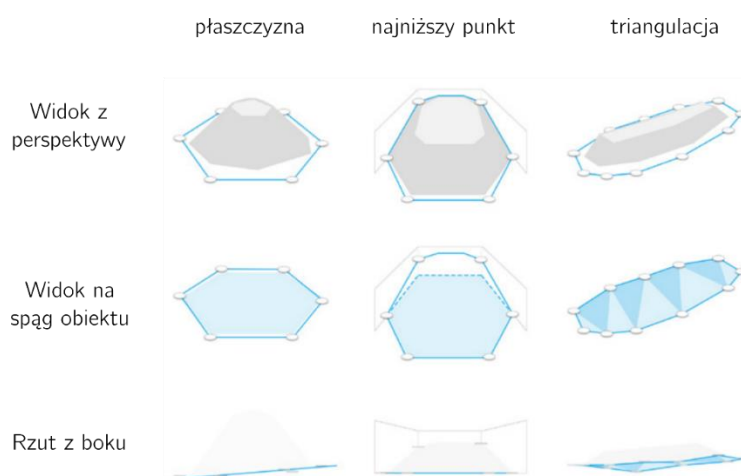
Pomiędzy dokumentowaniem potencjalnych zasobów antropogenicznych i geogenicznych wskazywane są poniżej wymienione różnice:

- zasoby antropogeniczne: pewność danych odnośnie do objętości, jednoznaczna własność, nieograniczona technicznie dostępność, możliwość wznawiania i przerywania zagospodarowania, dostępność do badań technologicznych w skali półtechnicznej, możliwość oceny efektu skali procesów przeróbki, większe zróżnicowanie chemiczne w wyniku działania procesów wietrzenia, tańsze dokumentowanie, większa elastyczność w podejmowaniu prac dokumentacyjnych i przetwórczych (wydobywczych).
- zasoby geogeniczne: niepewność danych i sposobu interpretacji, punktowe dane do interpolacji, duża zmienność parametrów złożowych, wyższe koszty dokumentowania, mniejsza elastyczność działania [89].

Mimo różnic przemawiających na korzyść badania zasobów antropogenicznych, wciąż wiele zagadnień z nimi związanych pozostaje nierozwiązanym wyzwaniem. Jest to między innymi bardzo zróżnicowana własność obiektów pogórniczych, w szczególności tych będących wynikiem historycznego górnictwa [90].

Kolejnym istotnym zagadnieniem jest kwestia obliczenia objętości obiektów, ale w sposób systematyczny i możliwie zbliżający szacunkową objętość/masę do tej rzeczywistej. W praktyce do pomiarów wykorzystywane są proste metody geodezyjne (m.in. niwelacja siatkowa, profilów, punktów rozproszonych, pomiar tachymetryczny), metody geofizyczne (elektrooporowa, georadar [91]) wykorzystanie pomiarów LiDAR lub na podstawie danych z nalotów fotogrametrycznych. Przewagą dwóch ostatnich wymienionych metod jest możliwość uzyskania wyników stosunkowo szybko, dla dużej liczby obiektów oraz przy niskich kosztach.

W przypadku obliczania objętości metodami wykorzystującymi dane LiDAR oraz chmury punktów będących wynikiem nalotów fotogrametrycznych niezbędne jest przyjęcie założeń dla obliczania dolnej powierzchni hałd. Wśród komercyjnie wykorzystywanych i najpopularniejszych są metody cięcia podstawy hałdy płaską płaszczyzną, cięcia płaską płaszczyzną w najniższym punkcie hałdy oraz triangulacji po konturze (rys. 17) [92].



Rys. 17. Sposoby interpolacji spągu obiektów (hałd), przetłumaczono [92].



Każda z tych metod ma swoje przeznaczenie, a idealną sytuacją jest założenie istnienia płaskiej powierzchni pod obiektem oraz brak nachylenia terenu, na którym jest zdeponowana [92]. Metody te mają swoją ograniczoną użyteczność ze względu na bardzo zróżnicowane lokalizacje hałd i osadników górniczych. Problem ten stał się jednym z ważnych wyzwań poruszanych w rozprawie doktorskiej, nad którym prace prowadziłem wraz z zespołem od roku 2020 [93]. Jego istotność oraz podejście zostało potwierdzone przez zespół badawczy z Niemiec, który przygotował publikację dotyczącą eksploracji i przeróbki odpadów pogórnich, poflotacyjnych i pohutniczych [91].

## 2.6. Wykorzystanie i ceny metali krytycznych

Analizowana lista surowców krytycznych odzwierciedla różnorodny zestaw towarów kluczowych dla wielu sektorów, w tym elektroniki, telekomunikacji, metalurgii, lotnictwa, obronności i przemysłu farmaceutycznego. Pierwiastki te odgrywają istotną rolę w zrównoważonej, konkurencyjnej i cyfrowej gospodarce. Różnorodność występuje również w kwestii dostępności oraz cen tych metali na rynkach i giełdach. Zrozumienie procesów nimi rządzących pozwala na rzetelne spojrzenie na kwestię pozyskiwania metali krytycznych (tab. 9).

Lit to srebrzysto-biały do szarego metal alkaliczny. Posiada najmniejszą gęstość wśród metali ( $0,53 \text{ cm}^3$ ) oraz najmniejszą gęstość jako ciało stałe w temperaturze pokojowej. Ma również doskonałą przewodność elektryczną i najwyższy potencjał elektrochemiczny wśród metali [24]. Odgrywa kluczową rolę w produkcji urządzeń do magazynowania energii (baterie litowe). Dodatkowo jest używany w produkcji szkła i ceramiki żaroodpornej. Co więcej, wykorzystywany jest też w procesach metalurgicznych stali i aluminium, optymalizując ich właściwości dla przemysłu [25,94]. Sprzedawany jest głównie w postaci węglanu litu ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ), ale również jako koncentrat spodumenu. Jest notowany głównie na giełdzie Fastmarkets. Ceny węglanu litu w roku 2022<sup>1</sup> utrzymywały się średnio na poziomie około 68 000 US\$/t [95].

Aluminium jest lekkim, srebrzistoszarym metalem, dobrym przewodnikiem ciepła oraz elektryczności. Doskonała plastyczność i niska temperatura topnienia ( $660^\circ\text{C}$ ) sprawiają, że metal ten znajduje wiele zastosowań. Dodatkowo posiada zdolność do tworzenia stopów, jest odporny na korozję, ma bardzo dobry stosunek wytrzymałości do masy oraz łatwo poddaje się recyklingowi [24]. Jego właściwości czynią go preferowanym wyborem w wielu zastosowaniach przemysłowych, m.in. w transporcie (samoloty, pojazdy, pociągi, statki), budownictwie (okna, drzwi), wysokiej technologicznie inżynierii (elektryczne linie przesyłowe, drabiny, tłoki), także w produktach domowych [41, 52]. Jest on metalem notowanym na Londyńskiej Giełdzie Metali (ang. LME – London Metal Exchange), a jego ceny w roku 2022 sięgały około 2706 US\$/t [95].

Tytan jest znany ze swojego wyjątkowego stosunku wytrzymałości do wagi i odporności na korozję. Jest szeroko stosowany w przemyśle lotniczym, obronnym i kosmicznym. Co więcej ma ważne zastosowania medyczne. Ze względu na swoją biokompatybilność jest używany w urządzeniach medycznych, takich jak endoprotezy stawów i implanty stomatologiczne. Stosuje się go również w kosmetykach [41, 52]. Sprzedawany jest jako stop żelazowo-tytanowy (giełda ferroalloynet), koncentraty ilmenitu lub rutylu, a także tlenek (Fastmarkets). Jego cena waha się w zależności od rodzaju produktu. Najwyższą osiąga stop żelazowo-tytanowy o zawartości 70% Ti, który w roku 2022 kosztował niemal 12 000 US\$/t [95].

Wanad to stalowoszary, kowalny, odporny na korozję metal. Jest wykorzystywany w produkcji stali wysokowytrzymałej, niskostopowej. Znajduje zastosowanie w przemyśle lotniczym, kosmicznym i w reaktorach jądrowych (ze względu na właściwości pochłaniania neutronów). Służy także jako katalizator chemiczny w procesach przemysłowych [41, 52]. Jest notowany na giełdzie

---

<sup>1</sup> Cena za okres styczeń 2022 – grudzień 2022 [95]

ferroalloynet w postaci stopu żelazowo-wanadowego, a jego cena w roku 2022 wyniosła około 39 000 US\$/t <sup>[95]</sup>.

Chrom jest kluczowym składnikiem w produkcji stali nierdzewnej i żaroodpornej, nadając materiałowi jego charakterystyczną odporność na korozję. Unikalne właściwości tego metalu czynią go niezastąpionym w ich produkcji [41, 52]. Jest on notowany na giełdzie szanghajskiej (SMM), a ceny w roku 2022 wynosiły około 11 000 US\$/t produktu o czystości  $\geq 99,2\%$  Cr <sup>[95]</sup>.

Mangan odgrywa ważną rolę w przemyśle, poprawiając wytrzymałość i twardość stali, a także jej odporność na ścieranie. Stanowi również część różnych stopów żelaza, zmieniając ich właściwości i zwiększając wachlarz różnorodnych zastosowań [41, 52]. Metal ten jest notowany na giełdzie szanghajskiej oraz ferroalloynet. Sprzedawany jest w formie elektrolitycznej o czystości  $\geq 99,7\%$  lub stopu żelazowo-manganowego (75% Mn). Ceny pierwszego wymienionego produktu wyniosły w roku 2022 około 3 200 US\$/t <sup>[95]</sup>.

Kolejnym istotnym w rozprawie doktorskiej metalem jest kobalt. Wyróżniają go twardość i ferromagnetyczność utrzymywane w wysokich temperaturach, wysoka temperatura topnienia oraz zdolność do tworzenia stopów <sup>[24]</sup>. Wykorzystywany jest w produkcji nadstopów, katalizatorów i magnezów, jednak jego znaczenie wzrosło ze względu na istotność przy produkcji baterii [41, 52]. Jest notowany na giełdzie szanghajskiej oraz londyńskiej, a jego ceny wyniosły w roku 2022 niemal 64 000 US\$/t (LME, min. 99,8% Co) <sup>[95]</sup>.

Nikiel to metal od lat wykorzystywany w przemyśle jako uszlachetniacz stali. Jest stosowany w katalizatorach, a w ostatnich latach jego znaczenie podkreślone jest wykorzystaniem do produkcji baterii <sup>[94]</sup>. Notowany na giełdzie londyńskiej w czystej postaci (99,8% Ni) osiągał w roku 2022 wartość około 26 000 US\$/t <sup>[95]</sup>.

Gal jest miękkim, srebrzystobiałym metalem, który charakteryzuje się doskonałym przewodnictwem cieplnym i elektrycznym. Posiada bardzo niską temperaturę topnienia (30°C) i jest magnetyczny <sup>[24]</sup>. Jego cechy powodują, że znalazł zastosowanie w układach scalonych oraz przy produkcji paneli słonecznych CIGS (ang. copper indium gallium selenide – miedź ind gal selenek) <sup>[25]</sup>. Jego cena na giełdzie azjatyckiej (Asian metal) wyniosła w roku 2022 około 411 000 US\$/t (99,99% Ga) <sup>[95]</sup>.

German jest błyszczącym, twardym, kruchym, krystalicznym i szarobiałym metaloidem. Przypomina metal, jednak wykazuje również właściwości niemetaliczne, takie jak półprzewodnictwo. Wykorzystywany jest m.in. przy produkcji światłowodów, optyki podczerwieni i ogniw słonecznych <sup>[24]</sup>. Jego cena na giełdzie szanghajskiej w roku 2022 była na poziomie około 787 000 US\$/t (dwutlenek, 99,999%) <sup>[95]</sup>.

Niob to szary metal przejściowy, stosunkowo twardy, paramagnetyczny. Ma bardzo wysoką temperaturę topnienia oraz szeroki zakres zastosowań, od transportu i infrastruktury po procesy zaawansowane technologicznie, takie jak produkcja kondensatorów i magnezów nadprzewodzących. Jest również używany w produkcji stali i stopów aluminium <sup>[24]</sup>. Notowany głównie na giełdzie azjatyckiej utrzymuje cenę na poziomie około 40 000 US\$/t (pięciotlenek, min. 99,5%) <sup>[95]</sup>.

Kolejnym analizowanym metalem jest molibden, czyli srebrzysty, bardzo twardy i mało aktywny chemicznie pierwiastek. Obecnie stosowany jest głównie w metalurgii do produkcji stali oraz innych stopów. Wykorzystuje się go też do budowy samolotów i silników. W mniejszej skali znajduje zastosowanie w medycynie, w nawozach czy przemyśle chemicznym <sup>[96]</sup>. Molibden jest notowany na giełdzie szanghajskiej oraz ferroalloynet. Sprzedawany jest postaci czystej ( $\geq 99,95\%$ ) lub jako stop żelazowo-molibdenowy. Jego cena w roku 2022 wynosiła około 58 000 US\$/t <sup>[95]</sup>.

Antymon to miękki, błyszczący, srebrzistoszary metaloid. Jest stabilny w powietrzu w temperaturze pokojowej, ale po podgrzaniu reaguje z tlenem, tworząc trójtlenek antymonu ( $Sb_2O_3$ ). Ma stosunkowo niską temperaturę topnienia i gęstość <sup>[24]</sup>. Jest używany jako środek zmniejszający palność, w zastosowaniach obronnych i w akumulatorach kwasowo-ołowiowych.

Ponadto odgrywa znaczącą rolę w produkcji szkła [25]. Cena antymonu na giełdzie szanghajskej wyniosła w roku 2022 około 11 000 US\$/t (zawartość  $\geq 99,65\%$ ) [95].

Wolfram to twardy, rzadki metal. Wolny pierwiastek wyróżnia się wytrzymałością i ma najwyższą temperaturę topnienia ze wszystkich pierwiastków. Ma również bardzo wysoką gęstość ( $19,3 \text{ g/cm}^3$ ) Jego stopy są używane w lotnictwie, obronie, przemyśle kosmicznym i technologiach elektrycznych. Dodatkowo, ze względu na swoją twardość i wysoką temperaturę topnienia, jest używany w narzędziach tnących, frezujących i górniczych [40, 41]. Jest notowany na giełdzie szanghajskej oraz ferrolloynet. Sprzedaje się go w postaci APT (parawolframianu amonu), stopu żelazowo-wolframowego oraz proszku o dużej czystości ( $\geq 99,7\%$ ). Jego cena wyniosła około 45 000 US\$/t [95].

Wśród istotnych pierwiastków na listach surowców krytycznych są często ujmowane dwie grupy: platynowce (platyna, pallad, rod, ruten, iryd, osm) oraz pierwiastki ziem rzadkich (lantan, cer, promet, prazeodym, neodym, samar, europ, gadolin, terb, dysproz, holm, erb, tul, iterb, lutet oraz skand i itr). W rozprawie doktorskiej skupiłem uwagę wybranych platynowcach, na palladzie, platynie oraz rutenie.

Pallad jest błyszczącym, srebrzystoszarym metalem o najniższej gęstości wśród platynowców ( $12,02 \text{ g/cm}^3$ ). Ma również najniższą temperaturę topnienia, znaczącą stabilność termiczną oraz odporność na utlenienie i korozję (choć niższą od innych platynowców). Jak pozostałe platynowce ma znaczące zdolności katalityczne oraz jest zdolny zaabsorbować 900 razy więcej wodoru niż jego objętość [24]. Jest wykorzystywany jako katalizator oraz w elektronice, przemyśle chemicznym, stomatologicznym i jubilerstwie [25]. Pallad jest w grupie najdroższych metali, a jego cena na giełdzie londyńskiej osiągała w roku 2022 ponad 67 811 000 US\$/t.

Platyna ma wysoką gęstość i niezwykle zdolności katalityczne. Jest stosunkowo miękka i kowalna oraz wyjątkowo odporna na chemiczną korozję i utlenianie. Topi się w temperaturze około  $1770^\circ\text{C}$ . Jest wykorzystywana głównie jako stop i katalizator, a także w jubilerstwie, elektronice i przemyśle chemicznym [40, 41]. Cena platyny na giełdzie londyńskiej wyniosła w roku 2022 prawie 31 000 000 US\$/t.

Ruten to najdroższy ze wszystkich metali, a jego cena nadal rośnie. Na giełdzie szanghajskej w roku 2022 kosztował około 577 000 000 US\$/t [95]. Ma srebrzystoszarą barwę, bardzo wysoką temperaturę topnienia ( $2310^\circ\text{C}$ ), wyjątkową twardość oraz bardzo dobre właściwości elektryczne i katalityczne [24]. Jest też bardzo odporny na korozję. Znajduje zastosowanie w przemyśle chemicznym, elektronicznym oraz elektrochemicznym. Jest wykorzystywany jako dodatek stopowy do platyny i palladu, w celu poprawy odporności na zużycie styków elektrycznych i nadawanie twardości niektórym stopom jubilerskim [40, 41].

Pierwiastki ziem rzadkich stanowią grupę 17 pierwiastków (choć w rozprawie analizowanych jest 15, zgodnie z podejściem UE). Są one wykorzystywane w produkcji magnesów stałych do silników elektrycznych i generatorów energii elektrycznej. Są też niezbędne do produkcji wysokich technologii, takich jak samochody elektryczne, turbiny wiatrowe, baterie czy energooszczędne żarówki, w sektorze obronnym (lasery, noktowizory, radary) oraz jako katalizatory i przy produkcji szkła [24]. Łączna cena tlenków na giełdzie azjatyckiej (cer, dysproz, erb, europ, lantan, neodym, prazeodym, samar, terb, itr) to prawie 2 800 000 US\$/t [95].

Każdy z omówionych tutaj pierwiastków posiada unikalne właściwości chemiczne i fizyczne, co czyni je niezbędnymi dla konkretnych celów przemysłowych, technologicznych i medycznych. Zrozumienie tych zastosowań pozwala na optymalizację wykorzystania materiałów, sprzyjając postępowi w wielu dziedzinach nauki i technologii.

Tab. 9. Wykorzystanie oraz ceny produktów metali krytycznych

Symbol	Wybrane zastosowania <sup>[31,94,97]</sup>	Cena produktów sprzedawalnych notowanych na giełdach (01.22-12.22) [1, 53]	Giełda <sup>[95]</sup>
Li	akumulatory, szkło i ceramika, hutnictwo stali i aluminium	487 916,67 RMB/t (węglan litu min. 99.5% Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ); 68,48 US\$/t (węglan litu 99% Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ) 6102,62 US\$/t (koncentrat spodumenu, min. 5-6% LiO <sub>2</sub> )	Fastmarkets Fastmarkets Fastmarkets
Be	sprzęt elektroniczny i telekomunikacyjny, części samochodowe, lotnicze, kosmiczne i obronne	610 US\$/kg be (stop berylowo-miedziowy) – dane usgs na 2021	bd
Al	produkcja aluminium	2706,05 US\$/t (wysoka zawartość metalu)	LME
Sc	tlenkowe ogniwa paliwowe, stopy lekkie	5472,79 RMB/kg (tlenek, min. 99.5%)	Asian metal
Ti	lekkie wysokowytrzymałe stopy (aeronautyka, przemysł kosmiczny i obronny), zastosowania medyczne	11,77 US\$/kg (stop żelazowo-tytanowy, zawartość 70% Ti); 398,13* US\$/t (koncentrat ilmenitu, 47-49% TiO <sub>2</sub> ); 3895,83* euro/t (tlenek, pigment); 1904,17* US\$/t (koncentrat rutylu, min. 95% TiO <sub>2</sub> ). ostatnie trzy za okres okt 21 - sep 22	ferroalloynet fastmarkets fastmarkets fastmarkets
V	wysokowytrzymała stal niskostopowa (aeronautyka, przemysł kosmiczny, reaktory jądrowe), katalizatory chemiczne	38,99 US\$/kg (stop żelazowo-wanadowy, zawartość 70-80% V)	ferroalloynet
Cr	stal nierdzewna i żaroodporna	10 859,04 US\$/t (zawartość cr >= 99,2%, 99a)	SMM
Mn	produkcja stali i stopów żelaza	3167,92 US\$/t (mangan elektrolityczny zawartość mn >= 99,7%); 1265,83 US\$/t (stop żelazowo-manganowy, zawartość 75% Mn)	SMM ferroalloynet
Co	akumulatory, nadstopy, katalizatory, magnesy	64 508,21 US\$/t (elektrolityczny kobalt, zawartość co >= 99,8%); 63 553,50 US\$/t (min. 99,8 % Co)	SMM LME
Ni	stopy, baterie, katalizatory	25 814,83 US\$/t (min. 99,8% Ni)	LME
Ga	półprzewodniki, ogniwa fotowoltaiczne	411,33 US\$/kg (min. 99,99% Ga)	Asian metal
Ge	światłowodowy i optyka podczerwieni, ogniwa słoneczne satelitów, katalizatory polimeryzacji	787,76 US\$/kg (dwutlenek, 99,999% Ge)	SMM
Sr	magnesy ceramiczne, stopy aluminium, zastosowania medyczne, środki pirotechniczne	90 US\$/ton (średnia wartość importu celestyty do usa) – cena usgs na 2020 rok	bd
Nb	stal wysokowytrzymała i nadstopy wykorzystywane w transporcie i infrastrukturze, zastosowania zaawansowane technologicznie (kondensatory, magnesy nadprzewodzące itp.)	36,86 US\$/kg (koncentrat, min. 50% nb <sub>2</sub> o <sub>5</sub> , min. 5% Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ); 40,81 US\$/kg (Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , min. 99,5%)	Asian metal Asian metal
Mo	metalurgia	58,30 US\$/kg (zawartość Mo >= 99,95%); 45,17 US\$/kg (stop żelazowo-molibdenowy, 65-75% Mo)	SMM ferroalloynet
In	wyświetlacze płaskie, ogniwa fotowoltaiczne i fotonika, stopy lutownicze	224,36 US\$/kg (zawartość In >= 99,99%)	SMM
Sb	środki zmniejszające palność, zastosowanie obronne, akumulatory kwasowo-ołowiowe, produkcja szkła	11 072,35 US\$/t (zawartość Sb >= 99,65%)	SMM
Hf	nadstopy, pręty regulacyjne reaktorów jądrowych, ceramika ogniotrwała	830 US\$/kg (nieprzetworzony Hafn) – dane usgs na 2021	bd
Ta	kondensatory do urządzeń elektronicznych, nadstopy	197,02 US\$/kg (koncentrat, 30% Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ); 276,67 US\$/kg (Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , min. 99,5%)	Asian metal Asian metal
W	stopy (aeronautyka, przemysł kosmiczny, przemysł obronny, technologie elektryczne), narzędzia frezujące oraz tnące i górnicze	330,08 US\$/mtu (zawartość parawolfrańianu amonu >= 88,5% WO <sub>3</sub> ); 40,99 US\$/kg w (stop żelazowo-wanadowy, 75%); 44,53 US\$/kg (proszek, zawartość W >= 99,7%)	SMM ferroalloynet SMM
Bi	przemysł farmaceutyczny i paszowy, zastosowania medyczne, stopy o niskiej temperaturze topnienia	6833,51 US\$/t (rafinowany bizmut, zawartość Bi >= 99,99%)	SMM

PGM	katalizatory chemiczne i motoryzacyjne, ogniwa paliwowe, zastosowania elektroniczne	675 771,31 US\$/kg jako suma Pt, Pd, Rh	LBMA; SMM
Rh	Zastosowania w katalizatorach samochodowych i komponentach elektrycznych.	577 061,12 US\$/kg (zawartość Ru 99,95%)	SMM
Pd	Zastosowania w katalizatorach samochodowych	2109,17 US\$/troy (zawartość Rh 99,95%)	LME
Pt	Zastosowania w katalizatorach samochodowych, jubilerstwie	961,06 US\$/troy (zawartość Pt 99,95%)	LME
REE	magnesy stałe do silników elektrycznych i generatorów energii elektrycznej, fosfory oświetleniowe, katalizatory, akumulatory, szkło i ceramika	2 790,05 US\$/kg jako suma cen REO	Asian metal
Y	katalizatory, ceramika, lasery, metalurgia, zastosowania fosforów	11,86 US\$/kg (tlenek, min 99,999%)	Asian metal
La	baterie, katalizatory, ceramika, szkło, metalurgia	1,35 US\$/kg (tlenek, min 99%)	Asian metal
Ce	konwertery katalityczne, ceramika, szkło, metalurgia, pasty polerskie	1,85 US\$/kg (tlenek, min 99%)	Asian metal
Pr	stopy w lotnictwie, baterie, magnesy trwałe, ceramika	128,24 US\$/kg (tlenek, min 99%)	Asian metal
Nd	katalizatory, lasery i magnesy trwałe	133,76 US\$/kg (tlenek, min 99%)	Asian metal
Sm	leczenie nowotworów, technologie nuklearne i magnesy trwałe	3,74 US\$/kg (tlenek, min 99%)	Asian metal
Eu	pręty kontrolne w energetyce jądrowej, zastosowania fosforów	29,76 US\$/kg (tlenek, min 99%)	Asian metal
Gd	obrazowanie medyczne, metalurgia, magnesy trwałe	bd	
Tb	zastosowania światłowodów, laserów, magnesów trwałych i urządzeń półprzewodnikowych	2044,38 US\$/kg (tlenek, min 99,9%)	Asian metal
Dy	urządzenia do przechowywania danych, lasery, magnesy trwałe	382,08 US\$/kg (tlenek, min 99%)	Asian metal
Ho	lasery, zastosowania jądrowe, magnesy trwałe	bd	
Er	światłowodowy, zastosowania barwników do szkła, lasery i wzmacniacze optyczne	53,48 US\$/kg (tlenek, min 99%)	Asian metal
Tm	lasery i metalurgia	bd	
Yb	zastosowania katalizatorów, laserów, metalurgii i scyntylatorów	bd	
Lu	terapię nowotworów, elektronika, zobrazowania medyczne	bd	

Przy analizie rynku surowców konieczne jest uwzględnienie metali bazowych oraz szlachetnych, ponieważ stanowią one nie tylko podstawę dla funkcjonowania rynku, ale są także w znaczącej części podstawową kopalinią przy eksploatacji rud metali. Wszystkie metale bazowe, Cu, Zn, Sn, Re czy Pb, są indeksowane na giełdzie londyńskiej<sup>2</sup>. Cena miedzi w roku 2022 wynosiła średnio 8800 US\$/t. Jest to stosunkowo wysoka kwota, analizując ostatnie 10 lat. Cynk kosztował około 33 500 US\$/t, natomiast ołów 2100 US\$/t. Stosunkowo wysoką cenę miała cyna, dla której od roku 2020 widoczny jest istotny wzrost, do wartości wynoszącej ponad 31 000 US\$/t w roku 2022 <sup>[95]</sup> (tab. 10).

Zupełnie inny poziom cen jest reprezentowany przez ren, który jest notowany na giełdzie szanghajskej i jego średnia cena miesięczna wynosi około 2 400 000 US\$/t <sup>[99]</sup>. Jest to kwota wyższa od wartości srebra, która wyniosła w roku 2022 niemal 700 000 US\$/t, ale niższa od złota – 5 800 000 US\$/t (notowane na LME). Metale te znajdują zastosowanie w wielu obszarach przemysłowych, m.in. w produkcji przewodów i przemyśle elektrycznym (miedź) <sup>[100]</sup>, wytwarzaniu powłok ochronnych (cynk), produkcji akumulatorów samochodowych i materiałów chroniących przed promieniowaniem (ołów) <sup>[101]</sup>, produkcji materiałów spawalniczych (cyna) <sup>[102]</sup>, części w przemyśle lotniczym i kosmicznym <sup>[103]</sup> czy w wyrobach jubilerskich i elektronice (złoto i srebro) [62, 63].

Tab. 10. Wykorzystanie oraz ceny produktów metali bazowych i szlachetnych

Symbol	Wybrane zastosowania [47, 52, 55]	Cena produktów sprzedawalnych notowanych na giełdach (01.22-12.22) <sup>[95]</sup>	Giełda <sup>[95]</sup>
Cu	przewody, złącza komputerowe, budownictwo, przemysł elektryczny i energetyczny, przemysł motoryzacyjny	8813,34 US\$/t (klasa A)	LME
Zn	powłoki ochronne na stali i żelazie, pokrycia dachowe, stopy odporne na chlorki	3481,67 US\$/t (min. 99,995% Zn)	LME
Ag	wyroby jubilerskie, przemysł elektro-technicznych, oczyszczanie wody	21,75 US\$/troz (99,5% Ag)	LME
Sn	luty spawalnicze, stopy, medycyna	31 354,58 US\$/t (min. 99,85% Sn)	LME
Re*	produkcja części turbin silników odrzutowych, turbin gazowych, przemysł kosmiczny	2400 US\$/kg (zawartość Re >= 99,99%)	SMM
Au	wyroby jubilerskie, elektronika, przemysł lotniczy, medycyna	1803,58 US\$/troz (99,9% Au)	LME
Pb	ochrona przed promieniowaniem gamma i rentgenowskim, stopy, akumulatory, amunicja	2152,08 US\$/t (min. 99,97% Pb)	LME

## 2.6. Potencjał metalogeniczny Dolnego Śląska

Tematyka niniejszej pracy dotyczy obszaru województwa dolnośląskiego, ograniczonego ustaloną granicą administracyjną. Zasadność tak przyjętego obszaru jest argumentowana trzema głównymi założeniami: (1) Dolny Śląsk jest regionem o znanej, zróżnicowanej metaloności, wynikającej ze zróżnicowania struktur geologicznych i procesów ich powstawania; (2) znanej, długiej i bogatej historii górnictwa, która pozostawiła swe dziedzictwo zarówno w postaci informacji o minerałach/metalach, jak i fizyczne pozostałości górnicze w postaci hałd i osadników; (3) ujęcie administracyjne pozwala na porównanie potencjału na tle innych regionów kraju oraz Europy. Mam jednak świadomość stopnia skomplikowania poruszanych zagadnień dotyczących (1)

<sup>2</sup> Przyporządkowanie do grupy metali bazowych jest problematyczne ze względu na rozbieżność terminologiczną. Przeważnie są to metale stosunkowo niedrogie, jak żelazo, nikiel, ołów, cynk czy miedź. Ujęcie renu, jako metalu bazowego, pojawia się jednak w oficjalnych dokumentach <sup>[98]</sup>. Dla ułatwienia przekazu będzie on również stosowany w niniejszej rozprawie doktorskiej.

samego przebiegu granicy administracyjnej, która jest pokłosiem historii <sup>[106]</sup>, (2) charakterystyki struktur geologicznych, które nie są tożsame z granicami administracyjnymi.

Wobec powyższych prezentowane opisy w możliwie wysokim stopniu będą się odnosić do aktualnej, administracyjnej granicy woj. dolnośląskiego, jednak w stosownych przypadkach (m.in. dotyczących geologii) mogą obejmować obszary wykraczające poza nie.

Dolny Śląsk jest położony w południowo-zachodniej Polsce. To jeden z najbardziej zróżnicowanych przyrodniczo i geologicznie regionów w kraju <sup>[106]</sup>, który od setek lat poddawany jest przekształceniom związanym z działalnością człowieka (antropopresji). Województwo podzielone jest na 30 powiatów. W podziale fizycznogeograficznym wyróżnia się Masyw Czeski (prowincja) w południowej części województwa. W jego obrębie rozpościerają się Sudety (podprowincja), dzielące się na Sudety Zachodnie, Środkowe i Wschodnie oraz Pogórze Zachodniosudeckie i Przedgórze Sudeckie (makroregiony). Północna część województwa objęta jest Nizem Środkowoeuropejskim (prowincja), podzielonym na Niziny Sasko-Łużyckie oraz Niziny Środkowopolskie (podprowincje). Wśród makroregionów wyróżnia się Nizinę Śląsko-Łużycką dla Nizin Sasko-Łużyckich oraz Nizinę Śląską, Wał Trzebnicki i Obniżenie Milicko-Głogowskie dla Nizin Środkowopolskich. Dla całego regionu wyróżniono 48 mezoregionów, co potwierdza zróżnicowanie przyrodnicze Dolnego Śląska <sup>[106]</sup>.

Podział geologiczny Dolnego Śląska tylko w pewnym stopniu pokrywa się z granicami fizycznogeograficznymi. Leży on w całości w obszarze Platformy Zachodnioeuropejskiej jednej z trzech jednostek tektonicznych najwyższego rzędu budujących Polskę, pozostałe to platforma wschodnioeuropejska (północno-wschodnia Polska) oraz orogen karpacki (południowa Polska) <sup>[107]</sup>. Skalne podłoże Dolnego Śląska dzieli się na Sudety zachodnie wraz z zachodnią częścią bloku przedsudeckiego, zrąb środkowej Odry, monoklinę przedsudecką, Sudety środkowe i Sudety wschodnie wraz ze wschodnią częścią bloku przedsudeckiego <sup>[106]</sup>.

Na potencjały zasobowy Dolnego Śląska wpływa zarówno jego sytuacja geologiczna, jak i długa historia działalności w obszarze antroposfery na jego terytorium.

Trzy główne struktury, czyli monoklina przedsudecka, blok przedsudecki i Sudety posiadają różny potencjał. W samych Sudetach prowadzone były liczne działalności górnicze związane z występowaniem metali. Na bloku przedsudeckim występują Góry Kaczawskie, niecki złotoryjska i grodziecka oraz Rudawy Janowickie.

Złożoność historii Dolnego Śląska skutkuje obecnością licznych pozostałości górniczych, takich jak hałdy czy osadniki. Mówimy tutaj o znaczącym potencjale odpadowym, który systematyzowany jest od co najmniej 80 lat. Prace nad tym prowadzone są nieustannie, choć wciąż brakuje pewnych narzędzi umożliwiających pełne rozpoznanie tych złóż. Polski Instytut Geologiczny prowadzi badania przekrojowe dotyczące tych kwestii. Wyniki zostały upublicznione i przedstawione w formie bazy danych dostępnej dla każdej osoby publicznej. Obecnie mamy na terenie Dolnego Śląska ponad 600 takich obiektów, a dołączane są kolejne, z innych obszarów Polski.

Innym przykładem są odpady komunalne, które całościowo nie były analizowane pod kątem ich zasobności w surowce <sup>[108]</sup> (rys.18).

Na Dolnym Śląsku występują także jeden z najlepiej rozpoznanych obiektów antropogenicznych w Polsce – odpady chemiczne „Wizów” w Łące koło Bolesławca. Obiekt ten jest zbudowany z fosfogipsu apatytyowego pochodzącego z produkcji kwasu fosforowego. Jego znaczenie jest istotne ze względu na występujące w nim pierwiastki ziem rzadkich jak też możliwość uzyskanie dodatkowych produktów (anhydrytu) <sup>[109]</sup>.



Rys. 18. Występowanie składowisk komunalnych, przemysłowych oraz mogiłników na Dolnym Śląsku w roku 2002

### 2.3.1. Główne znane obszary metalonośne

#### Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy

Złóża obszaru Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego są obecnie eksploatowane przez polską spółkę górnictwa KGHM Polska Miedź S.A. [110]. Pokłady te są zasobne nie tylko w miedź, srebro, złoto, platynę, nikiel, wanad i kobalt, ale także w wiele innych pierwiastków, które niestety nie zawsze są odzyskiwane.

Grupa KGHM Polska Miedź S.A. to międzynarodowa organizacja specjalizująca się w poszukiwaniach, górnictwie i metalurgii. Swoją działalność prowadzi w Europie, Amerykach Południowej i Północnej oraz w Azji. Ich główne aktywa są skupione w Polsce, gdzie działają trzy kopalnie podziemne (Lubin, Polkowice-Sieroszowice i Rudna), trzy huty (Huta Miedzi Legnica, Huta Głogów I i Huta Głogów II) oraz walcownia (Cedynia). Pozostałe działania są zlokalizowane w USA (kopalnia Robinson, Carlota), Chile (kopalnia Sierra Gorda) i Kanadzie (projekt Victoria, Ajax) [111]. Polskie kopalnie miedzi produkują rocznie 449,4 tysiąca ton miedzi z wydobytej rudy (dane na 2021 rok). KGHM wydobywa również minerały towarzyszące. Produkcja w 2021 roku wyniosła 1332 tony srebra, 786 kilogramów złota, 29 430 ton ołowiu, 1997 ton siarczynu nikielu, 66,21 tony selenu i 9,25 tony renu. Kopalnia Polkowice-Sieroszowice jest również znaczącym producentem soli kamiennej (87 290 ton). Huty w Głogowie i Legnicy wyprodukowały w 2019 roku 577,6 tysiąca ton miedzi elektrolitycznej (381,1 tysiąca ton z koncentratów KGHM i 196,5 tysiąca ton z zakupionych koncentratów zewnętrznych) [112,113]. Walcownia Cedynia wyprodukowała 264,3 tysiąca ton walcówki miedzianej i 17,6 tysiąca ton drutów z miedzi beztlenowej [111]. Geologiczne zasoby bilansowe w złożach udostępnionych czynnymi kopalniami wynoszą 1552,28 miliona ton rudy, zawierającej 28,11 miliona ton miedzi i 82,05 tysiąca ton srebra. Zasoby przemysłowe to ponad 1 miliard ton rudy [112]

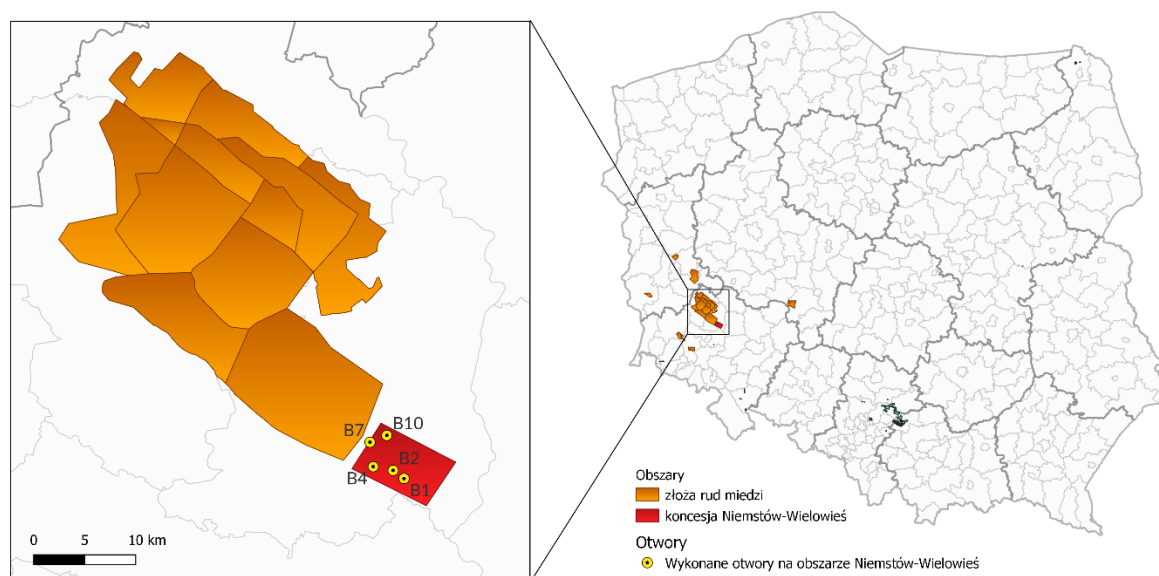
KGHM został uznany za potencjalnego dostawcę kobaltu w tej części Europy [99, 100]. Kobalt występuje jako metal towarzyszący w złożach KGHM, a zasoby szacunkowe na rok 2021



wynoszą 90,82 tysiąca ton (+22,42 tysiąca ton pozabilansowych w złożu Głogów). Największe perspektywiczne zasoby kobaltu (40,5 tysiąca ton) występują w złożu Lubin-Małomice eksploatowanym przez kopalnię Lubin [112]. Należy zauważyć, że eksploatacja miedzi w kopalni Lubin KGHM w Polsce staje się z roku na rok coraz mniej opłacalna z powodu wyczerpywania się zasobów bogatej rudy, od 1,09% zawartości miedzi w 2007 roku do 0,92% w roku 2013 [116–118]. Niższa zawartość miedzi w rudzie ma negatywne konsekwencje ekonomiczne i środowiskowe, ponieważ do wyprodukowania tej samej ilości produktu rafinowanego trzeba przetworzyć więcej materiału początkowego, co zwiększa zapotrzebowanie na energię w miarę obniżania się jakości rudy. Dlatego też konieczne staje się dążenie do maksymalizacji ekonomicznych efektów wydobywania przy jednoczesnym ograniczaniu wpływów na środowisko. Na przykład kopalnie zarządzane przez KGHM produkują srebro jako produkt uboczny wydobywania miedzi, zwiększając wynik ekonomiczny przy stosunkowo niskich kosztach środowiskowych. Tą samą logiką, kobalt mógłby być ekstrahowany z żużli konwertorowych z huty w Legnicy [117,119].

Obszar koncesyjny Niemstów-Wielowieś znajduje się w województwie dolnośląskim, w pobliżu miast Niemstów oraz Wielowieś, około 20 kilometrów na południowy wschód od miasta Lubin. Obszar ten sąsiaduje z południowego-wschodu z obszarem górniczym Lubin-Małomice, który jest eksploatowany przez spółkę KGHM Polska Miedź SA.

Analizowane badania poszukiwawczo-rozpoznawcze na terenie okolic Niemstowa zostały przeprowadzone w latach 2013-2014 przez spółkę Balamara, specjalizującą się w poszukiwaniu złóż surowców mineralnych. Ich celem było zbadanie potencjalnych złóż miedzi. W ramach kampanii wykonano pięć otworów wiertniczych, w których wykonano rdzeniowania w celu zidentyfikowania potencjalnych wystąpień rud miedzi i srebra (rys. 19).



Rys. 19. Lokalizacja złóż rud miedzi eksploatowanych przez KGHM Polska Miedź SA. oraz lokalizacja dawnego obszaru koncesyjnego Niemstów-Wielowieś wraz z miejscami wykonania otworów rozpoznawczych, opracowanie własne przy wykorzystaniu danych [4]

## Szklary

Masyw Szklary znajduje się na południowym zachodzie Polski około 60 kilometrów na południe od Wrocławia i około 7 kilometrów od Ząbkowic Śląskich. Morfologicznie jest to pasmo wzgórz rozciągające się w kierunku północ-południe. Należą do niego Wzgórze Siodłowe, Szklana Góra, Wzgórze Tomickie i Wzgórze Koźmickie. Geologicznie należy do bloku przedsudeckiego i strefy dyslokacyjnej Niemczy [120]. Rudy niklu w Szklarach znajdują się w wydłużonej strefie (ryc. 1). Część centralna była eksploatowana od XIX wieku do 1983 roku, kiedy kopalnia została

zamknięta. Decyzja została podjęta ze względu na niską zawartość rudy, nieefektywną technologię przetwarzania i aspekty środowiskowe [121]. Po zamknięciu kopalni teren został zrekultywowany i obecnie jest pokryty lasem (ryc. 1), a o dawnej działalności górniczej świadczą wyrobiska odkrywkowe, hałdy nadkładu oraz odpady z przerobu rudy (żuźle), które zostały zdeponowane na zachodniej stronie Wzgórza Szklana Góra (ryc. 1). Na obszarze dawnej kopalni funkcjonuje obiekt geoturystyczny w sztolni Robert, który został otwarty w roku 2013 [104, 105]. W ostatnich latach teren Szklar był zbadany przez dwie firmy: KGHM i Gepco Geologia i Ochrona Środowiska, ale prace nie zakończyły się rozpoczęciem działalności górniczej [124]. W roku 2021 na obszar Szklar i ich okolic (Grochowa) została udzielona koncesja na poszukiwanie i rozpoznawanie złóż niklu firmie Ferrite Resources Polska. Dostęp do szczegółów dotyczących spółki jest ograniczony i brak jest publicznej informacji o prowadzonych przez nią pracach na terenie Szklar [125].

### Stare Zagłębie Miedziowe

Stare Zagłębie Miedziowe to znaczący region wydobywania miedzi w polskiej historii. Znajduje się między Bolesławcem a Złotoryją [126]. Głównym wydobywanym typem rudy był margiel z mineralizacjami miedzi: bornitem, chalkozynem, chalkopirytem, azurytem i malachitem [127]. Pierwsze udokumentowane zapiski o wydobywaniu w tym regionie pochodzą z XV i XVI wieku. Do 1930 roku eksploracja i eksploatacja w Starym Zagłębiu Miedziowym odbywały się raczej na małą skalę, a produkcja metali nie osiągnęła wysokiego poziomu. Główne prace eksploracyjne miały miejsce po 1930 roku. Rezultatem było udokumentowanie złoża miedzi. Przygotowania do drugiej wojny światowej zintensyfikowały otwieranie kopalni. W ciągu kilku lat ukończono szyby: Konrad I, Konrad II, Lubichów I, Lubichów II, Lena. Po wojnie Polska ponownie uruchomiła kopalnie i rozpoczęła nowe prace [126]. Cztery z nich, Lubichów, Konrad, Lena i Nowy Kościół, były głównymi producentami miedzi w Polsce aż do odkrycia złoża miedzi w Polkowicach, Sieroszowicach i Lubinie w 1957 roku [128]. Obecnie obszar ten jest na mocy koncesji na poszukiwanie i rozpoznanie prowadzonej przez KGHM [129]. Na powierzchni znajdują się liczne hałdy oraz osadniki poflotacyjne będące wynikiem dawnej, intensywnej działalności górniczej [130]. Znacząca część obiektów została udokumentowana w bazie Hałdy [131].

### Krobica – Przecznicza – Gierczyn

Pasma Starej Kamienicy rozciąga się od Wojcieszyc, przez Przecznicę, Krobicę i Gierczyn w Polsce, aż do Nove Mesto w Czechach [132]. Geologicznie jest to kompleks skalny, zbudowany z różnych litologicznie typów łupków. Głównym minerałem cynowym jest kasiteryt. Kobalt występował w kobaltycie, saflorycie i löllingicie [133]. Eksploatację cyny na terenie Krobicy i Gierczyna datuje się na XVI wiek [133]. Produkcja wynosiła wtedy około 70 ton cyny rocznie. Z powodu braku bogatej rudy, działalność zakończyła się pod koniec XVI wieku. Później eksploatacja miała miejsce w latach 1648-1668 oraz 1755-1770. Między 1770 a 1772 rokiem rozpoczęto wydobywanie kobaltu. Wyprodukowano prawie 50 ton rudy tego surowca. Działalność miała także miejsce w latach 1810-1816 oraz w 1938 roku. Po drugiej wojnie światowej na terenie Pasma Starej Kamienicy przeprowadzono kampanie poszukiwawcze [133]. Obecnie złoża cyny i kobaltu są klasyfikowane jako pozabilansowe. Szacuje się, że ilość rudy pozostałej w Krobicy wynosi 2,6 miliona ton, a w Gierczynie 2,9 miliona ton, z zawartością cyny pomiędzy 0,23% a 0,87% [114, 115]. Od 2019 roku niewielka część Przeczniczy jest objęta licencją na poszukiwanie i rozpoznanie [129]. W bazie Hałdy obecnie wymienionych jest 5 hałd odpadów na tym obszarze [131], lecz w 2020 roku ich liczba zostanie znacznie zwiększona przez PIG. Na tym obszarze zdeponowano również liczne hałdy odpadów związane z działalnością w łupkowym kamieniołomie „Wyrwa”, które mogą być również postrzegane jako potencjalne.

---

## Rozdział 3. Wykorzystane materiały i metody

---



## 3.1. Materiały ogólne

### 3.1.2. Materiały - analiza ekonomiczna

Do przygotowania warstwy ekonomicznej pracy konieczne było wykorzystanie materiałów rzetelnych oraz przede wszystkim aktualnych, dotyczących cen metali lub ich produktów na rynkach. Jako że praca zawiera analizę dużej grupy pierwiastków niezbędne było pozyskanie możliwie systematycznego opracowania. Tego typu raporty wykonywane są przez niemiecki Federalny Instytut Nauk o Ziemi i Zasobów Naturalnych w Hanowerze (niem. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)). W pracy analizowany był okres 2008-2022, do czego wykorzystane zostały raporty roczne [135-146] oraz raporty miesięczne [95,147].

W przypadku braku danych dla poszczególnych pierwiastków wykorzystałem *Statystyki historyczne dotyczące surowców mineralnych i materiałowych w Stanach Zjednoczonych* przygotowane przez amerykańską agencję naukowo-badawczą United States Geological Survey (USGS). Są to ogólnie dostępne dane tabelaryczne zawierające informacje o wartości metali na rynku amerykańskim. Należy uznać, że odzwierciedlają one ceny na rynkach światowych [1].

## 3.2. Materiały wykorzystane w analizie potencjałów geogenicznych

### 3.2.1. Materiały zbiorcze (lub bazy danych)

Jednym z wykorzystanych przeze mnie źródeł do zgromadzenia informacji o potencjałach metali krytycznych w zasobach geogenicznych jest publikacja *Metalogeneza Sudetów* (1966) [148]. Jej treść, wraz z załączoną mapą, zawiera informacje o lokalizacji udokumentowanych wystąpień metali w Sudetach oraz podstawowe informacje dla geologa-poszukiwacza, takie jak mineralogia.

Kolejne istotne źródło to europejska baza danych Frame, która ilustruje występowanie metali krytycznych w różnych częściach kontynentu [149]. Dane geoprzestrzenne dostępne są przez portal European Geological Data Infrastructure (EGDI) [150].

Systematyczna informacja o złożach w Polsce zawarta jest również w *Bilansie Zasobów Żłóż Kopalin w Polsce* [112], *Bilansie perspektywicznych zasobów kopalin Polski* [151] oraz w *Ocenie perspektyw występowania złóż rud metali w Sudetach i na bloku przedsudeckim w nawiązaniu do aktualnych modeli geotektonicznych* [152].

### 3.2.2. Próby rdzeni oraz wyniki analiz geochemicznych

Ocena potencjału metali krytycznych na jednym z analizowanych obszarów – Niemstów-Wielowieś – była możliwa dzięki uzyskaniu próbek oraz wyników analiz geochemicznych od spółki Balamara Resources Limited (dawniej Duluth Poland, a następnie Polmetal Sp. z o.o.).

Pochodziły one (418 próbek) z pięciu otworów wiertniczych (B1, B2, B4, B7, B10) wykonanych na tym obszarze w trakcie kampanii poszukiwawczej na podstawie koncesji na poszukiwanie i rozpoznawanie polimetalicznego złoża z miedzią, srebrem i ołowiem nr 5/2008/p z dnia 22 stycznia 2008 r. Jej wygaśnięcie stwierdzono dnia 19 czerwca 2015 r [153]. Jednocześnie przekazane zostały próbki rdzeni zmielone do frakcji < 1mm, na których wykonałem dodatkowe analizy mikroskopowe i geochemiczne.

Firma wykonała analizy w rzetelnym laboratorium ACME (obecnie Bureau Veritas) przy wykorzystaniu metody ICP-MS.

Aby przeprowadzić analizę porównawczą z obszarem aktywności górniczej KGHM Polska Miedź S.A., skorzystałem z danych zawartych w pracy magisterskiej Radosława Nowińskiego dotyczącej przestrzennego występowania kobaltu w Zakładzie Górniczym Lubin <sup>[154]</sup>.

### 3.3. Materiały wykorzystane w analizie potencjałów antropogenicznych

#### 3.3.1. Materiały kartograficzne

Analizy związane z metodą historycznego poszukiwania i rozpoznawania, jak i z metodą szacowania objętości, wymagały wykorzystania materiałów mapowych. Do istotnych źródeł należy Messtischblätter (1883–1944), czyli topograficzne mapy państwa niemieckiego w skali 1:25 000. Wykonano je w trzech seriach czasowych. Jest to najbardziej szczegółowe, wielkoskalowe źródło informacji o historycznej rzeźbie terenu w centralnej części Europy. Czas tworzenia tych map pozwala na badanie morfologii terenu przed lub podczas historycznej działalności górniczej. Dodatkowym atutem jest fakt, że topografia obszaru była prezentowana za pomocą poziomic. Materiały te są również wartościowe ze względu na otwarty dostęp. Skany arkuszy Messtischblätter zostały upublicznione m.in. poprzez portal Mapster [\[1, 2\]](#). Na potrzeby pracy wykonano georeferencję mapy na siatkę w układzie GCS Deutsches Hauptdreiecksnetz (EPSG: 4314) przekształconą do układu 1992. Siatka ta w postaci pliku .shp została pozyskana z Wydziału Geodezji i Kartografii Urzędu Marszałkowskiego Województwa Dolnośląskiego.

Kolejnym ważnym źródłem informacji są mapy topograficzne wykonane w powojennej Polsce. W ramach rozprawy wykorzystywane były arkusze w skali 1:10 000 w układzie „1965” (EPSG: 2174), przekształcone do układu „1992” (EPSG: 2180). Pozwoliły one na sprawdzenie, jak wyglądał teren przed powstaniem obiektu odpadowego na obszarach górniczych działających w okresie późniejszym niż czas wykonania mapy. BDOT 1:10 000

Najnowszym wykorzystanym materiałem topograficznym były ogólnodostępne dane LiDAR. Pomiary przeprowadzane są co kilka lat (interwał akwizycji różni się w zależności od arkusza) <sup>[155]</sup>. Dzięki szczegółowemu cięciu poziomicowemu w układzie Amsterdam możliwe jest bardzo dokładne przedstawienie rzeźby terenu. Ich wykorzystanie w pracy miało istotne znaczenie dla poszukiwania obiektów, określenia ich granic oraz odwzorowania powierzchni.

#### 3.3.2. Bazy danych występowania obiektów odpadowych

W przypadku zasobów antropogenicznych, kluczowym źródłem danych była geobaza Hałdy, stworzona i zarządzana przez Państwowy Instytut Geologiczny-Państwowy Instytut Badawczy (PIG-PIB) <sup>[156]</sup>. W mojej pracy wykorzystałem dwie pierwsze wersje tej bazy, które pozyskałem w formie danych tabelarycznych (.xlsx) i przestrzennych (.shp) z Narodowego Archiwum Geologicznego. Pierwsza wersja zawierała 445 obiektów, druga natomiast zbudowana była z 568 obiektów na terenie Dolnego Śląska. W późniejszym czasie poszerzono ją o kolejne punkty, w szczególności w innych regionach Polski. Ze względu na czas prowadzenia badań oraz obszar badawczy nie zostały one uwzględnione w rozprawie.

#### 3.3.3. Próby skalne oraz żuźłowe

W pracy przedstawione zostały również pojedyncze analizy prób skalnych i żuźłowych – indykatorów. Pobrałem je w terenie jako próby losowe, dbając o należytą staranność (zamykane woreczki strunowe, rejestracja miejsca poboru próbki, przechowywanie w zamykanych pojemnikach). Preparatyka próbek na cele analiz pod mikroskopem kruszcowym oraz analiz pod

mikrosondą elektronową została wykonana zgodnie z najwyższymi standardami w Pracowni Szlifierskiej Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

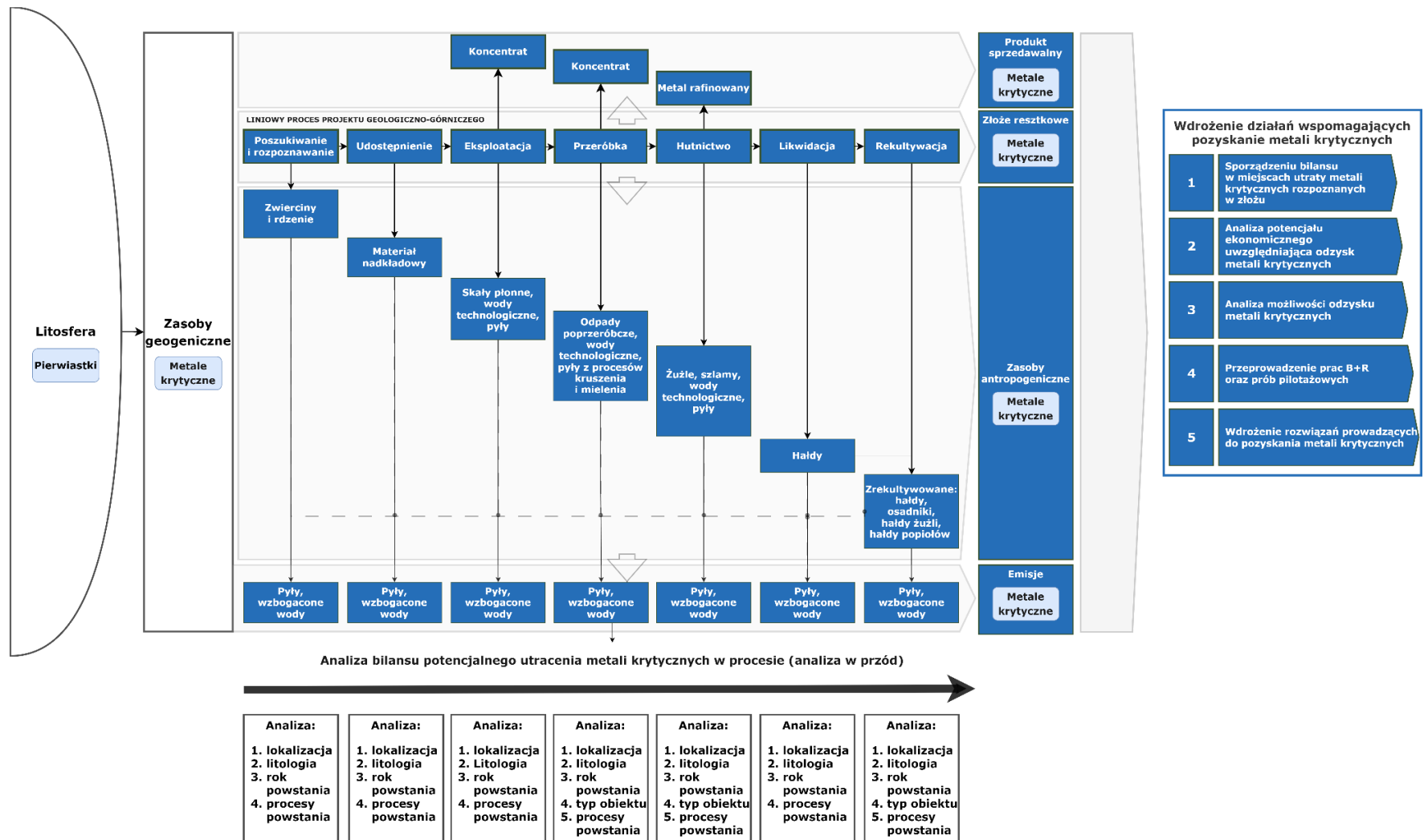
### 3.4. Główne metody badawcze wykorzystane w analizie potencjałów geogenicznych

#### 3.4.1. Autorska propozycja analizy utraty metali w procesie górniczym

Każdy proces geologiczno-górniczy związany jest ze stratami materiału na jego poszczególnych etapach. Obecnie coraz większy nacisk kładziony jest na zrozumienie procesu i wskazywanie krytycznych miejsc. Ich optymalizacja będzie wspierać bardziej zrównoważone prowadzenie działalności. Chociażby dzięki wykorzystaniu takich technik, jak analiza cyklu życia (ang. Life Cycle Assessment, LCA). Narzędziem użytecznym na potrzeby rozpoznania miejsc utraty metali krytycznych jest analiza zbioru wejść i wyjść (ang. Life Cycle Inventory, LCI) [157]. W rozprawie zaproponowałem autorskie ujęcie sposobu inwentaryzacji strumieni oraz produktów w kopalniach w celu detekcji miejsc utraty nieodzyskiwanych metali krytycznych (rys. 20). Takie podejście pozwala na wykrycie, w którym produkcie/odpadzie mogą znajdować się metale krytyczne, wykazane we wcześniejszych analizach zasobów. Uzupełnieniem tego sposobu działania jest metoda historycznego poszukiwania i rozpoznawania, która po wykryciu pierwiastka w produkcie/odpadzie pozwala prześledzić jego drogę wstecz

W ramach proponowanej metody wyróżniłem kolejne etapy liniowego procesu projektu geologiczno-górniczego:

1. Poszukiwanie i rozpoznawanie – strata metali krytycznych związana jest z ich występowaniem w zwiercinach, rdzeniach, pyłach oraz płuczce. Są to jednak ilości o stosunkowo małym znaczeniu. Kwestia ta jest nieco inna w przypadku wykonywania górniczych wyrobisk poszukiwawczych (sztolni, szybków), jednak obecnie metody te są rzadko stosowane.
2. Udostępnienie – w trakcie tego procesu może dojść do przemieszczenia metali krytycznych do składowanego na hałdach materiału nadkładowego, jak w przypadku innych procesów. Metale mogą również być tracone w pyłach i wzbogaconych wodach. Materiał nadkładowy stanowi bardzo istotną ilość składowanego odpadu, szczególnie w wielkoobszarowych kopalniach odkrywkowych. Jednak występowanie niezagospodarowanych metali krytycznych w tego typu materiale jest raczej rzadki i dotyka kwestii racjonalnego wykorzystania złoża.
3. Eksploatacja – w przypadku tego procesu sytuacja jest podobna, jak w procesie udostępnienia. Jednakże do istotnych strumieni należy włączyć wody technologiczne, które są wzbogacane łatwo rozpuszczalnymi minerałami metali krytycznych.
4. Przeróbka jest jednym z istotniejszych procesów. Wynika to ze znaczącej masy przerabianego urobku oraz z faktu, że proces wzbogacenia nigdy nie wynosi dokładnie 100% uzysku materiału użytecznego z urobku. Fakt ten powoduje, że część głównego surowca trafia m.in. na osadniki. W przypadku nieekstrahowanych metali krytycznych może dochodzić do częściowego lub całościowego przechodzenia ich do odpadu.
5. Hutnictwo to proces występujący w przypadku eksploatacji metali. Jest on też ostatnim etapem prowadzącym do zwiększenia zawartości metalu w ostatecznym produkcie. Z tego względu wszystkie metale migrujące razem z koncentratem do huty są tam odzyskiwane w dodatkowych procesach (np. szlamach) lub tracone i składowane w postaci żużli pohutniczych.



Rys. 20. Propozycja analizy utraty metali w procesie geologiczno-górnictwem w oparciu o założenia LCA



6. W trakcie likwidacji nie dochodzi do istotnych zmian w samym składzie produktów i odpadów, jednakże może dochodzić do istotnego przemieszczania mas – w tym hałd/osadów potencjalnie zawierających metale krytyczne.
7. Podobna sytuacja (jak w trakcie likwidacji) ma miejsce na etapie rekultywacji. Dodatkowo potencjalnym zasobom antropogenicznym jest w tym momencie nadawana inna wartość użytkowa, co może powodować konflikty.

#### 3.4.2. Analiza geostatystyczna (eksploracyjna analiza danych, korelacja Pearsona, wyznaczenie furty)

W ramach prac związanych z wykonaniem studium przypadku dla Niemstów-Wielowieś wykorzystałem narzędzia znane w dobrej praktyce analizowania danych pochodzących z wierceń. Takie podejście jest spotykane zarówno w praktyce, jak i w publikacjach naukowych [158]. Składa się na nie wstępne eksploracyjne rozpoznanie zbioru danych z analizowanych wyników badań geochemicznych oraz przedstawienie ich na histogramach i wykresach. Konieczne jest także określenie wartości anomalnych. Dodatkowo w ramach prac wyznaczyłem potencjalną furkę i obliczyłem dla niej metal ekwiwalentny.

Analizy przeprowadziłem przy wykorzystaniu środowiska Python oraz bibliotek takich jak Pandas, Numpy, Seaborn, Scipy oraz Matplotlib. Do wykonania ostatecznych map z wyinterpolowanych wyników wykorzystałem oprogramowanie ArcGIS Pro. Zastosowałem metodę odwrotnych odległości ważonych (ang. Inverse distance weighted, IDW) jako najskuteczniejszą metodę interpolacji.

W celu odpowiedzi na postawione pytanie, przeprowadziłem analizy geostatystyczne na danych dostarczonych przez spółkę Balamara Resources Limited. Prace badawcze obejmowały następujące etapy:

1. Przygotowanie danych:
  - a. przyjęcie połowy minimalnego poziomu detekcji dla próbek, w których nie został on osiągnięty;
  - b. uzupełnienie wyników analiz dla próbek, w których przekroczono próg detekcji i wykonywane były dodatkowe analizy;
  - c. nadanie wag próbkom zgodnie z interwałem, z którego zostały pobrane.
2. Eksploracyjna analiza danych (EDA):
  - a. obliczenie dla wszystkich próbek miar statystycznych, takich jak średnia, odchylenie standardowe, wartość minimalna, kwartyle, mediana oraz wartość maksymalna;
  - b. analiza całościowa w celu wyselekcjonowania metali o anomalnych zawartościach w całym zbiorze, porównanie ich zawartości z wartością średnią w zbiorze oraz z klarkiem;
  - c. analiza korelacji Spearmana;
  - d. określenie, w których otworach występują podwyższone zawartości poszczególnych metali;
  - e. przedstawienie wyników na profilach geochemicznych otworów.
3. Wyznaczenie teoretycznej furty o najwyższej wartości metalu ekwiwalentnego (na podstawie wypracowanego wzoru).
4. Przedstawienie wyników w formie mapy geochemicznej.
5. Zestawienie wyników z danymi pochodzącymi z Zakładu Górniczego Lubin w formie mapy geochemicznej.

Wszystkie etapy analiz przeprowadzono w sposób szczegółowy i zgodny z aktualnymi standardami naukowymi, aby zapewnić ich wiarygodność i rzetelność.

### 3.4.3. Analiza pod mikroskopem kruszcowym oraz mikrosondą elektronową

W ramach własnych badań nad mineralizacją rudną przeprowadziłem analizy prób pod mikroskopem kruszcowym. Następnie uczestniczyłem w dalszym badaniu mineralizacji przy wykorzystaniu mikrosondy elektronowej JEOL JXA-8230 SuperProbe. Realizowałem je w ramach stażu finansowanego ze środków projektu InterDok w Laboratorium Pierwiastków Krytycznych AGH-KGHM pod opieką profesora Adama Piestrzyńskiego i przy współpracy z dr Gabrielą Kozub-Budzyń.

Preparatyka prób wykonana została w Pracowni Szlifierskiej Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

### 3.4.4. Metal ekwiwalentny

W rozprawie przedstawiłem dwie modyfikacje obliczania zawartości metalu – dla potencjalnych zasobów geogenicznych oraz antropogenicznych. Metoda ta jest znaną praktyką stosowaną przy poszukiwaniu i rozpoznawaniu surowców oraz na etapie produkcyjnym, również globalnie [159]. Przykładem jest wykorzystanie jej do obliczania zasobów w zakładach górniczych KGHM S.A. [116]. Istnieją również uproszczone narzędzia internetowe, oparte o zamysł ekwiwalentności, pozwalające na jej obliczenie dla wybranych profili otworów rozpoznawczych [160].

### 3.4.5. Analiza SWOT – PESTEL

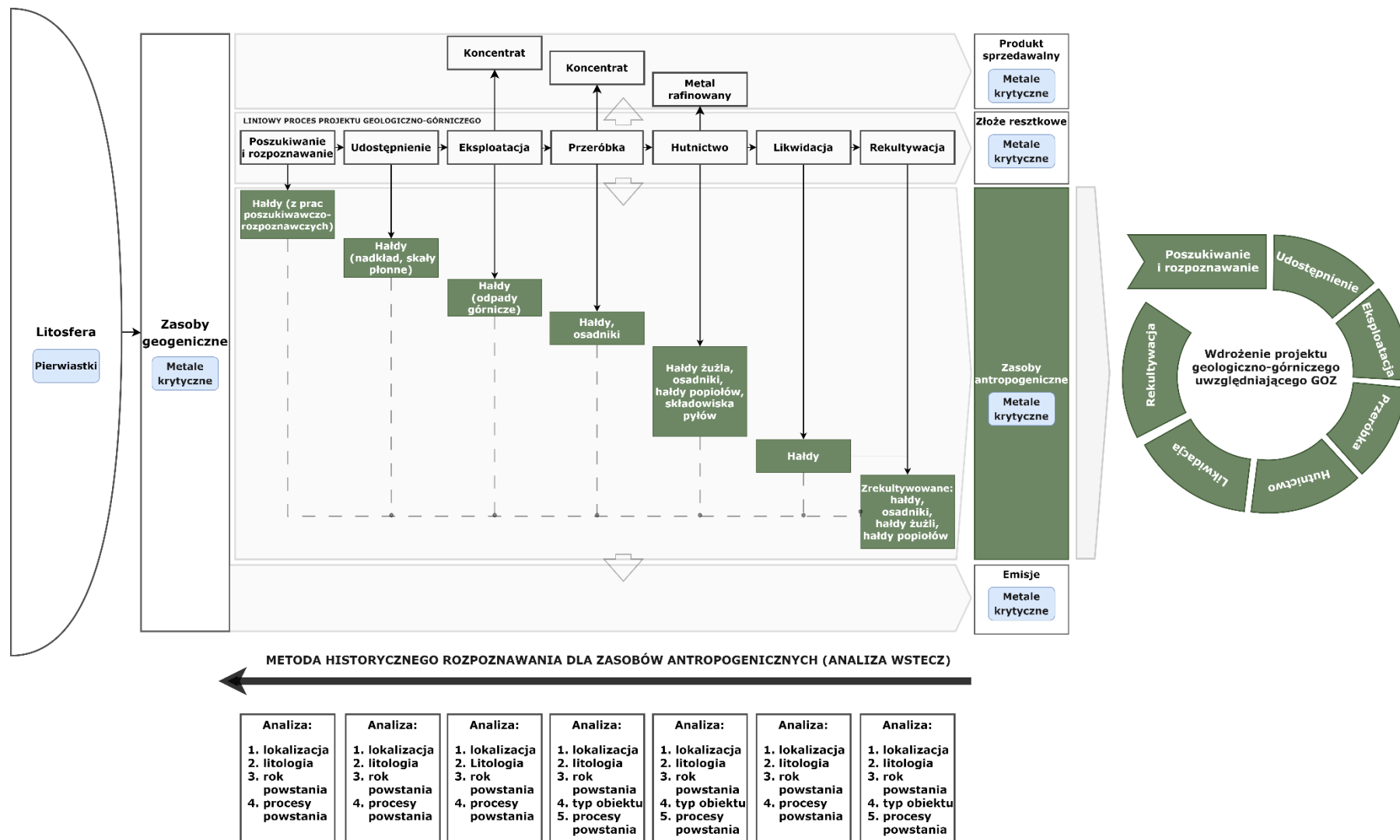
Jako narzędzie decyzyjne w pracy wykorzystałem metodę analizy SWOT (ang. Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats – mocne strony, słabości, szanse i zagrożenia) w ujęciu PESTEL (ang. Political, Economic, Social, Technological, Environmental, Legal – polityczne, ekonomiczne, społeczne, technologiczne, środowiskowe, prawne).

## 3.5. Główne metody badawcze wykorzystane w Rozdziale Antropogen

### 3.5.1. Autorska propozycja metody historycznego poszukiwania i rozpoznawania złóż kopalin

Metoda historycznego poszukiwania i rozpoznawania została w autorski sposób dostosowana do celu pracy. Jej założenia oparte są na niemieckim sposobie analizowania obszarów skażonych (niem. Historische Erkundung/altlastenrecherche, eksploracja historyczna/badania skażonych miejsc) [161–163]. W pracy wykorzystałem tę metodę do poszukiwania oraz rozpoznawania obiektów pogórnich (hałdy, osadniki). Opiera się ona na zrozumieniu obecnego stanu obiektu oraz procesu, jaki prowadził do jego powstania. Możliwe jest to dzięki systematycznej pracy badawczej, bez wykonywania prac typowo technicznych.

Założeniem metody jest analiza źródeł historycznych, aby jak najlepiej odtworzyć proces powstawania hałdy i przypisać mu pierwiastki zawarte w materiale odpadowym (rys. 21). Zgromadzenie wystarczających informacji jest możliwe jedynie poprzez systematyczne analizowanie źródeł związanych z poszczególnymi etapami procesu (tab. 11). W przypadku obiektów powstałych w przeciągu ostatnich 50–70 lat, możliwe jest dokładniejsze przeanalizowanie miejsca składowania odpadów, jak i całego procesu geologiczno-górniczego, ze względu na wprowadzone zasady formalnej dokumentacji postępu prac.



Rys. 21. Propozycja metody historycznego poszukiwania i rozpoznawania

Jednocześnie dostępne są wykonywane co pewien okres mapy topograficzne. W przypadku hałd powstałych pomiędzy 1880 a 1945 użyteczne są mapy Messtichblätter oraz dokumentacje geologiczne opracowane w czasach, kiedy ziemie Dolnego Śląska należały do Niemiec. Dla obiektów powstałych przed rokiem 1880 dane są bardzo symboliczne, często opisywane jedynie przez lokalnych poszukiwaczy minerałów i skał.

Tab. 11. Propozycja materiałów wykorzystywanych na potrzeby metody historycznego poszukiwania i rozpoznawania

Etap cyklu życia projektu geologiczno-górniczego	Potencjalne źródła pozyskania informacji
Poszukiwanie i rozpoznanie	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) raporty z poszukiwawczo-rozpoznawczych robót geologicznych</li> <li>2) dokumentacje geologiczne</li> <li>3) Miejscowe Plany Zagospodarowania Przestrzeni</li> <li>4) studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego</li> <li>5) historyczne (Messtichblätter) i aktualne mapy topograficzne i sytuacyjne</li> <li>6) historyczne zdjęcia lotnicze (NARA<sup>[164]</sup> i Luftbilder) oraz aktualne (LiDAR, Ortofotomapy)</li> <li>7) literatura naukowa i popularno-naukowa</li> <li>8) fora internetowe (Facebook, Instagram)</li> <li>9) giełdy minerałów</li> <li>10) zwiady terenowe</li> <li>11) fotodokumentacje historyczne i współczesne</li> <li>12) dokumentacje w archiwach narodowych, geologicznych, górniczych</li> </ol>
Udostępnienie	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Projekt Zagospodarowania Złoże</li> <li>2) źródła wymienione w poprzednich etapach</li> </ol>
Eksploatacja	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Plan Ruchu Zakładu Górniczego</li> <li>2) źródła wymienione w poprzednich etapach</li> </ol>
Przeróbka	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) schematy technologiczne procesu przerobczego</li> <li>2) projekty technologiczne</li> <li>3) analizy chemiczne produktów i odpadów</li> <li>4) źródła wymienione w poprzednich etapach</li> </ol>
Hutnictwo	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) schematy technologiczne procesu hutniczego</li> <li>2) projekty technologiczne</li> <li>3) analizy chemiczne produktów i odpadów</li> <li>4) rejestry handlowe</li> <li>5) źródła wymienione w poprzednich etapach</li> </ol>
Likwidacja	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) zdjęcia instalacji polikwidacyjnej</li> <li>2) plany likwidacji</li> <li>3) raporty z likwidacji</li> <li>4) źródła wymienione w poprzednich etapach</li> </ol>
Rekultywacja	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) projekty rekultywacji</li> <li>2) zapisy w Planach Zagospodarowania przestrzennego</li> <li>3) źródła wymienione w poprzednich etapach</li> </ol>

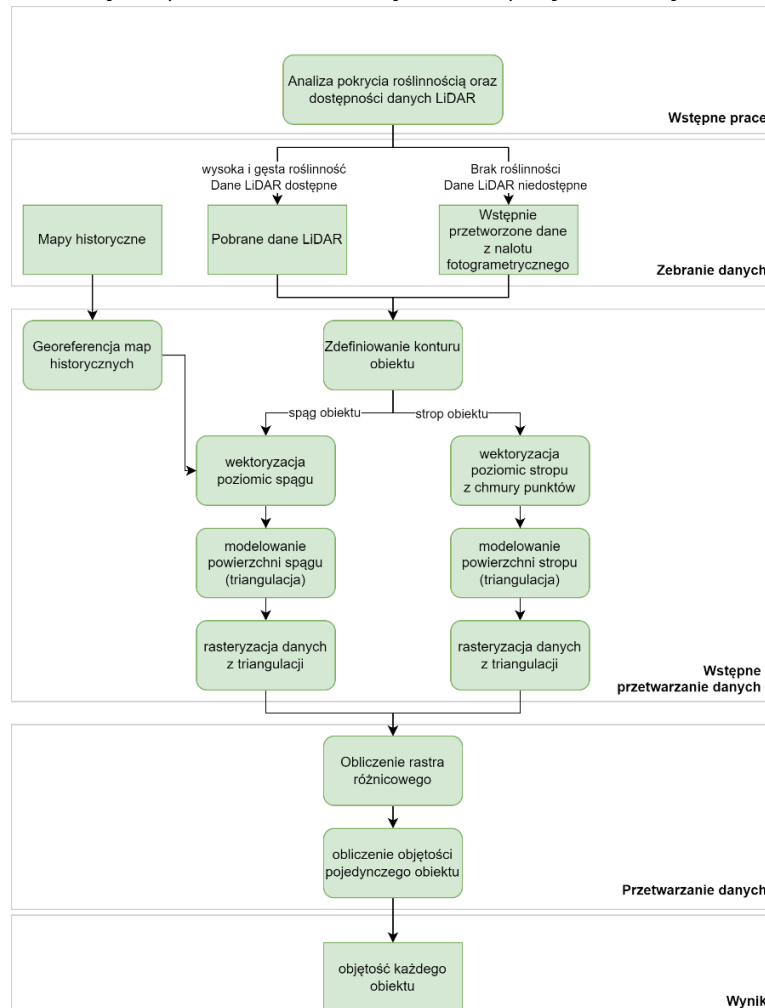
### 3.5.2. DBSCAN – gęstościowo-przestrzenne grupowanie danych

W celu połączenia hałd w obszary (klastry) wykorzystałem metodę Gęstościowego Grupowania Danych (ang. Density-Based Spatial Clustering of Applications and Noise, DBSCAN)<sup>[165]</sup>. Pozwoliła ona na zgrupowanie hałd poprzez poszukiwanie miejsc ich najgęstszego występowania. Do obliczeń wykorzystano bibliotekę Scikit-learn DBSCAN. Parametry dobrano tak, aby (1) zgrupować hałdy o najbardziej zbliżonej genezie złożowej, (2) osiągnąć możliwie małą ilość klastrów, (3) osiągnąć optymalną odległość skrajnych hałd od siebie.

### 3.5.3. Obliczenie objętości

W ramach pracy doktorskiej, ze względu na cel projektu oraz niedostateczne dane dostępne w bazie Hałdy, wypracowaliśmy wraz z zespołem (Paweł Trybała, Adam Górecki) metodę pozwalającą na systematyczne obliczanie objętości hałd przy zachowaniu jednej metodyki. Metoda ta wyróżnia się tym, że bierze pod uwagę spąg hałdy.

Logika metody dzieli się na 5 zasadniczych etapów: wstępne prace, zebranie danych, wstępne przetwarzanie danych, przetwarzanie danych oraz pozyskanie wyników (rys. 22).



Rys. 22. Logika proponowanego procesu obliczenia objętości obiektów antropogenicznych

Proces rozpoczyna się od pobrania dostępnych danych LiDAR dla analizowanego obszaru. W przypadku braku takich informacji możliwe jest wykorzystanie danych z nalotu fotografometrycznego. Jednocześnie należy pobrać dostępne dane historyczne (m.in. wspomniany powyżej Messtichblatter). Mapy historyczne są poddane georeferencji, a w miejscu styku obiektu z powierzchnią wyrysowywany jest jego kontur. Przygotowane w ten sposób materiały służą do określenia morfologii terenu przed powstaniem hałdy. Zwektoryzowane mapy są modelowane z wykorzystaniem triangulacji, a następnie tworzone są z nich rastry. Strop obiektu jest modelowany w sposób analogiczny. Oznacza to, że dane sprowadzane są do postaci rastrowej. Ostatnim etapem jest obliczenie rastra różnicowego oraz objętości obiektu.

Całość prac jest technicznie wykonywana przy wykorzystaniu programu ArcGIS Pro oraz funkcjonalności Model Builder, co pozwoliło na semi-automatyczne wykonanie całego procesu. Manualne prace związane są z: pobraniem danych, georeferencją map i wektoryzacją poziomic spągu. Szczegółowy schemat przedstawiony jest w zał. 1.



---

## Rozdział 4. Rezultaty badań – wprowadzenie

---





## 4.1. Proponowana metodyka identyfikacji potencjałów

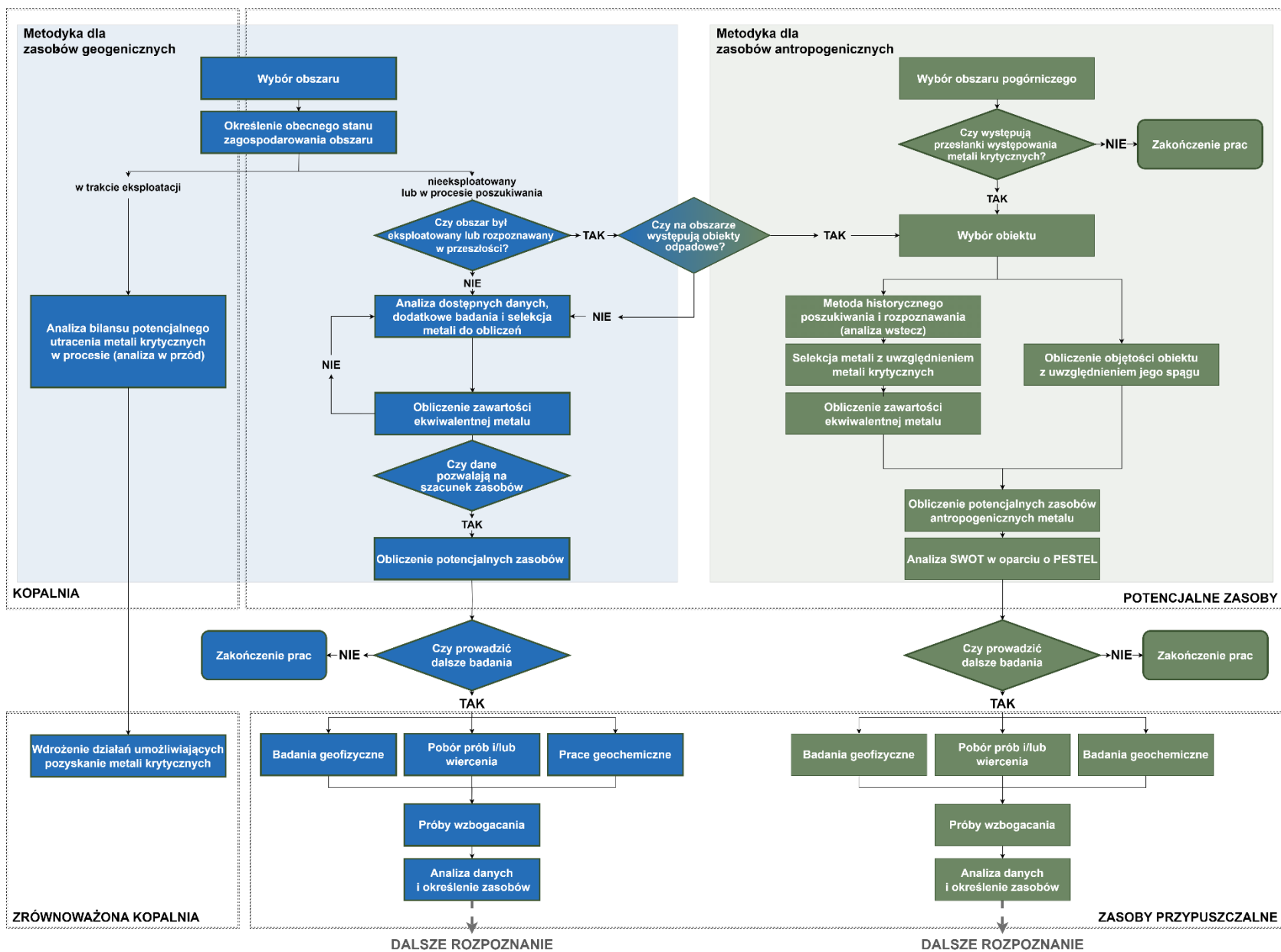
Zaproponowałem dwa warianty metodyki dla identyfikacji potencjału: jeden dotyczący zasobów geogenicznych, drugi – antropogenicznych (rys. 23). Pierwszy z nich rozpoczyna się od określenia czy złóż jest już eksploatowane, czy nie. Jeśli tak, kolejnym krokiem jest analiza całego procesu geologiczno-górniczego, zgodnie z zaproponowaną metodą. Prowadzi to do znalezienia miejsca, w którym następuje utrata metalu. Jeśli złóż nie jest eksploatowane, kolejnym etapem jest ustalenie, czy w przeszłości prowadzona była w tym miejscu działalność geologiczno-górnicza związana z zasobami rudy. Jeśli tak, zaproponowałem wykorzystanie metodyki dla zasobów antropogenicznych, aby zbadać rejon pod kątem ich występowania.

Następnie teren analizowany jest na podstawie dostępnych danych, aby wyselekcjonować metal główny i współwystępujące. Zebrane informacje wykorzystuje się do obliczenia zawartości ekwiwalentu głównego metalu na podstawie opracowanego równania. Można je porównać z wartością cut-off dla podobnych złóż, aby pomóc w podjęciu decyzji o kontynuowaniu pracy poszukiwawczo-rozpoznawczej. W kolejnym etapie proponuję wykorzystanie analizy SWOT (Strengths, Weaknesses, Obstacles, Threats) wraz z analizą PESTEL (political, economic, social, technological, environmental, legal). Zakończenie tego etapu pozwoli na określenie potencjalnych zasobów geogenicznych. Kolejnym, rekomendowanym krokiem jest prowadzenie prac, w których zaleca się wykorzystanie znanych technik wierceń oraz badań geofizycznych (z teledetekcją) i geochemicznych, aby móc udokumentować zasoby przypuszczalne i dalej pogłębiać wiedzę opartą na teoretycznych informacjach.

Druga ścieżka, przeznaczona do poszukiwania zasobów antropogenicznych, jest oparta o analogię do procesu dla złóż geogenicznych. Na podstawie prowadzonego w ramach pracy studium literatury, jak i prac badawczych została jednak dostosowana do realiów napotykanym przy analizowaniu obiektów odpadowych. Zaczyna się ona od wyboru obiektu, który w kolejnym kroku zostanie przeanalizowany w oparciu o autorską metodę historycznego poszukiwania i rozpoznawania. Pomaga ona wybrać metale wykorzystywane do obliczeń ekwiwalentu. Wzór został opracowany autorsko. Równolegle obliczana jest objętość i tonaż, wedle zaproponowanej procedury, pozwalającej na uzyskanie stosunkowo wysokich dokładności szacunku.

Kolejnym etapem jest obliczenie potencjalnych zasobów antropogenicznych rud metali. Na koniec zaproponowałem, podobnie jak w przypadku złóż geogenicznych, analizę SWOT (Strengths, Weaknesses, Obstacles, Threats) wraz z analizą PESTEL (political, economic, social, technological, environmental, legal). W ostatnim etapie rekomenduję prowadzenie dalszych kampanii poszukiwawczych z wykorzystaniem znanych technik wierceń oraz badań geofizycznych (z teledetekcją) i geochemicznych. Podsumowując, zaproponowane metodyki obejmują kolejno:

1. Dla zasobów geogenicznych:
  - 1) Wybór analizowanego obszaru.
  - 2) Określenie czy złóż jest już eksploatowane:
    - jeśli tak, analiza procesu geologiczno-górniczego w celu znalezienia strat metali krytycznych;
    - jeśli nie, kontynuacja metodyki według kolejnego punktu.
  - 3) Badanie historycznej działalności górniczej (jeśli istniała).
  - 4) Analiza dostępnych danych i wybór głównych i dodatkowych metali.
  - 5) Obliczenie równoważnika głównego metalu za pomocą opracowanego równania.
  - 6) Obliczenie zasobów, jeżeli dane na to pozwalają
  - 7) Dalsza eksploracja.



Rys. 23. Proponowana metodyka określenia identyfikacji potencjalnych zasobów geogenicznych i antropogenicznych oraz rekomendacje dla kopalń.

2. Dla zasobów antropogenicznych:
  - 1) Wybór obiektu (odkładane odpady górnicze, przetwórcze lub żużłowe).
  - 2) Analiza za pomocą opracowanej metody historycznego poszukiwania i eksploracji.
  - 3) Wybór metali do obliczeń.
  - 4) Obliczenie równoważnika metalu (z zastosowaniem innego równania niż dla złóż naturalnych).
  - 5) Obliczenie objętości i tonażu.
  - 6) Obliczenie potencjalnych zasobów antropogenicznych metali.
  - 7) Analiza SWOT oparta na analizie PESTEL.
  - 8) Dalsza eksploracja.

Metodyka obejmuje dwa warianty: jeden dotyczący zasobów geogenicznych oraz drugi, który koncentruje się na zasobach antropogenicznych. W przypadku naturalnych, metoda opiera się na analizie dostępnych danych, selekcji metali, obliczaniu ekwiwalentu i propozycji dalszych etapów eksploracji. W przypadku zasobów antropogenicznych, metoda obejmuje wybór obiektu, analizę historyczną, selekcję metali, obliczanie ekwiwalentu i ilości oraz propozycję dalszych etapów eksploracji.

## 4.2. Analiza ekonomiczna

### 4.2.1 Ceny produktów metali oraz wyznaczenie wskaźników cen dla ekwiwalentu

W ramach rozprawy przyjąłem jako interwał lata 2008-2022. Taki przedział pozwala na odzwierciedlenie kształtowania się cen surowców na rynkach. Są to najaktualniejsze dane (średnioroczne) na czas pisania rozprawy. Uwzględnienie piętnastoletniego okresu pozwala na uśrednienie zjawisk dziejących się na rynkach metali.

W wymienionych w rozdziale 3. raportach uwzględnione były ceny produktów zawierających poszczególne metale. Były to koncentraty, proszki, metale rafinowane, stopy, metale elektrolityczne, tlenki metali (zał. 2). Do analiz przyjąłem produkty kierując się dwoma głównymi kryteriami (1) dostępnością największej ilości danych w analizowanym okresie, (2) najwyższą zawartością metalu w produkcie. Kryteria te pozwoliły mi na osiągnięcie kwestii związanych z celem pracy, tj. otrzymaniem możliwie systematycznego podejścia do kwestii analizy ekonomicznej (dowolność doboru pierwiastków, otwarty dostęp do danych).

Wśród cen wszystkich metali zebranych z raportów najbardziej wyróżnia się rod (Rh), osiągający ceny przekraczające 500 000 000 US\$/t (2021-2022) oraz inne metale szlachetne, takie jak platyna (Pt), pallad (Pd) czy złoto (Au) oraz tlenki metali ziem rzadkich traktowane jako grupa (sumaryczna cena wszystkich REO). Cena tych metali odzwierciedla ich rzadkie występowanie oraz znaczenie w ważnych sektorach gospodarki. Należy do nich m.in. przemysł motoryzacyjny, w którym do produkcji katalizatorów wykorzystuje się rod, platynę i pallad. Złoto natomiast jest niezbędne dla mennictwa.

Stosunkowo niższe ceny, w granicach 100 000 – 1 500 000 US\$/t, są obserwowane dla poszczególnych metali należących do grupy tlenków metali ziem rzadkich. Są to także srebro, ren, tantal, german, gal, ind, stront, beryl, chrom. Do metali o cenach poniżej 100 000 US\$ za tonę zaliczają się niektóre z tlenków metali ziem rzadkich oraz lit, kobalt, cyna, nikiel, niob i molibden. W grupie bliskiej 10 000 US\$ lub niżej znajdują się głównie metale bazowe, czyli miedź, ołów, aluminium, mangan, cynk. Metale te są zwykle bardziej powszechne i mają szerokie zastosowanie w różnych sektorach, co czyni je nieodłącznym elementem rynku. Ceny takie prezentują także niektóre z tlenków metali ziem rzadkich jak samar, lantan i cer (rys. 24).

Po zebraniu danych dokonałem ustandaryzowania jednostek poprzez sprowadzenie wszystkich cen metali do dolara na tonę (\$/t). Przyjąłem następujące jednostki wagowe:

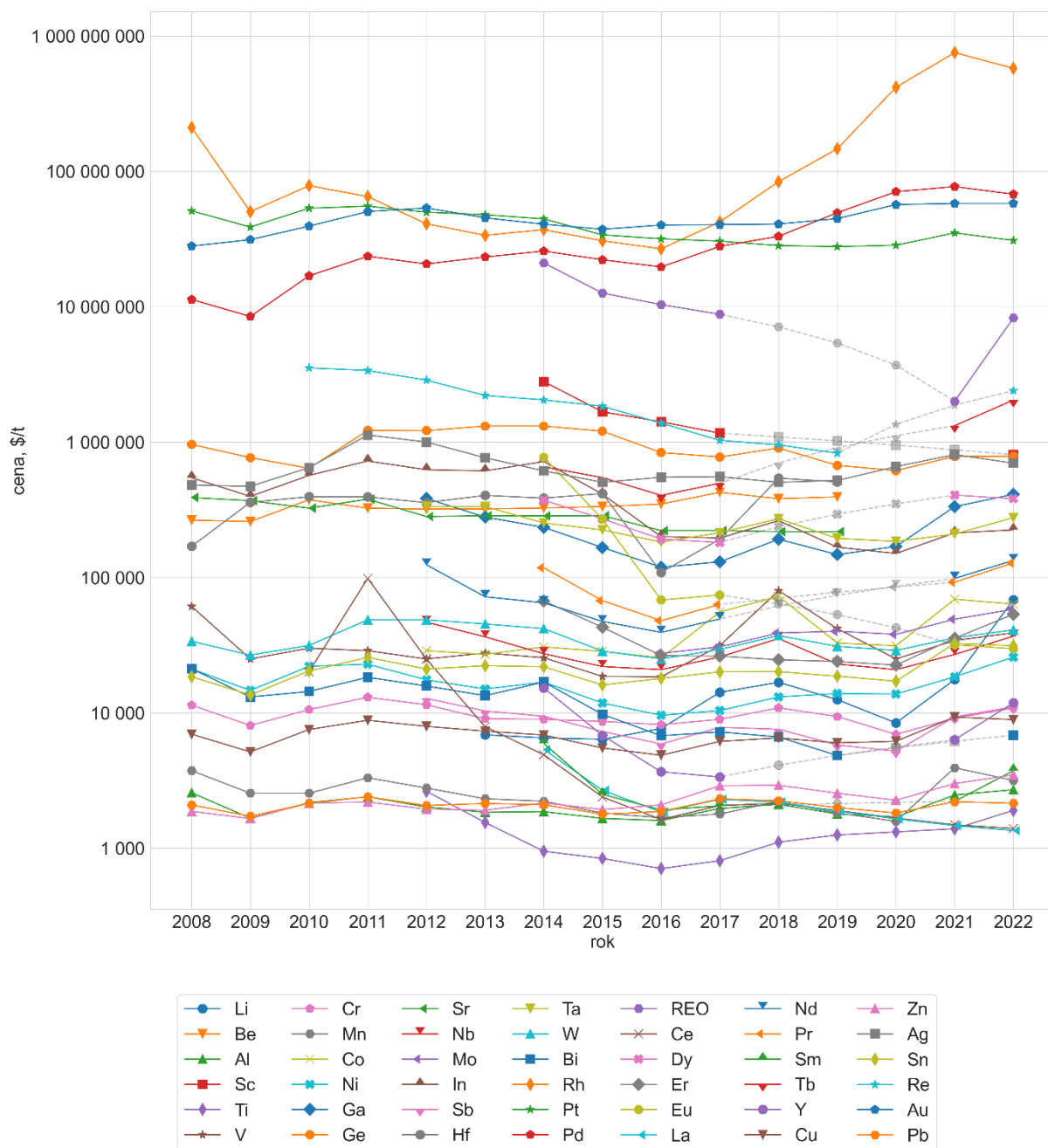
$$1 \text{ ozt} = 3,11035 \cdot 10^{-5} t$$

$$1 \text{ oz} = 2,83495 \cdot 10^{-5} t$$

$$1 \text{ kg} = 0,001 t$$

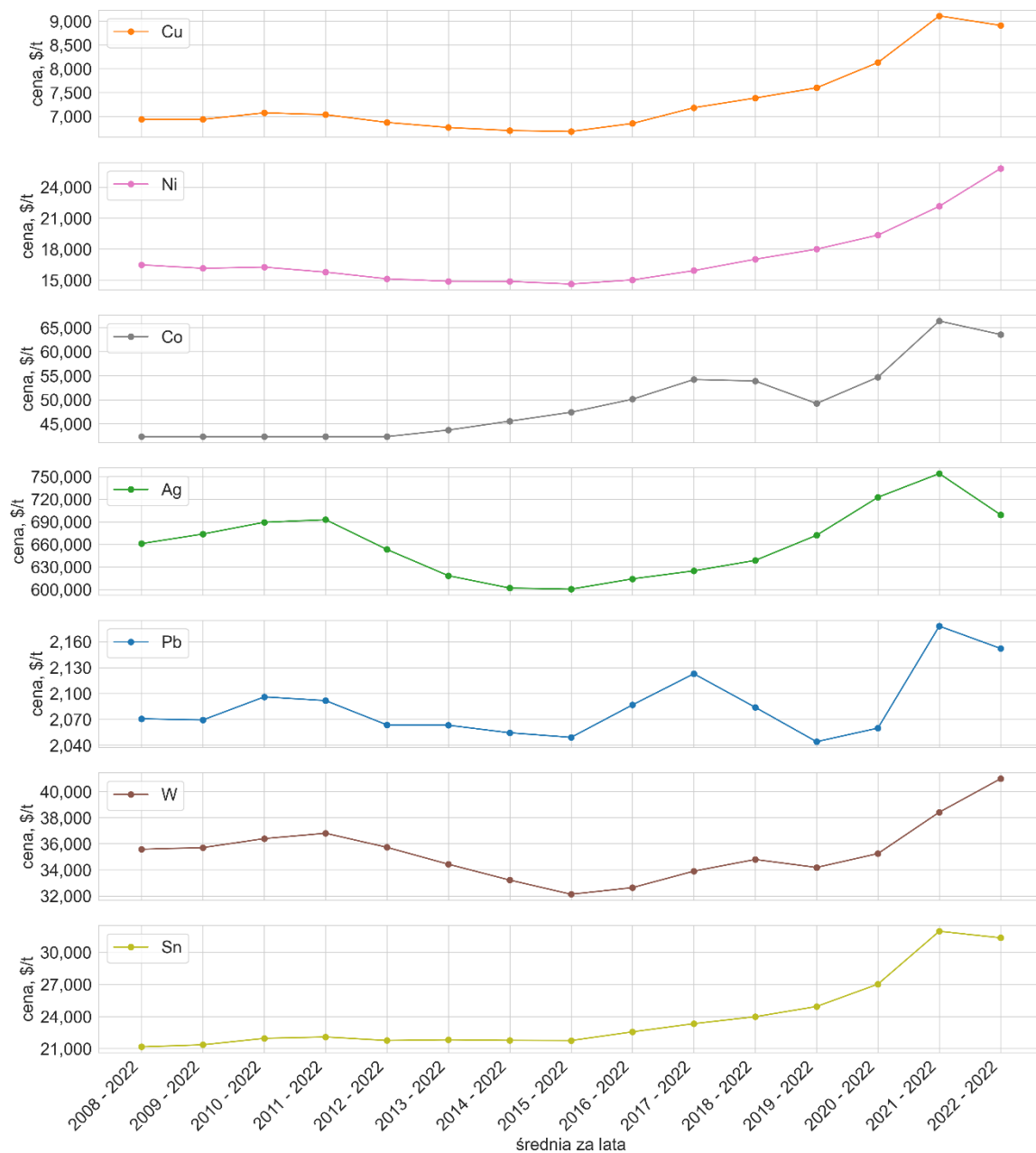
oraz przelicznik chińskiej waluty (kurs na styczeń 2023):

$$1 \text{ RMB} = 0,148 \$$$



Rys. 24. Średnioroczne ceny produktów metali w okresie 2008-2022. Opracowanie własne na podstawie danych BGR

Ustandaryzowanie pozwala na obliczenie średnich cen dla metali w kolejnych przedziałach czasowych (rys. 25). Wizualizacja tych danych pokazuje, że dla większości metali dłuższy okres obliczanej średniej powoduje, że zbliża się ona do jednej wartości. W przypadku skrócenia badanego czasu, wartości dynamicznie zmieniają się dla kolejnych lat. Średnie ceny dla każdego z pierwiastków i okresów są umieszczone w zał. 2.



Rys. 25. Wykres średni cen metali w rosnących przedziałach czasu począwszy od roku 2008.

W rozprawie doktorskiej zaproponowałem ujęcie zarówno cen długoterminowych (piętnastoletnich), w postaci składnika stanowiącego  $\frac{2}{3}$  przyjętej ceny dla metalu, jak i cen krótkoterminowych (ostatnio rocznych) jako  $\frac{1}{3}$  całej ceny (wzór (1)).

$$cena_x = \frac{2}{3} \cdot cena\ \acute{s}rednia_x + \frac{1}{3} \cdot cena\ aktualna_x \quad (1)$$

gdzie:

$cena_x$  – cena wybranego metalu

$cena\ \acute{s}rednia_x$  – średnia cena metalu w ostatnich 15 latach

$cena\ aktualna_x$  – aktualna cena metalu (z ostatniego analizowanego roku)

Tak przyjęte założenia pozwalają na połączenie dwóch technicznych i fundamentalnych problemów: (1) ujęcia historycznych zmian w cenie metalu (średnia z ostatnich 15 lat), (2) uwzględnieniu obecnej ceny. W przypadku (1) jest to szeroko rozpowszechniona praktyka w branży górniczej, która pozwala na analizę ekonomiczną inwestycji w projekty górnicze. Ma ona na celu wzięcie pod uwagę długoterminowej średniej ceny dla metalu (np. 15, 20 lub 25 lat). Natomiast (2) pozwala na odwzorowanie dynamiki rynku metali, na którym w ostatnich latach obserwowane są fluktuacje. Są one związane zarówno z takimi wydarzeniami, jak pandemia COVID-19 oraz inwazja Rosji na Ukrainę, ale także z trendami w przeobrażaniu się gospodarek na bardziej nowoczesne, cyfrowe i niskoemisyjne.

W celu lepszego zobrazowania wyników wykonałem analizy wskaźnika miedzi, licząc stosunek ceny każdego z metali do ceny miedzi (tab. 12). Takie przeliczenie może zostać wykonane w prosty sposób dla dowolnego metalu (rys. 26)

$$scm_x = \frac{cena_x}{cena_{MeG}} \quad (2)$$

Gdzie:

$cena_x$  – cena wybranego metalu

$cena_{MeG}$  – cena wybranego metalu głównego

Podsumowując, do oceny potencjału złożowego niezbędne jest wykorzystanie narzędzi ekonomicznych. Jednym z nich jest metal ekwiwalentny, który pozwala na przeliczenie zawartości licznych metali do zawartości głównego metalu w złożu. W przedstawionym ujęciu proponuję zastosować następujące kroki:

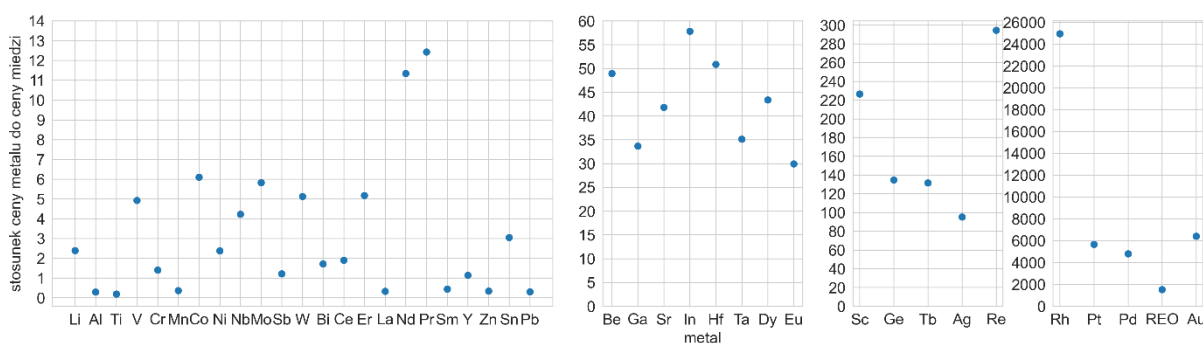
1. zebranie danych dotyczących cen rynkowych metali;
2. sprowadzenie cen do wspólnej jednostki;
3. podjęcie decyzji, który metal jest głównym w potencjalnym złożu;
4. obliczenie wskaźnika dla metali krytycznych w oparciu o założenia:
  - a.  $\frac{2}{3}$  na podstawie średniej ceny z ostatnich 15 lat;
  - b.  $\frac{1}{3}$  na podstawie ceny z ostatniego roku;
5. obliczenie metalu ekwiwalentnego (rozdziały 4 oraz 5).

Tab. 12. Wskaźniki ilorazu cen poszczególnych metali w stosunku do wybranego metalu głównego

	Ni 2008-2022	Ni 2022	scm	Cu 2008-2022	Cu 2022	W <sub>MK</sub>	W 2008-2022	W 2022	scm
Li	1,01	2,65	<b>1,55</b>	2,39	7,68	<b>4,15</b>	0,49	1,76	<b>0,91</b>
Al	0,12	0,11	<b>0,12</b>	0,29	0,30	<b>0,30</b>	0,06	0,07	<b>0,06</b>
Ti	0,08	0,07	<b>0,08</b>	0,19	0,21	<b>0,20</b>	0,04	0,05	<b>0,04</b>
V	2,07	1,51	<b>1,88</b>	4,92	4,38	<b>4,74</b>	1,00	1,00	<b>1,00</b>
Cr	0,59	0,42	<b>0,53</b>	1,40	1,22	<b>1,34</b>	0,28	0,28	<b>0,28</b>
Mn	0,15	0,12	<b>0,14</b>	0,36	0,36	<b>0,36</b>	0,07	0,08	<b>0,08</b>
Co	2,57	2,46	<b>2,53</b>	6,10	7,13	<b>6,45</b>	1,24	1,63	<b>1,37</b>

Ni	1,00	1,00	1,00	2,37	2,90	2,55	0,48	0,66	0,54
Ga	14,17	15,93	14,76	33,65	46,16	37,82	6,84	10,55	8,08
Ge	56,73	30,52	47,99	134,69	88,39	119,26	27,38	20,20	24,99
Nb	1,78	1,43	1,66	4,23	4,14	4,20	0,86	0,95	0,89
Mo	2,45	2,26	2,39	5,82	6,54	6,06	1,18	1,50	1,29
Sb	0,51	0,43	0,48	1,21	1,24	1,22	0,25	0,28	0,26
W	2,16	1,59	1,97	5,13	4,60	4,95	1,04	1,05	1,05
Pt	2378,40	1196,94	1984,58	5646,98	3467,13	4920,37	1147,85	792,48	1029,39
Pd	2016,74	2626,84	2220,10	4788,28	7609,07	5728,54	973,30	1739,20	1228,60
Rh	10 507,33	22 353,86	14456,17	24 947,28	64 751,61	38 215,39	5070,98	14 800,23	8314,06
REO	638,40	320,08	532,29	1515,74	927,17	1319,55	308,10	211,92	276,04
Y	0,48	0,46	0,47	1,14	1,33	1,20	0,23	0,30	0,26
La	0,14	0,05	0,11	0,33	0,15	0,27	0,07	0,04	0,06
Ce	0,80	0,05	0,55	1,90	0,16	1,32	0,39	0,04	0,27
Pr	5,23	4,97	5,14	12,43	14,39	13,08	2,53	3,29	2,78
Nd	4,78	5,18	4,91	11,34	15,01	12,57	2,31	3,43	2,68
Sm	0,19	0,15	0,17	0,44	0,42	0,43	0,09	0,10	0,09
Eu	12,60	1,15	8,78	29,91	3,34	21,05	6,08	0,76	4,31
Tb	55,38	79,19	63,32	131,48	229,40	164,12	26,73	52,43	35,30
Dy	18,27	14,80	17,11	43,37	42,87	43,20	8,82	9,80	9,14
Er	2,18	2,07	2,14	5,17	6,00	5,45	1,05	1,37	1,16
Cu	0,42	0,35	0,40	1,00	1,00	1,00	0,20	0,23	0,21
Zn	0,14	0,14	0,14	0,34	0,39	0,36	0,07	0,09	0,08
Ag	40,14	27,09	35,79	95,30	78,47	89,69	19,37	17,94	18,89
Sn	1,29	1,22	1,26	3,05	3,52	3,21	0,62	0,80	0,68
Re	124,05	92,97	113,69	294,53	269,30	286,12	59,87	61,55	60,43
Au	2692,39	2246,25	2543,67	6392,46	6506,62	6430,51	1299,38	1487,21	1361,99
Pb	0,13	0,08	0,11	0,30	0,24	0,28	0,06	0,06	0,06

Ze względu na warunki polskie, jak i globalną sytuację, jednym z najistotniejszych pierwiastków jest miedź. Jak pokazują obliczone wskaźniki, cena tego metalu jest nawet 65 000 razy niższa od ceny najdroższego metalu, ponad 6 razy od kobaltu i ponad 2 razy od niklu.



Rys. 26. Stosunek cen metali do ceny miedzi.

#### 4.2.2 Wzór na metal ekwiwalentny dla potencjalnych zasobów geogenicznych i antropogenicznych

Wskaźniki wyznaczone w podrozdziale 4.2.1. służą do obliczenia wartości metalu ekwiwalentnego ( $M_{eq}$ ) dla potencjalnych zasobów geogenicznych oraz antropogenicznych (w próbce, profilu otworu lub zasobie):

$$M_{eq} = M_{eq} = \%Me_G + \sum_{n=1} \%Me_x \cdot scm_x [\%] \quad (3)$$

gdzie:

$\%Me_G$  – zawartość metalu głównego w analizowanej próbce, profilu, zasobie

$\%Me_x$  – zawartość kolejnych metali w analizowanej próbce, profilu, zasobie

$scm_x$  – stosunek cen kolejnych metali w analizowanej próbce, profilu, zasobie do ceny głównego metalu

#### 4.2.3 Szacunek wartości potencjalnego zasobu antropogenicznego

Kwestia potencjału zasobów antropogenicznych jest obecnie na bardzo wczesnym stadium rozwoju. Problematyka ta zmagają się z wieloma wyzwaniami, które często nie wykraczają poza prace koncepcyjne. Brak jest też jednolitych standardów oraz systematyki w badaniach prowadzonych w różnych miejscach na świecie, w Europie czy Polsce. Do głównych wyzwań należy zebranie danych pozwalających na szacunek zasobowy poszczególnych obiektów, jak i ich zbiorów. Aby takowe dane uzyskać, należy przeprowadzić szereg prac poszukiwawczo-rozpoznawczych. Na tę chwilę nie dają one satysfakcjonujących wyników ze względu na:

- trudną do zrozumienia oraz zbadania wewnętrzną strukturę obiektów, wynikającą z chaotycznych procesów ich powstawania oraz późniejszego, często nieudokumentowanego przeobrażenia;
- różny charakter poszczególnych obiektów odpadowych;
- małą zawartość metali oraz innych potencjalnych składników użytecznych o dużej wartości ekonomicznej.

Swego rodzaju systematykę proponuje UNFC we frameworku dla zasobów antropogenicznych (2018) (ang. anthropogenic resources). Są to jednak wytyczne ogólne i na wstępnym etapie powstawania. Innym źródłem, ujmującym tematykę w sposób całościowy, jest *Mining, Processing and Smelter Dumps – Handbook for Exploration and Recovery Methods for Secondary Raw Material Deposits* (2022)<sup>[91]</sup>. To również praca na średnio-zaawansowanym etapie, układająca pojedyncze badania na obiektach odpadowych w logiczną całość.

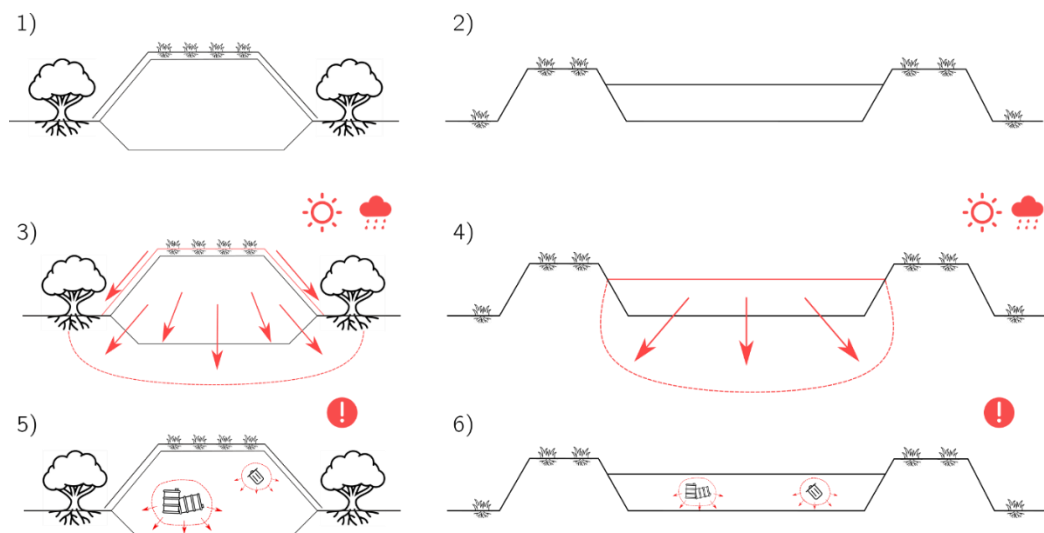
Sytuacja ta powoduje, że już na poziomie ogólnego tworzenia konceptu, trudne jest założenie potencjalnej wewnętrznej struktury obiektu, a prognozy dotyczące warstwowania czy występowania niskiej zmienności są obarczone bardzo dużym błędem. W niniejszej pracy, ze względu na te czynniki, przyjęto założenie o jednorodności wewnętrznej struktury obiektu (rys. 27) z podziałem na hałdę/składowisko (model 1) oraz osadnik (2). Jest to założenie bezpieczne, a tak utworzone modele pozwalają na systematyczne spojrzenie na zróżnicowane obiekty odpadowe.

Model 1 jest obrazem gromadzenia odpadów górniczych, żużli, popiołów oraz odpadów komunalnych, natomiast model 2 odzwierciedla konceptualnie osadniki poflotacyjne (miedź, węgiel, baryt i in.). Podejście takie jest zgodne z założeniami współczesnej gospodarki cyrkularnej – zagospodarowanie całego obiektu oraz unikanie składowania.

Niezbędne jest rozpatrzenie czynników wpływających na tak utworzony model. Należą do nich możliwe występowanie:

- warstwy powierzchniowej o genezie odmiennej od obiektu;
- roślinności zielonej oraz drzewnej, wpływającej zarówno na skład chemiczny warstwy przypowierzchniowej, jak i limitujący dostępność powierzchni do badań;
- procesów wtórnych przemian w warstwie przypowierzchniowej, wynikających z działania czynników atmosferycznych;
- procesów migracji składników do głębszych stref obiektu oraz poza obiekt (odcieki) ze względu na infiltrację i rozpuszczanie związane z deszczami oraz obecnością wód gruntowych i bliskością cieków wodnych.





Rys. 27. Przyjęte modele obiektów oraz możliwe wpływy na ich potencjał jak i zagrożenia związane z eksploatacją 1) schemat przyjętego modelu hałdy, 2) schemat przyjętego modelu osadnika, 3) hałda i procesy wpływające na jej charakterystykę, 4)

Określanie potencjału ekonomicznego obiektów antropogenicznych należy, w kontekście opisanych w pracy założeń, opierać na zasadach takich jak: (1) dbałość o środowisko i osiągnięcie zysków ekonomicznych wynikających z jego szanowania, (2) wdrażanie Gospodarki o Obiegu Zamkniętym poprzez maksymalne wykorzystanie dostępnego zasobu<sup>[166,167]</sup>. Takie ujęcie powoduje, że potencjalną wartość hałdy należy obliczać przy uwzględnieniu szeregu metali w niej występujących, ale także innych zysków stanowiących wartość, np. sprzedaż pozostałych surowców czy oczyszczonego terenu.

Pierwszym z czynników jest wartość metalu ekwiwalentnego w obiekcie:

$$W_{Meq} = M_{eq} \cdot \text{masa obiektu} \cdot \text{cena}_{MeG} \text{ [PLN]} \quad (4)$$

gdzie:

$M_{eq}$  – zawartość metalu ekwiwalentnego w obiekcie

masa obiektu – masa całego obiektu

$\text{cena}_{MeG}$  – cena metalu głównego

Drugim z czynników jest wartość terenu odzyskanego po eksploatacji obiektu:

$$W_{te} = \text{cena rynkowa działki} \cdot \text{powierzchnia odzyskanego terenu} \text{ [PLN]} \quad (5)$$

gdzie:

cena rynkowa działki – cena za  $m^2$  działki ustalona na podstawie aktualnych cen rynkowych

powierzchnia odzyskanego terenu – sumaryczna powierzchnia odzyskanego terenu

Trzecim z proponowanych czynników jest wartość kopalin towarzyszących odzyskanych w trakcie eksploatacji i przeróbki obiektu. Jest to suma wszystkich wytworzonych i sprzedanych produktów.

$$W_{kt} = \sum_{n=1} W_{kt_n} [PLN] \quad (6)$$

gdzie:

$W_{kt_n}$  – wartość kolejnych kopalin towarzyszących

Trzy wymienione czynniki składają się na potencjalną wartość obiektu antropogenicznego ( $PW_{o.a.}$ ).

$$PW_{o.a.} = W_{Meq} + W_{te} + W_{kt} [PLN] \quad (7)$$

### 4.3. Analizy wprowadzające dla potencjalnych projektów geologiczno-górnich dla zasobów antropogenicznych metali krytycznych

Opisana w doktoracie problematyka prowadzenia badań poszukiwawczo-rozpoznawczych jest jednym z wielu czynników wpływających na fakt, że mimo występowania potencjału surowcowego nie dochodzi do rozpoczęcia działalności górniczej. W celu usystematyzowania tego zagadnienia dokonano analizy każdego etapu cyklu potencjalnego projektu geologiczno-górnich dla obiektów odpadowych, w porównaniu do stanu obecnego, w podziale na obszary: ekonomiczny, środowiskowy, prawny, techniczny oraz społeczno-zarządczy <sup>[166]</sup> (tab. 13).

Istniejące obiekty (hałdy, osadniki) są obciążeniem w każdym z analizowanych obszarów, co powoduje, że tylko w nielicznych przypadkach ich eksploatacja mogłaby wywołać negatywny wpływ. Wynika to w głównej mierze z odpadowego charakteru tych obiektów, a więc traktowania ich dotychczas jako materiału zbytecznego i często szkodliwego środowiskowo. Rozpoczęcie działalności górniczej na analizowanych obiektach ma swoje specyficzne ramy, odróżniające ich eksploatację od eksploatacji złóż geogenicznych. Wśród tych różnic wskazuje się: (1) ich stosunkowo małą powierzchnię, (2) ich rozproszenie na większych obszarach, (3) trudność w rozpoznaniu i wycenie, (4) stosunkowo małą dostępność technologii przerobu dla źródeł odpadowych, (5) niejednoznaczne ramy prawne dla dokumentowania i eksploataowania hałd i osadników.

Analiza wpływu poszczególnych obszarów na każdym etapie cyklu górniczego pozwoliła na określenie kluczowych wyzwań, do których należy ekonomika i techniczno-technologiczne rozwiązania w zakresie poszukiwania i rozpoznawania potencjalnych złóż antropogenicznych, czynniki środowiskowe związane z prowadzeniem działalności górniczej oraz z odpowiednim przeprowadzeniem procesu rekultywacji, czynniki związane z niejasną sytuacją prawną złóż antropogenicznych oraz pozyskiwaniem pozwoleń środowiskowych. Dodatkowo istotne są aspekty techniczno-technologiczne przeróbki kopalin, które byłyby dostosowane do niskiej zawartości składników użytecznych oraz gospodarki o obiegu zamkniętym. Jako kluczowe określono także czynniki techniczno-technologiczne oraz społeczno-gospodarcze prowadzenia procesu rekultywacji. Istotą tego etapu jest takie zaprojektowanie uwolnionego terenu, aby było możliwe uzyskanie przyzwolenia społeczności lokalnej (tab. 14).

Tab. 13. Analiza wyzwań dla projektów geologiczno-górnich dla obiektów antropogenicznych na każdym etapie cyklu życia projektu

Etap cyklu życia projektu	Obszary					
	ekonomiczne	środowiskowe	prawne	techniczne	społeczno-zarządcze	
Obecny stan		czynnikami związane z istniejącą hałdą: pylenie; zanieczyszczenie wód podziemnych i powierzchniowych, emisja gazów, zajęcie terenów, wpływ anomalnych zjawisk pogodowych (np. rozmycie hałdy w trakcie ulewy), wpływ na faunę i florę	sprowadzenie wymogom środowiskowym dla istniejących obiektów	monitoring wpływu na środowisko; techniczne prace zabezpieczające hałdy (stacjonarność skarp, prace geotechniczne)	protesty społeczne dotyczące wpływu istniejących hałd na środowisko; nieformalne eksploatawanie hałd	
Poszukiwanie i rozpoznawanie	bariery	ocena potencjału ekonomicznego; zainteresowanie biznesu projektami geologiczno-górnymi	wpływ technologii wiercenia na środowisko (płuczka, zwierciny, hałas, przygotowanie terenu pod wiercenia)	uzyskanie pozwoleń na prowadzenie prac na terenach o różnej własności wieczystej; sprośnienie wymogom PGiG	dobór metod poszukiwawczych i rozpoznawczych dla heterogenicznego depozytu; dobór metod do rozpoznania możliwych zagrożeń	niechęć społeczności lokalnej do możliwości zmian w ich regionie; zapewnienie bezpieczeństwa pracownikom i społeczności; zatrudnienie wyspecjalizowanej kadry
	czynniki stymulujące	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym; zatrudnienie wyspecjalizowanej kadry
Udostępnienie	bariery	optymalizacja procesu górniczego oraz przerobczego dla małych, rozproszonych złóż (lokalizacja infrastruktury, zakładu przerobczego); identyfikacja odbiorców dla wszystkich produktów (GOZ); projektowanie ekonomiki krótkoterminowej działalności górniczej; wydatki na zaspokojenie roszczeń	wpływ działalności górniczej na środowisko (urban mining)	zmiana sposobu wykorzystania terenu (np. hałdy będące miejscami turystyki lub geostanowiskami); problemy koncesji złóż antropogenicznych, które nie są ujęte w prawie geologicznym i górniczym; powstanie roszczeń i ich rekompensaty (szkody infrastruktury); sprośnienie wymogom PGiG	zaprojektowanie odpowiedniego sposobu udostępnienia, by ograniczyć negatywny wpływ na środowisko; dostosowanie infrastruktury do rodzaju inwestycji (drogi, budynki)	niechęć społeczności lokalnej wynikająca ze strachu przed możliwymi zagrożeniami wynikającymi z procesu górniczego; zapewnienie bezpieczeństwa pracownikom i społeczności; możliwość wykorzystania usług lokalnych przedsiębiorców; nadmierna eksploatacja istniejącej infrastruktury (budynki, drogi); zatrudnienie wyspecjalizowanej kadry
	czynniki stymulujące	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym; zatrudnienie wyspecjalizowanej kadry
Eksploatacja	bariery	wydatki na zaspokojenie roszczeń	wpływ na środowisko i zdrowie człowieka w trakcie eksploatacji (zapylenie, hałas, zanieczyszczenie wód); możliwe uruchomienie dodatkowych procesów (np. przebiecie zbiorników odpadów chemicznych wewnątrz hałdy)	sprowadzenie wymogom środowiskowym; powstanie roszczeń i ich rekompensaty (szkody infrastruktury); sprośnienie wymogom PGiG	zaprojektowanie odpowiedniego sposobu eksploatacji, by ograniczyć negatywny wpływ na środowisko	protesty społeczne dotyczące wpływu eksploatacji obiektu na środowisko; zatrudnienie wyspecjalizowanej kadry; zapewnienie bezpieczeństwa pracownikom i społeczności

Etap cyklu życia projektu		Obszary				
		ekonomiczne	środowiskowe	prawne	techniczne	społeczno-zarządcze
	czynniki stymulujące	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym; generowanie przychodów z inwestycji, zasilanie budżetu lokalnego	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym; możliwość wykorzystania usług lokalnych przedsiębiorców; zatrudnienie wyspecjalizowanej kadry
Przeróbka	bariery		użytkowanie odczynników i odpadów	sprostanie wymaganiom środowiskowym; powstanie roszczeń i ich rekompensaty (szkody infrastruktury)	dostosowanie znanych metod przerobczych do charakteru odpadów; rozwój nowych metod przerobczych; projektowanie technologii przerobu przy odniesieniu do gospodarki obiegu zamkniętego (bez pozostawiania odpadów)	zatrudnienie wyspecjalizowanej kadry; zapewnienie bezpieczeństwa pracownikom i społeczności
	czynniki stymulujące	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym; generowanie przychodów ze sprzedaży produktów i odpadów; zasilanie budżetu lokalnego	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym; możliwość wykorzystania usług lokalnych przedsiębiorców; zatrudnienie wyspecjalizowanej kadry
Zamknięcie	bariery	wydatki na likwidację		sprostanie wymaganiom środowiskowym; powstanie roszczeń i ich rekompensaty (szkody infrastruktury)		zapewnienie bezpieczeństwa pracownikom i społeczności; zapewnienie transparentności procesu (samorząd, społeczność lokalna)
	czynniki stymulujące	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym; zatrudnienie wyspecjalizowanej kadry
Rekultywacja	bariery	poniesienie kosztów rekultywacji i zniwelowania zagrożeń środowiskowych; koszty monitoringu i oceny środowiskowej	ocena stanu środowiska po rekultywacji; monitoring środowiskowy	sprostanie wymaganiom środowiskowym	monitoring wpływu na środowisko; dobór technologii pozwalające na zniwelowanie zagrożeń środowiskowych	projektowanie odpowiedniego kierunku rekultywacji terenu przy rozpatrzeniu potrzeb społeczności lokalnej; zapewnienie transparentności procesu (samorząd, społeczność lokalna)
	czynniki stymulujące	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym; pozostawienie terenu bez obserwowanego przed inwestycją wpływu na środowisko	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym	zniesienie czynników związanych ze stanem obecnym

Tab. 14. Ocena istotności wyzwań dla projektów geologiczno-górnich dla obiektów antropogenicznych

Etap cyklu życia projektu	Obszary				
	ekonomiczne	środowiskowe	prawne	techniczno-technologiczne	społeczno-gospodarcze
Poszukiwanie i rozpoznawanie	++++	+++	+++	++++	+
Udostępnienie	++	++++	++++	+++	+++
Eksploatacja	+	++++	++	+	++
Przeróbka	+++	++++	++	++++	++
Zamknięcie	+	+++	++	+++	++
Rekultywacja	+++	++++	+++	++++	++++

skala wyzwań: + małe, ++ średnie, +++ duże, ++++ kluczowe



---

Rozdział 5. Geosfera – potencjał Dolnego Śląska jako obszaru pozyskania metali krytycznych ze źródeł geogenicznych

---

Zawarte w tym rozdziale badania były opisane i przedstawione w poniższych:

1. publikacjach:

- Kaczan W., Kudełko J., Wirth H., Szklary nickel deposit – a review and introduction to attempts in hydrometallurgical processing. *Mineral Economics*. 2021, s. 1-8.
- Kaczan W., Geologiczny profil ociosów historycznych wyrobisk Podziemnej Trasy Edukacyjnej w Szklarach. *Hereditas Minariorum*. 2017, vol. 4, s. 231-240. ISSN: 2391-9450.

2. materiałach pokonferencyjnych:

- Merlo A., Kaczan W., Leonard G., Wirth H., Assessing the environmental pertinence of cobalt exploitation from slag in KGHM mines. *Environmental Sciences Proceedings*. 2021, vol. 9, nr 1, art. 33, s. 1-5. ISSN: 2673-4931.
- Kaczan W., Wirth H., Preliminary analysis of Szklary deposit (SW Poland) in the aspect of critical metals occurrence with respect to the circular economy. W: XIX Conference of PhD Students and Young Scientists: Interdisciplinary topics in mining and geology: Sosnówka near Karpacz, Poland, May 29-31, 2019 / ed. Jan Blachowski. [Melville, NY]: AIP Publishing, 2020. art. 030001, s. 1-6. ISBN: 978-0-7354-1960-5.

3. referatach konferencyjnych:

- Kaczan W., Wirth H., A review of the geochemical characteristics of the Niemstów-Wielowieś area and its exploration significance, Lower Silesia, Poland, XX Conference of PhD Students and Young Scientists, 2020.



„Tylko czy tort światowej gospodarki może rosnąć w nieskończoność? Każdy tort wymaga surowców i energii. Czarnowidze ostrzegają, że prędzej czy później *homo sapiens* wyczerpie wszystkie surowce i zasoby energetyczne planety Ziemia. Co wtedy?

...

Wszelako przeszłość dostarcza dowodów na to, że [surowce] ograniczone są tylko w teorii. Ilekroć pojawiała się groźba, że niedobór energii bądź surowców spowolni wzrost gospodarczy, tylekroć zwiększano inwestycje w badania naukowo-techniczne, które przynosiły nie tylko efektywniejsze metody eksploatacji tradycyjnych zasobów, ale także zupełnie nowe rodzaje energii i surowców”

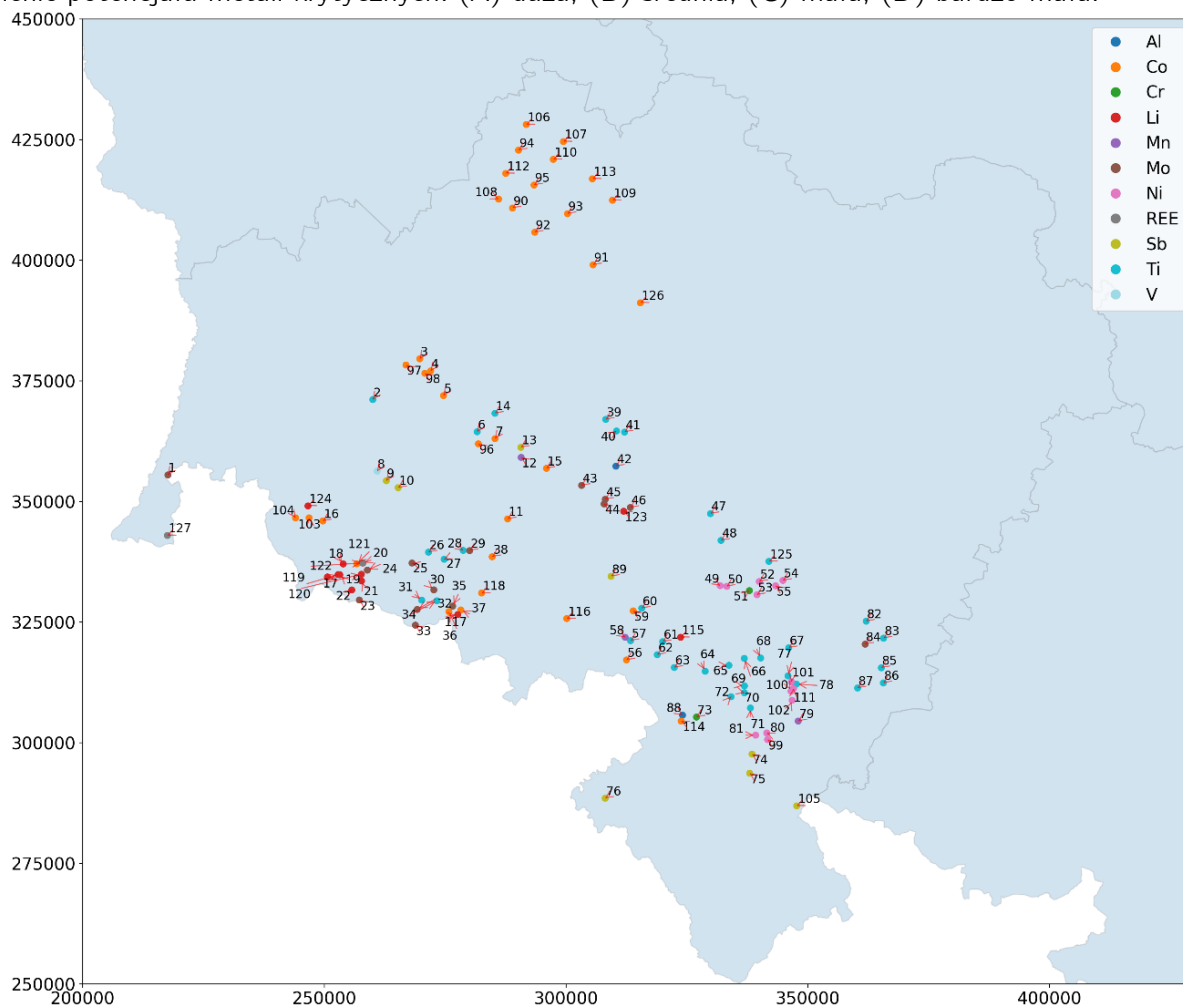
Yuval Noah Harrari



## 5.1. Baza danych miejsc występowania metali krytycznych na Dolnym Śląsku i selekcja obszarów istotnych

W pierwszym kroku do zrozumienia potencjału Dolnego Śląska stworzyłem autorską bazę danych miejsc o udokumentowanym wystąpieniu analizowanych pierwiastków (rys. 28). Zarys potencjału Dolnego Śląska w kontekście jego metalonośności został przedstawiony w studium literatury (Rozdział 2). W tej części natomiast dokonuję zestawienia wszystkich lokalizacji, które w ramach badań zostały zgromadzone w bazie przestrzennej (zał. 3). Posłużyły do tego rzetelne źródła, takie jak *Metalogeneza* (1966), *Ocena Perspektyw* (2009), *Bilans Zasobów Kopalin* (2021), *Bilans Zasobów Perspektywicznych*, baza Frame, artykuły naukowe oraz własne prace badawcze.

Charakter geologiczny Dolnego Śląska powoduje, że na jego obszarze stwierdzono obecność prawdopodobnie wszystkich pierwiastków, które mogą występować w stabilnej formie na powierzchni Ziemi. W toku prac skupiłem się na obszarach, w których stwierdzono co najmniej przejaw mineralizacji metalu krytycznego. Ostateczna wersja bazy zawiera 127 miejsc występowania metali krytycznych, takich jak aluminium, kobalt, lit, chrom, mangan, molibden, nikiel, pierwiastki ziem rzadkich, antymon, tytan i wanad. Jednak w postaci złoża wskazano wyłącznie występowanie niklu. Wytypowane obszary podzieliłem na 3 klasy. Kryterium była szansa na określenie potencjału metali krytycznych: (A) duża, (B) średnia, (C) mała, (D) bardzo mała.



Rys. 28. Mapy występień metali krytycznych na Dolnym Śląsku, opracowanie własne

Do pierwszej z nich zaliczyłem miejsca:

- gdzie jest udokumentowane występowanie metalu krytycznego przekraczającego w próbach wartości klarkowe;
- aktywnej działalności górniczej lub znana jest perspektywa jej uruchomienia w odniesieniu do samego metalu krytycznego lub innych kopalin (wydane koncesje, opisanie w bilansie zasobów itp.).

Do drugiej (B) zaliczyłem te:

- gdzie jest udokumentowane występowanie metalu krytycznego przekraczającego w próbach wartości klarkowe;
- gdzie brak aktywności górniczej i nieznana jest perspektywa jej uruchomienia;
- z dodatkowymi ograniczeniami (środowiskowe, prawne).

Do klasy (C) zaliczyłem obszary o najmniejszej istotności, gdzie:

- jest udokumentowane występowanie metalu krytycznego przekraczającego w próbach wartości klarkowe.

Do klasy (D) klasyfikują się miejsca:

- bez aktywności górniczej i nieznana jest perspektywa ich uruchomienia;
- znane z dodatkowych ograniczeń (środowiskowe, prawne).

Tak zdefiniowany podział pozwolił na przyporządkowanie pierwszej klasie (A) obszarów:

- Szklary, Grochowa – występowanie niklu i kobaltu;
- LGOM – występowanie kobaltu, wanadu i litu;
- Krobica, Przecznicza, Gierczyn – występowanie niklu i litu;
- Stare Zagłębie Miedziowe – występowanie kobaltu.

Do klasy B zaliczyłem:

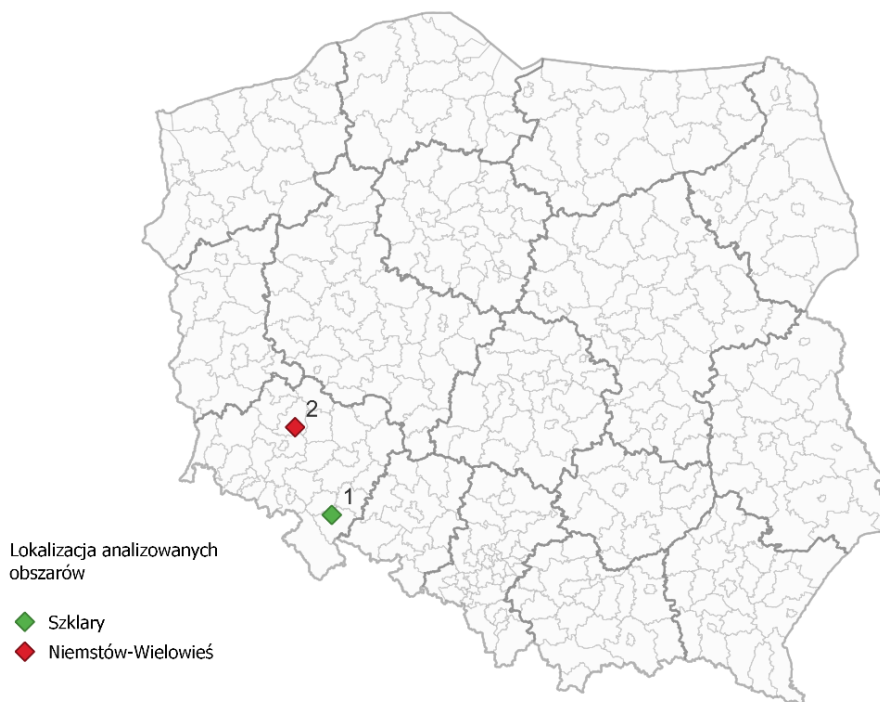
- Miedzianka, Ciechanowice – występowanie kobaltu.

Do klasy C zaliczyłem:

- Wiry

Pozostałe obszary umieściłem w klasie D.

Tak przeprowadzona identyfikacja pozwoliła mi na wskazanie dwóch głównych obszarów do dalszych analiz (rys. 29)

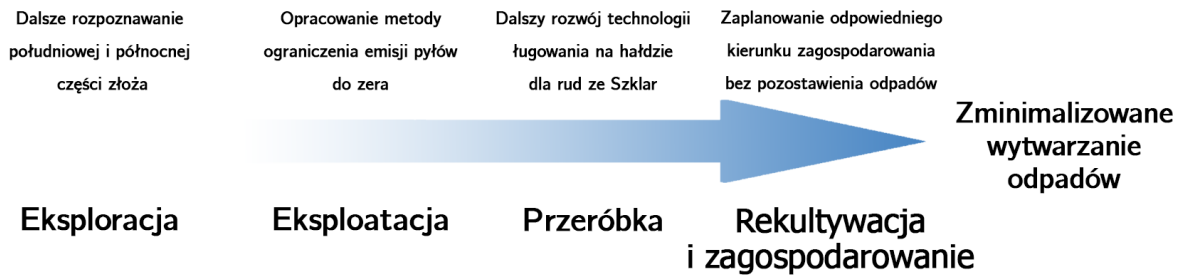


Rys. 29. Lokalizacja analizowanych miejsc potencjału metali krytycznych w utworach geogenicznych

## 5.2. Szklary – identyfikacja potencjału

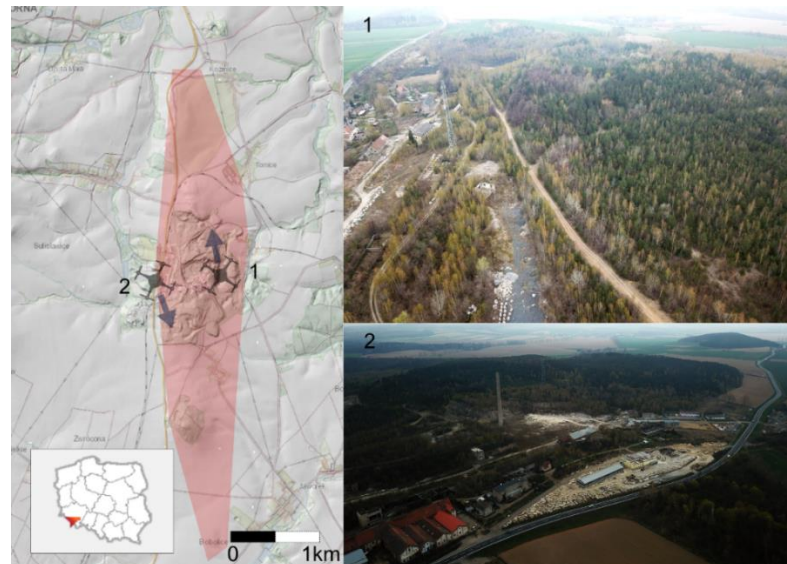
Przed potencjalnym projektem w Szklarach leżą wyzwania na wielu etapach projektu geologiczno-górniczego (rys. 30). Wśród nich jest dalsza identyfikacja potencjału złoża, ze względu na jego skomplikowaną budowę geologiczną oraz jeszcze nie w pełni rozpoznane zasoby części północnej i południowej. Dodatkowo, zasoby złoża nie zostały przeliczone w oparciu o nowe kryteria bilansowości (obniżenie wartości brzeżnej z 0,8% na 0,3%) [151].

Obecnie obszar Szklar jest zrekultywowany w kierunku leśnym (rys. 31), a w danych wyrobiskach podziemnych utworzono trasę turystyczną.



Rys. 30. Wyzwania stojące przed projektem w Szklarach na wybranych etapach projektu [124]

Pierwszym krokiem w proponowanym przez mnie projekcie jest poszukiwanie i eksploracja (rys. 32). Ten etap pozwala na lepszą optymalizację ekstrakcji i przetwarzania. Jak już wcześniej wspomniano, eksploracja złoża w Szklarach przeprowadzana była zarówno historycznie, jak i w ostatnich latach przez KGHM i Gepco. Jednak wymagane są dalsze prace, szczególnie w częściach niecentralnych (peryferyjne części złoża - Wzgórze Siodłowe i Wzgórze Koźmickie). Eksploracja i analizy powinny prowadzić do posiadania szerszej wiedzy na temat zawartości minerałów akcesorycznych i elementów [152,168–170].



Rys. 31. Zdjęcia obszaru Szklar z roku 2019, 1 – północna część obszaru, 2 – centralna i południowa część obszaru [124]

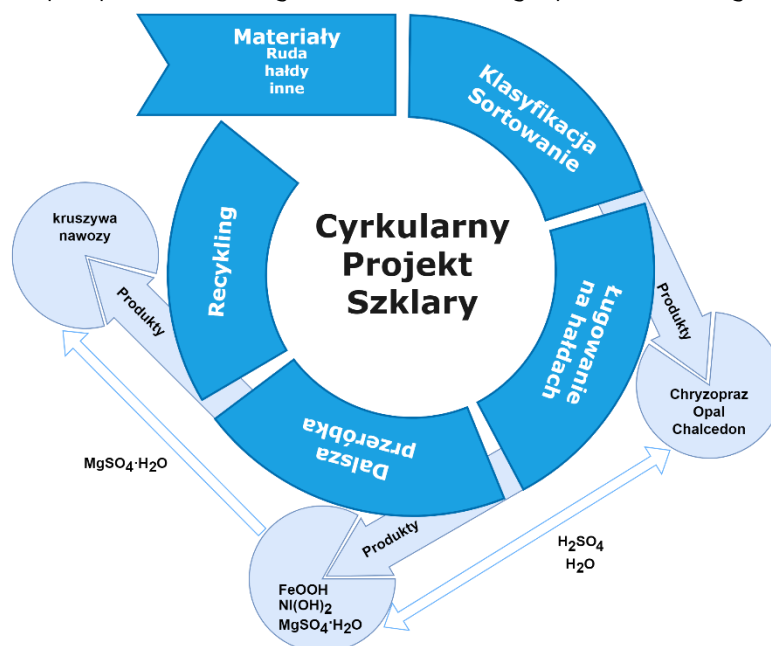
Drugą fazą (wydobycie), jest proponowane przeprowadzenie metodą odkrywkową ze skarpą. Pomysł ten został zaproponowany przez Zielińską i Kobyłańską (2007) [171]. Jednak początkowy plan mający tylko rozproszone wyrobiska odkrywkowe na obszarze złoża powinien zostać poddany rewizji, aby zminimalizować oddziaływanie na tereny zielone i rolnicze. Eksploracja powinna być skierowana na optymalizację gospodarki surowcowej, maksymalizację odzysku metalu i minimalizację produkcji odpadów.

Kolejny etap to przetwarzanie - jak już wcześniej wspomniano, najbardziej odpowiednia technologia dla złoża w Szklarach to metody hydrometalurgiczne. Jednak, jak zostało to wspomniane wcześniej, konieczne są dalsze badania i testy. Technologia powinna być w stanie odzyskać jak najwięcej metalu z rudy, a także izolować produkt jako koncentrat wodorotlenku niklu. Jest on bezpośrednio przydatny w przemyśle stalowym lub może być dalej przetworzony w celu uzyskania czystych produktów metalowych.

Etapy po przetwarzaniu obejmują rekultywację terenów zdegradowanych przez działalność górniczą, aby przywrócić równowagę ekosystemu i jeżeli to możliwe, zwrócić tereny pod działalność rolniczą. To jest wyjątkowo istotne, ponieważ region Dolnego Śląska jest ważny dla polskiego rolnictwa, szczególnie w kontekście produkcji owoców i warzyw. Najważniejszą rolę w procesie rekultywacji powinna odgrywać roślinność i jej dobro dla ekosystemu.

Sama ekstrakcja i przeróbka rudy nie są jednak dostateczne. Potrzebne jest dalsze myślenie o odpadach i produktach ubocznych, które można recyklingować i wykorzystać do innych celów. Na przykład odpady ze skał macierzystych mogą być wykorzystane do produkcji cementu, kamieni, betonu, drogi, czy do rekultywacji terenu. Odpady mineralne i szlam mogą być wykorzystane w przemyśle budowlanym, rolnictwie (poprawa struktury gleby) lub w przemyśle chemicznym. Mówimy tu o koncepcji "zero waste" (bez odpadów), która jest kluczową zasadą gospodarki o obiegu zamkniętym.

Tylko wtedy, gdy te wyzwania zostaną odpowiednio rozwiązane, projekt górniczy w Szklarach będzie możliwy do przeprowadzenia zgodnie z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym.



Rys. 32. Propozycja całościowego projektu zagospodarowania złóż i hałd obszaru Szklar w ujęciu Gospodarki o Obiegu Zamkniętym [123,124]

## 5.3. Szklary – metody pozyskania

### 5.3.1. Metody górnicze

Rozważając Szklary jako potencjalny projekt górniczy, sugeruję, że planowanie od samego początku powinno być dostosowane do zasad gospodarki o obiegu zamkniętym. To podejście zdobywa coraz większą uwagę w nauce, przemyśle i na poziomie politycznym. W przypadku Szklar sugeruję również, że istnieje potencjał bliski zeru produkcji odpadów na każdym etapie projektu górniczego (rys. 30, 32). Wśród wyzwań etapu eksploatacji leży także zmniejszenie emisji pyłów

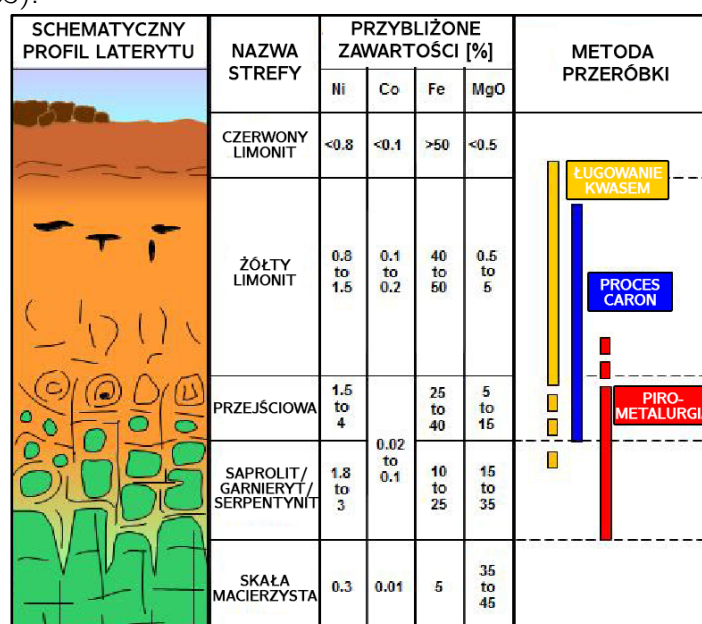
do zera, co związane jest z występowaniem na tym terenie azbestu. Problem ten jest ograniczany w kopalniach na Świecie poprzez stałe zraszanie górotworu i urobku wodą. Takie podejście proponowane było również dla złoża Szklary 1 [171]

### 5.3.2. Metody przeróbcze

Wybór technologii przeróbki jest determinowany przez charakterystykę laterytu (rys. 33). Główne kierunki to:

- Procesy hydrometalurgiczne, takie jak proces Caron\*, wysokociśnieniowe ługowanie kwasem, proces AMAX, ługowanie atmosferyczne i ługowanie na hałdach, mogą być stosowane głównie do czerwonego limonitu, żółtego limonitu, rudy przejściowej, a częściowo do rudy saprolitowej/garnierytowej/serpentytowej.
- Procesy pirometalurgiczne, takie jak wytapianie żelazoniklu, wytapianie mat oraz piec szybowy/elektryczny mogą być stosowane dla skał macierzystych, rudy przejściowej i częściowo dla najgłębszych rud żółtego limonitu [172].

\*Elias (2002) opisał, że proces Caron jest najodpowiedniejszy dla żółtego limonitu i rudy przejściowej [173] (rys. 33).



Rys. 33. Ruda laterytowa a metody wzbogacania, przetłumaczono [172]

Ruda z Szklar przetwarzana była metodą pirometalurgiczną przez całą historię działalności górniczej i hutniczej. Biorąc pod uwagę najnowsze technologie w przetwarzaniu rudy laterytowej wspomniane wyżej, technologia najbardziej odpowiednia dla złoża w Szklarach to metoda hydrometalurgiczna. Proces Caron obciążony jest faktem, że nie jest skuteczny dla rud saprolitowych oraz w odzyskiwaniu kobaltu [172], co może stanowić problem w Szklarach. Prowadzi to do wniosku, że ługowanie kwasem, a konkretniej ługowanie na hałdach, wydaje się zarówno pod względem technicznym, jak i ekonomicznym, najbardziej atrakcyjne dla złoża w Szklarach.

Główne badania dotyczące alternatywnych metod ekstrakcji niklu metodami metalurgicznymi i hydrometalurgicznymi z ubogich rud (0,7% - 0,8% Ni) oraz żużli metalurgicznych (0,25% Ni) powstających z odpadów po produkcji żelazoniklu, przeprowadzono w latach 1960-1980. Badania odbywały się na Politechnice Wrocławskiej [174].

Po roku 2000 badania kontynuowane były przez KGHM Cuprum ze względu na szybki wzrost cen niklu na giełdzie. W konsekwencji proponowaną technologią było wykorzystanie ługowania kwasem siarkowym jako środka ługującego, ponieważ ma on wszystkie niezbędne właściwości. Jest skuteczny, tani, łatwo dostępny, nietoksyczny i nie wymaga regeneracji. Wspomniane

badania zostały przerwane, głównie ze względu na (1) strategiczne znaczenie kwasu siarkowego wykorzystywanego w przemyśle chemicznym i (2) na niższe ceny niklu na giełdzie.

Głównym założeniem było podzielenie rudy na dwie różne metody ługowania kwasem

- ruda o wysokiej zawartości niklu rozdrobniona do drobnej frakcji, a następnie umieszczona w reaktorze,
- ruda o mniejszej zawartości niklu rozdrobniona do grubej frakcji, umieszczona na hałdzie i ługowana. Ze względu na nieaktywne przesiąkanie, po pierwszym ługowaniu rudę powinno się ponownie rozdrobnić i ługować.

Główną zaletą tej technologii jest możliwość równoczesnego odzyskiwania  $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Fe-OOH}$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , oraz innych pierwiastków takich jak miedź, mangan, chrom. Koncentrat wodorotlenku niklu może być bezpośrednio wykorzystywany w produkcji stali nierdzewnej lub dalej przetwarzany w celu uzyskania czystego metalu.

W analizie i ocenie każdej technologii hydrometalurgicznej, muszą być uwzględnione następujące aspekty:

- Techniczny – ilość zasobów, skład, mineralogia, dobór środka ługującego, skuteczność ługowania użytecznych składników, czas ługowania, parametry operacji jednostkowych, kształt i jakość produktu, niezbędne narzędzia itp.,
- Ekonomiczny – koszty kapitałowe i operacyjne,
- Ekologiczny – proces musi spełniać normy ochrony środowiska zarówno w przypadku odpadów stałych, jak i płynnych, sposoby ich utylizacji oraz składowanie lub eksploatację, z podkreśleniem znaczenia redukcji emisji azbestu.

Ze względu na niewystarczającą ilość informacji, zarówno pod względem oceny wielkości złoża, składu i przydatności rudy do proponowanej technologii hydrometalurgicznej, jak i parametrów procesów jednostkowych (ługowanie rudy, separowanie metali w roztworze i izolowanie produktów), trudno jest określić jej zastosowanie bez dalszych testów <sup>[175]</sup>.

## 5.4. Niemstów-Wielowieś – identyfikacja potencjału

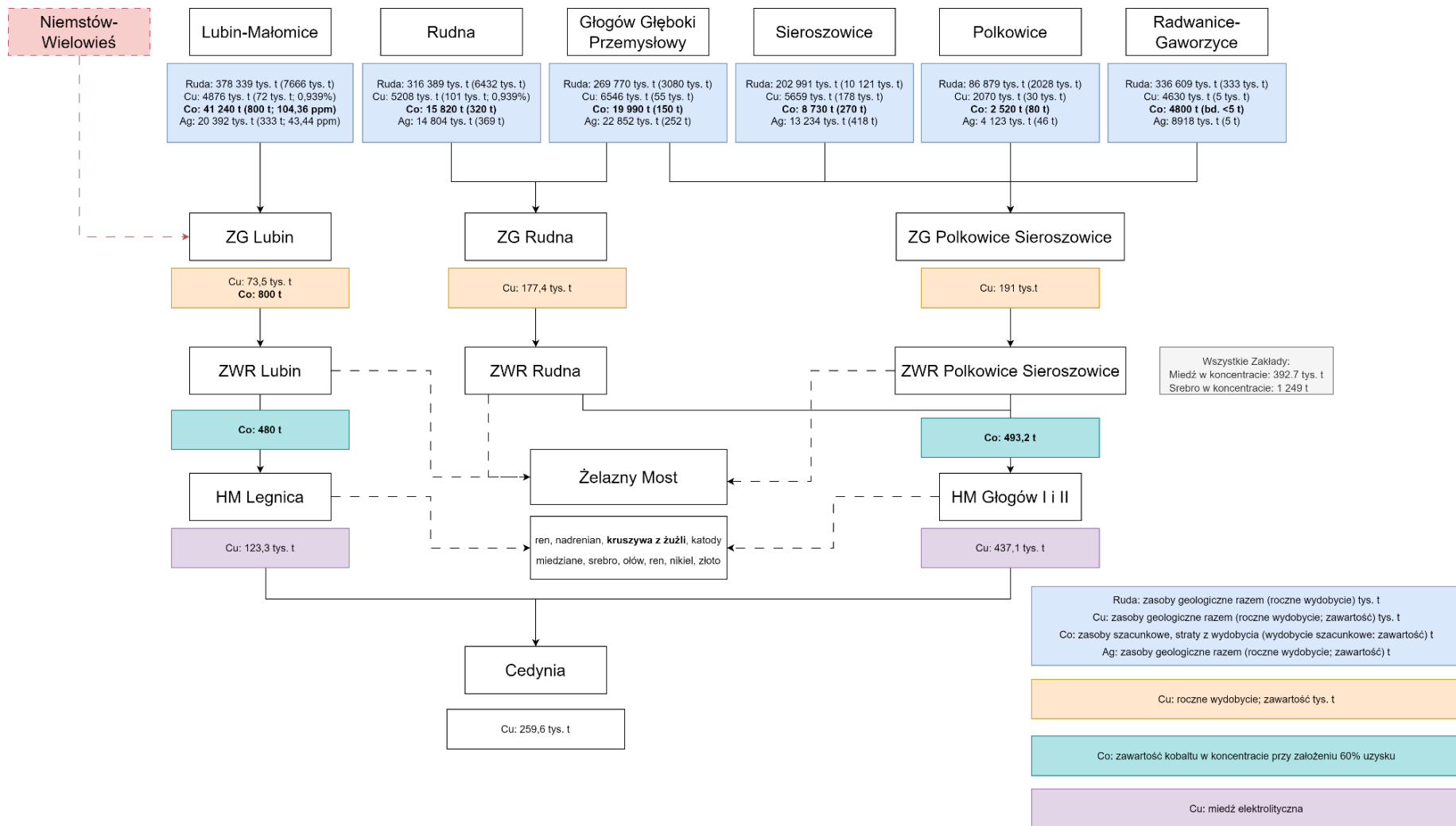
### 5.3.1. Wprowadzenie

Prace badawcze prowadzone w ramach rozprawy doktorskiej miały na celu udzielenie odpowiedzi na pytanie, czy obszar Niemstów-Wielowieś posiada potencjał surowcowy z uwzględnieniem występowania metali krytycznych oraz czy ich eksploatacja jest ekonomicznie opłacalna.

### 5.3.2. Analiza utraty kobaltu w procesie geologiczno-górnictwem ZG Lubin

Analiza publicznie dostępnych danych pozwala na prześledzenie drogi kobaltu w procesie geologiczno-górnictwem w Zakładach Górniczych prowadzonych przez KGHM Polska Miedź S.A. (rys. 34). Jego występowanie zostało stwierdzone we wszystkich eksploatowanych złożach (Lubin-Małomice, Rudna, Głogów Głęboki Przemysłowy, Sieroszowice, Polkowice, Radwanice-Gaworzyce). W tych wszystkich bilansowych zasobach stwierdzono łącznie 93 100 ton kobaltu (rys. 34). Lubin-Małomice ma aż 44% wszystkich zasobów. Rocznie wydobywane ze złóż jest 1622 ton kobaltu, z czego 800 ton w samym Zakładzie Górniczym Lubin. Źródła literaturowe pozwalają na stwierdzenie, że około 60% kobaltu jest uzyskiwane w koncentracie miedziowym, pozostałe 30-40% występuje w postaci rozproszonej mineralizacji <sup>[176]</sup>. Oznacza to, że z Zakładu Wzbogacania Rudy Lubin do Huty Legnica trafia rocznie 480 ton kobaltu. Następnie metal ten jest tracony w procesie hutniczym, a jako produkt utraty został udokumentowany żużel konwertorowy. Z publikowanych przez KGHM oraz firmę Metraco informacji wynika, że żużel hutniczy jest sprzedawany jako kruszywo <sup>[177]</sup>





Rys. 34. Przepływ miedzi, srebra oraz kobaltu od źródeł do produktów/odpadów w strukturze KGHM Polska Miedź S.A. Opracowanie własne na podstawie [178–180]

Zrozumienie procesu utraty kobaltu jest istotne ze względu na przedstawione w rozprawie wyniki prac badawczych związanych z obszarem Niemstów-Wielowieś. W obecnej strukturze, w przypadku dojścia do eksploatacji tych potencjalnych zasobów, kobalt również stanowiłby wkład do Huty Legnica i byłby tracony w identyczny sposób.

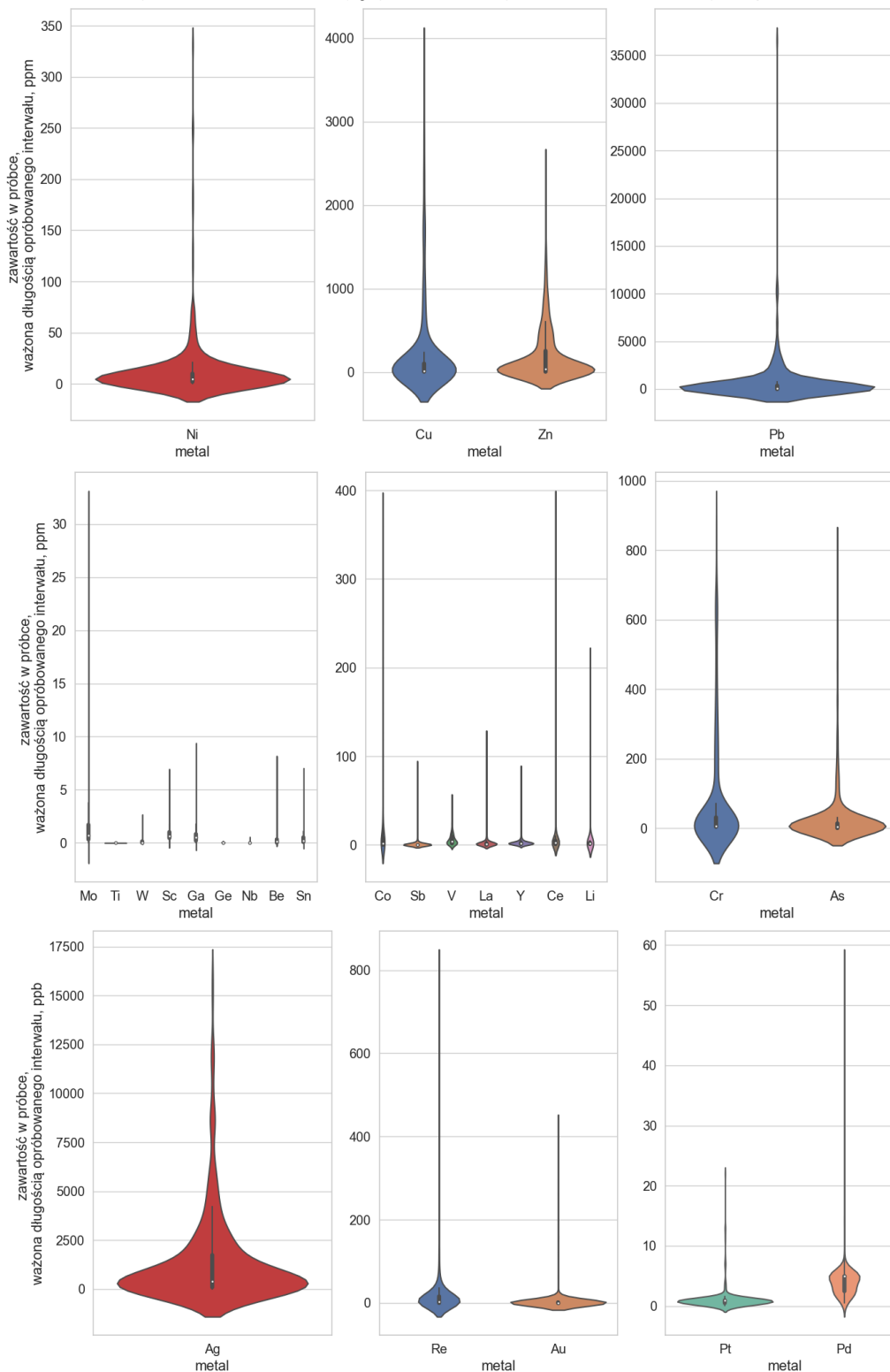
### 5.3.3. Eksploracyjna analiza danych

W pierwszym etapie z dostępnych analiz 49 pierwiastków wybrałem te, które spełniały co najmniej jedno z kryteriów: (1) są obecnie ekstrahowane w Zakładach KGHM, (2) są metalami krytycznymi, (3) mogą stać się przedmiotem ekstrakcji ze względu na potencjał występowania. Analizy te zostały zważone interwałem opróbowania (częścią profilu otworu z jakiego zostały pobrane). Metryki statystyczne zestawiono z wartością klarka dla poszczególnych pierwiastków (tab. 15).

Tab. 15. Statystyka opisowa dla całego zbioru próbek z otworów na obszarze Niemstów-Wielowieś ważonych interwałem profilu w zestawieniu ze średnią zaw. metali w litosferze.

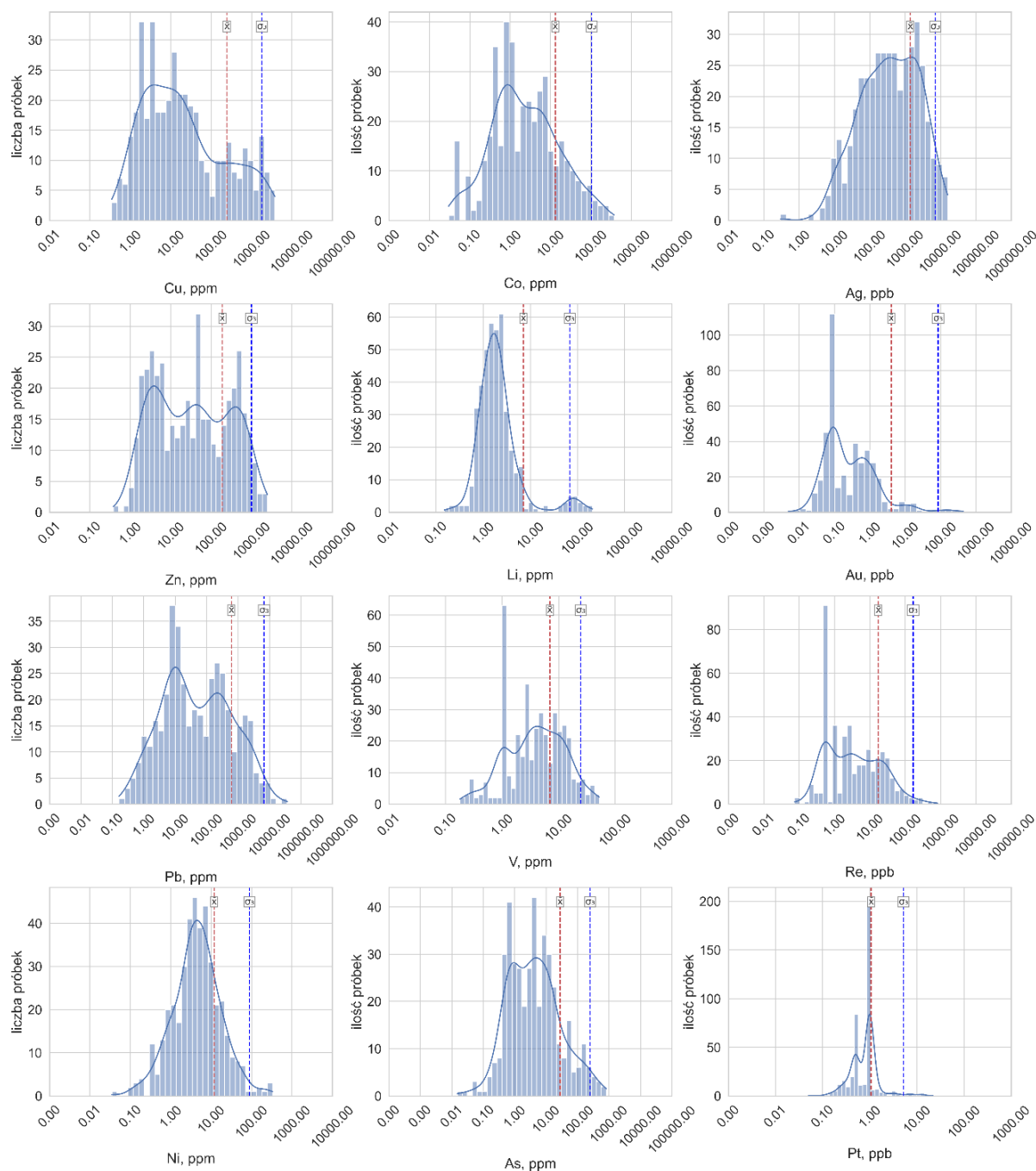
		Ilość próbek [szt.]	Średnia	Odchyl. stand.	Min.	25%	50%	75%	Max.	Średnia zaw. w litosferze
Mo	ppm	418	1,836	3,225	0,016	0,308	0,685	1,709	31,175	0,8
Ni	ppm	418	11,872	29,394	0,035	2,055	4,350	9,913	330,600	59
Co	ppm	418	13,040	34,589	0,030	0,600	2,000	7,720	376,832	26,6
Mn	ppm	418	911,202	1052,926	6,840	196,938	600,575	1401,000	9192,000	1000 MnO
Sb	ppm	418	1,094	5,045	0,006	0,110	0,220	0,606	91,710	0,2
V	ppm	418	6,967	8,177	0,180	1,500	4,000	9,150	52,250	138
La	ppm	418	2,040	6,442	0,030	0,476	1,100	2,188	125,180	20
Cr	ppm	418	81,338	170,441	0,510	2,993	5,575	30,898	869,050	135
Ti	%	418	0,002	0,005	0,000	0,000	0,001	0,001	0,029	0,72 TiO <sub>2</sub>
W	ppm	418	0,121	0,198	0,003	0,040	0,050	0,128	2,555	1
Ga	ppm	418	0,789	1,154	0,006	0,203	0,497	0,850	8,700	16
Ge	ppm	418	0,040	0,019	0,003	0,025	0,050	0,050	0,175	1,3
Nb	ppm	418	0,027	0,048	0,001	0,010	0,015	0,030	0,534	8
Y	ppm	418	2,557	4,573	0,038	1,140	1,964	2,938	86,697	19
Ce	ppm	418	4,921	19,629	0,030	1,102	2,550	4,694	387,640	43
Li	ppm	418	7,112	22,906	0,150	1,193	1,705	2,738	208,800	16
Pd	ppb	418	4,277	3,808	0,500	2,500	5,000	5,000	57,000	1,5
Pt	ppb	418	1,068	1,727	0,050	0,500	1,000	1,000	22,000	1,5
Cu	ppm	418	244,783	594,900	0,348	3,293	13,304	99,782	3769,987	27
Pb	ppm	418	615,197	2228,481	0,162	7,437	38,325	317,103	36575,000	11
Zn	ppm	418	188,248	331,620	0,380	4,816	35,710	249,600	2471,810	72
Ag	ppb	418	1392,665	2368,168	0,300	83,000	385,500	1740,625	15939,000	56
As	ppm	418	27,823	83,844	0,015	0,900	3,800	13,075	816,805	
Au	ppb	418	4,040	28,448	0,005	0,100	0,180	0,765	435,600	1,3
Sn	ppm	418	0,544	0,886	0,007	0,100	0,220	0,500	6,500	1,7
Re	ppb	418	17,440	55,954	0,075	0,500	3,000	14,838	816,550	0,188

Metryki statystyczne w połączeniu z wizualizacjami oraz w odniesieniu do założonych uprzednio kryteriów selekcji pozwoliły na wyróżnienie grupy najbardziej istotnych metali takich jak miedź, cynk, ołów, nikiel, kobalt, lit, wanad, arsen, srebro, ren, platyna. Metale te cechowały się najwyższymi zawartościami w stosunku do pozostałych występujących w analizowanych próbkach (rys. 35). Zauważalna jest istotna kwestia dla celów poszukiwawczych, wizualizacje ujawniają występowanie licznych wartości odstających dla wszystkich analizowanych pierwiastków.



Rys. 35. Zawartości w próbkach ważone długością opróbowanego interwału

Jedynie rozkład zawartości w przypadku niklu przypomina swoją charakterystyką rozkład normalny (na podstawie testu shapiro). W przypadku pozostałych metali zauważalna jest przewaga lewoskośności. Jest to związane z charakterem próbek – zaledwie mały procent z nich reprezentuje wyższe zawartości dla danych metali (rys. 36).

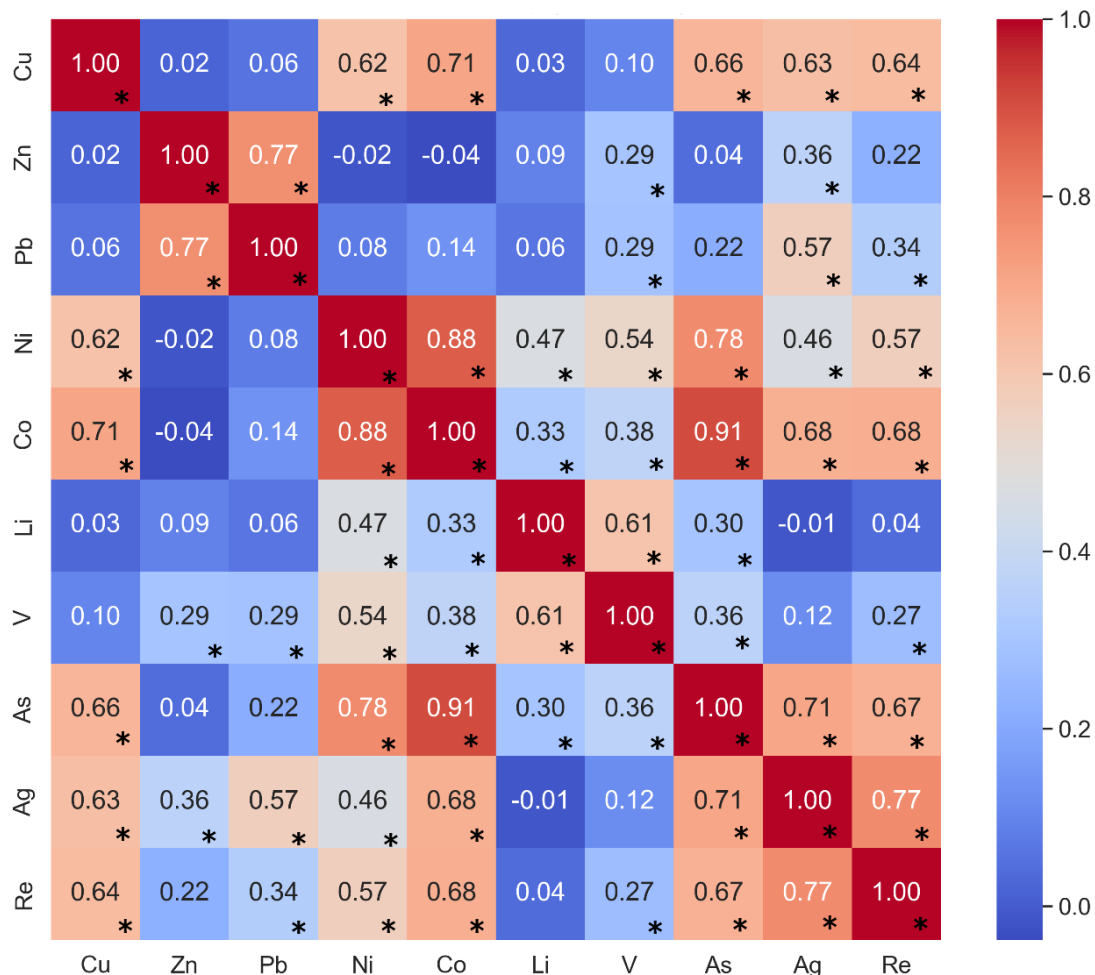


Rys. 36. Histogramy ilości próbek do zawartości poszczególnych pierwiastków z całego zbioru prób z obszaru Niemców-Wielowieś

W celu sprawdzenia korelacji pomiędzy pierwiastkami w pełnym zbiorze próbek przeprowadzono analizę korelacji rang Spearmana (rys. 37).

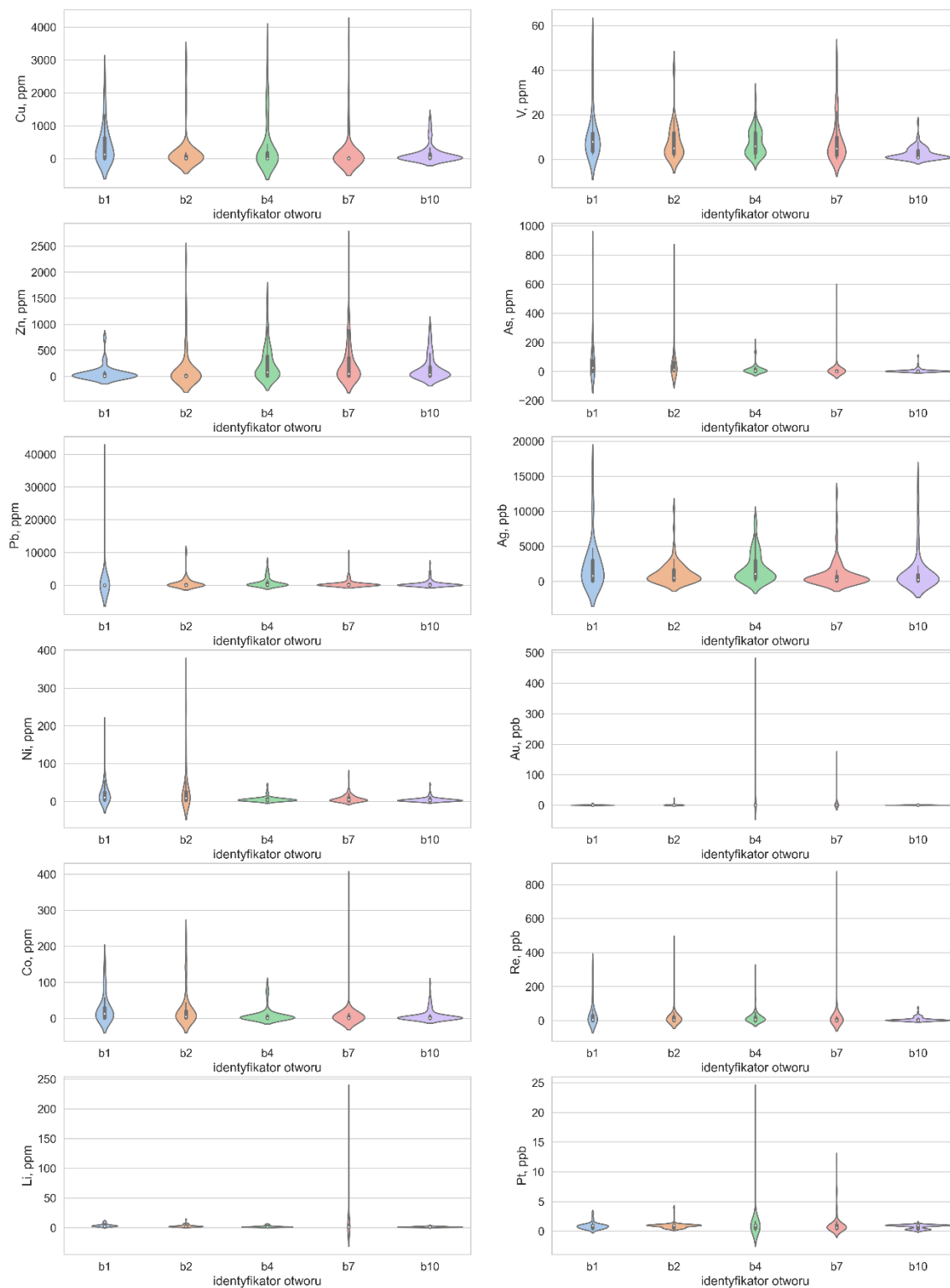
Obliczone wartości korelacji wskazują na słabą korelację między V i Pb ( $r=0.29$ ), Ag i Zn ( $r=0.36$ ), V i Pb ( $r=0.29$ ), Re i Pb ( $r=0.34$ ), Li i Co ( $r=0.33$ ), V i Co ( $r=0.38$ ), As i Li ( $r=0.36$ ) i Re i V ( $r=0.27$ ). Umiarkowaną korelację obserwuje się między Ni i Cu ( $r=0.62$ ), As i Cu ( $r=0.66$ ),

Ag i Cu ( $r=0.63$ ), Re i Cu ( $r=0.64$ ), Ag i Pb ( $r=0.57$ ), Li i Ni ( $r=0,47$ ), V i Ni ( $r=0.54$ ), Ag i Ni ( $r=0.46$ ), Re i Ni ( $r=0.57$ ), Ag i Co ( $r=0.68$ ), Re i Co ( $r=0.68$ ), V i Li ( $r=0.61$ ), Re i As ( $r=0.67$ ). Na silne współwystępowanie wskazują związki Co i Cu ( $r=0.71$ ), Pb i Zn ( $r=0.77$ ), Co i Ni ( $r=0.88$ ), As i Ni ( $r=0.78$ ), Ag i As ( $r=0.71$ ), Re i Ag ( $r=0.77$ ). Bardzo silna korelacja występuje między As i Co ( $r=0,91$ ). Pozostałe wyniki nie są statystycznie istotne ( $p\text{-value}<0,05$ ).



Rys. 37. Macierz korelacji spearmana dla pełnego zbioru próbek pobranych z otworów wywierconych na obszarze Niemstów-Wielowieś, \* $p\text{-value}>0,05$

Metale jak miedź, cynk, ołów, nikiel, kobalt, srebro, ren, arsen, wanad występują zasadniczo w każdym z badanych otworów (rys. 38). Najgorsze wyniki obserwowane są dla otworu b10, gdzie występują mniejsze ilości Cu, choć występuje więcej anomalnych próbek z wyższymi zawartościami Ag. W otworze B1, obserwowana jest stosunkowo bardzo wysoka zawartość Pb w pojedynczej próbce. W otworze b7 występują anomalnie wysokie zawartości Li. W otworach B4 oraz B7 w stosunkowo podwyższonych zawartościach występuje Au oraz Pt, są to jednak wartości odstające liczone w okolicach 400 ppb dla Au i 20 ppb dla Pt.



Rys. 38. Zawartości pierwiastków w poszczególnych otworach wywierconych na obszarze Niemstów-Wielowieś

#### 5.3.4. Charakterystyka otworów

Na obszarze koncesyjnym Niemstów-Wielowieś serię wzbogaconą w miedź, srebro, kobalt, ołów, cynk i inne pierwiastki nawiercono stosunkowo płycej w porównaniu ze złożami eksploatowanymi przez KGHM na głębokości 280-600 m p.p.t.

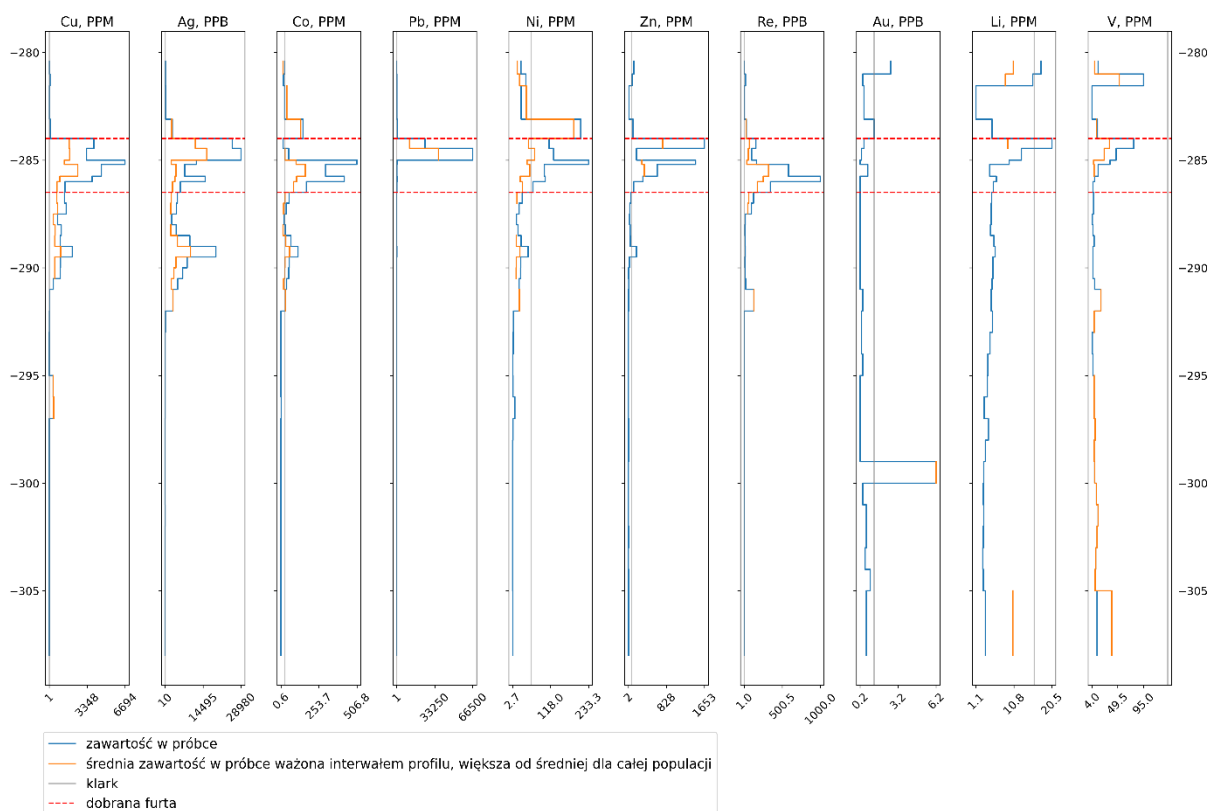
Serię wzbogaconą w miedź, srebro, ołów, nikiel, cynk, ren i w otworze B1 nawiercono najpłycej, porównując wszystkie otwory. Wzbogacone łupki, dolomity i piaskowce wystąpiły na głębokości mniej więcej 280 do 290 m.p.p.t (rys. 39-40).

W otworze B2 wzbogacenie w miedź, srebro, kobalt i ren zaobserwowano na głębokościach 372-374 m (piaskowce). Co istotne, podwyższone zawartości kobaltu oraz niklu wystąpiły też w dolomitach nad główną serią (zał. 4).

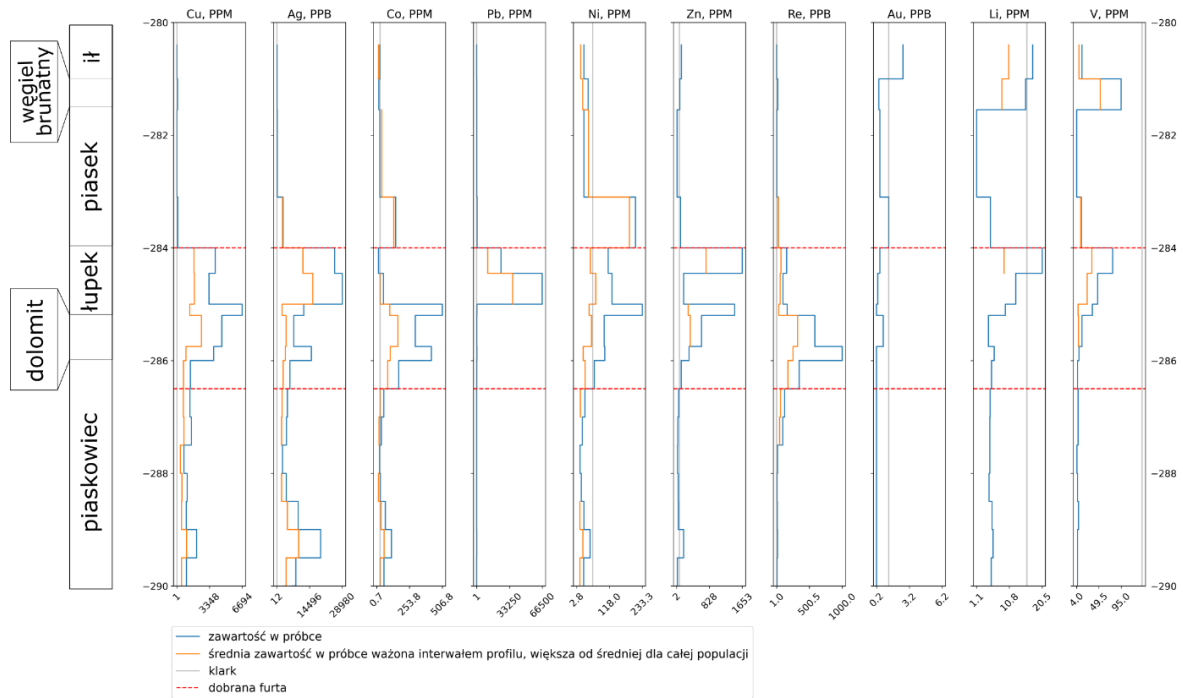
Otwór B4 charakteryzuje się występowaniem serii wzbogaconej na podobnych głębokościach jak w otworze B2. Występuje ona w piaskowcach, dolomitach i łupkach na około 348-360 m.p.p.t. Nad tą serią występują także okruszczone ołowiem, cynkiem, niklem i dolomity (zał. 4).

W otworze B7, najbliższym obszarze ZG Lubin, serię wzbogaconą (miedź, srebro, kobalt, ołów, nikiel, cynk, ren) nawiercono w wapieniach, łupkach i piaskowcach na głębokościach ok. 520-535 m.p.p.t. Główne wzbogacenie w Pb występuje w stropie serii. W otworze tym wystąpiła także część profilu wzbogacony w lit na głębokości 465-470 m (brekcje anhydrytowo ilaste i ił wapienisty). Był to jedyny otwór o takich zawartościach litu, co potraktowałem jako anomalia bez większych znamion złożowych (zał. 4).

W otworze B10 nawiercono okruszczenie w dwóch głównych seriach. Pierwsza, o stonkowo małej miąższości (miedź, srebro, kobalt, ołów, nikiel, cynk i ren), występuje w łupku dolomitycznym na głębokości 588 m.p.p.t, natomiast druga (miedź, srebro) w piaskowcach na głębokości około 590-595 m.p.p.t (zał. 4).



Rys. 39. Profil geochemiczny otworu B1 na podstawie zawartości w próbkach oraz zważonych interwałem profilu zawartości w próbkach. Oznaczono dobraną potencjalną furcję eksploatacyjną.



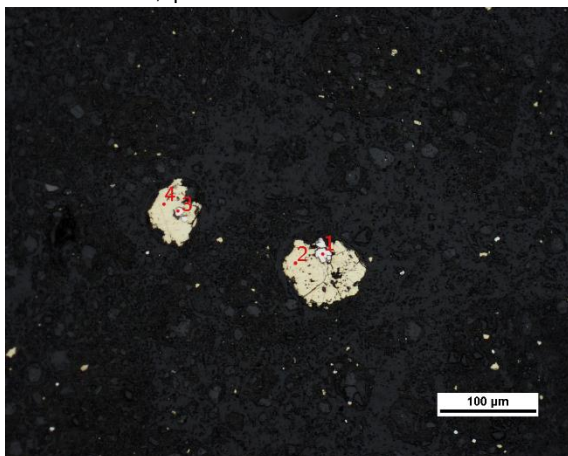
Rys. 40. Profil geochemiczny i litologiczny otworu B1.

### 5.3.5. Analiza geochemiczna mineralizacji rudnej

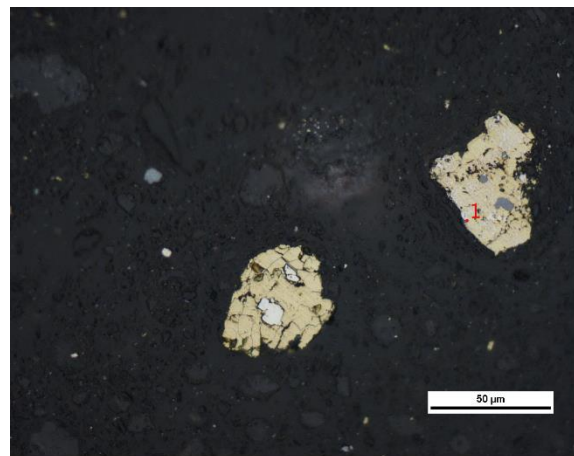
W ramach badań kameralnych w Laboratorium Pierwiastków Krytycznych Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie przy współpracy z prof. Adamem Piestrzyńskim oraz dr Gabriłą Kozub-Budzyń wykonałem analizę prób pobranych z głębokości podanych poniżej, na każdej z prób wykonana została określona liczba pomiarów punktowych.

- Otwór B1 – 7 punktów pomiarowych (rys. 41, tab. 16)
- Otwór B2 – 6 punktów pomiarowych (rys. 42, tab. 16)
- Otwór B7 – 9 punktów pomiarowych (rys. 43, tab. 16)
- Otwór B10 – 6 punktów pomiarowych (rys. 44, tab. 16)

Otwór B1, próbka 28



a) fot1

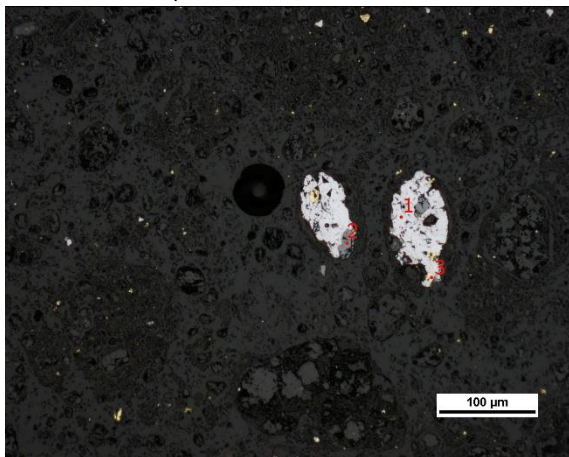


b) fot 2

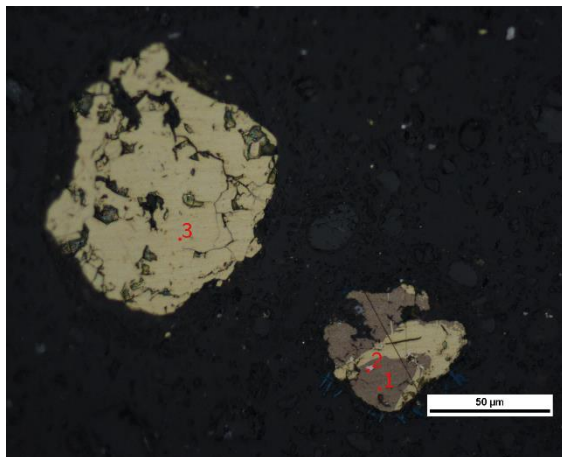
Rys. 41. Mikroskopowe zobrazowania próbek z otworu B1 z oznaczeniem punktów badania mikrosondą elektronową; a) 1 – piryt, 2 - chalkopiryt, 3 - piryt, 4 – chalkopiryt; b) 1 – gersdorfit



Otwór B2, próbka 54



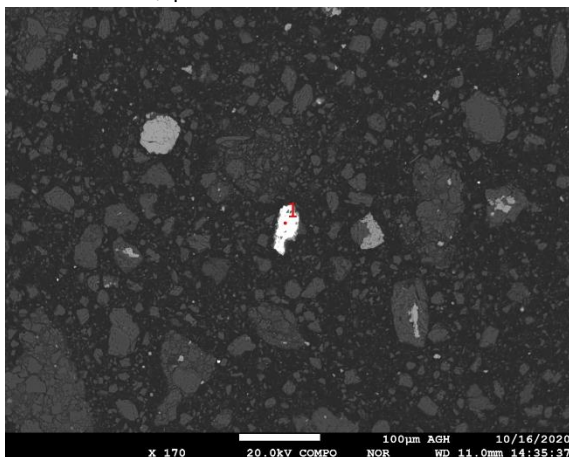
a) fot. 1



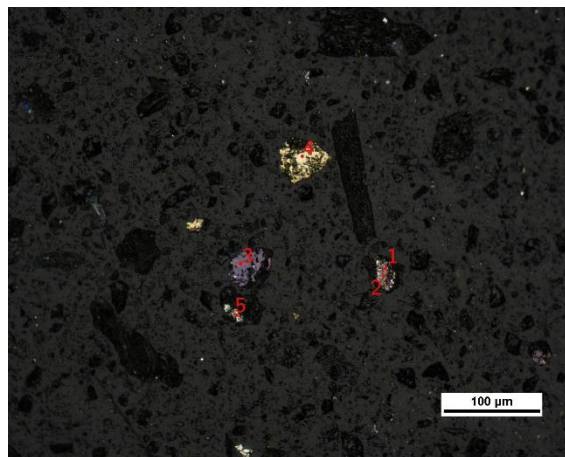
b) fot. 2

Rys. 42. Mikroskopowe zobrazenia próbek z otworu B2 z oznaczeniem punktów badania mikrosondą elektronową; a) 1 – galena, 2 – sfaleryt, 3 – chalkopiryt; b) 1 – bornit, 2 – kobaltyn, 3 – chalkopiryt.

Otwór B7, próbka 92



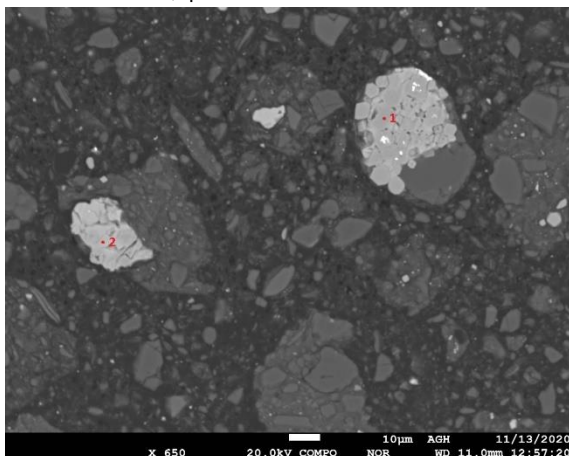
a) fot. 1



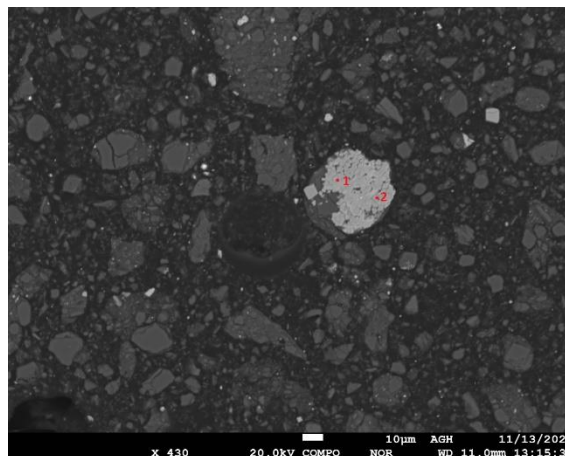
b) fot. 2

Rys. 43. Mikroskopowe zobrazenia próbek z otworu B7 z oznaczeniem punktów badania mikrosondą elektronową; a) 1 – galena; b) 1 – kobaltyn, 2 – bornit, 3 – bornit, 4 – chalkopiryt, 5 – bornit?

Otwór B10, próbka 66



a) Fot 1



b) fot 2

Rys. 44. Mikroskopowe zobrazenia próbek z otworu B10 z oznaczeniem punktów badania mikrosondą elektronową; a) 1 – piryt, 2 - chalkopiryt b) 1 – kubanit?, 2 – piryt?

Tab. 16. Wyniki analiz pod mikrosondą elektronową próbek pobranych z otworów z obszaru Niemstów-Wielowieś

minerał	ID	S	Zn	Fe	Hg	Ag	Co	Pb	Cu	Sb	Ni	Mn	As	Suma [%]	Zdjęcie i punkt	
piryt	B1	54.396	0.011	45.600	-	0.001	0.055	0.384	0.905	-	0.034	0.002	-	101.388	rys. 41 (1), punkt 1	
chalkopiryt		35.387	0.080	29.803	-	0.014	0.022	0.261	33.692	0.001	0.007	-	-	99.267	rys. 41 (1), punkt 2	
piryt		55.046	0.054	46.089	-	-	0.075	0.323	1.332	-	0.052	-	-	102.971	rys. 41 (1), punkt 3	
chalkopiryt		35.470	0.039	29.727	0.029	0.020	0.248	0.146	33.149	-	0.083	0.016	-	98.927	rys. 41 (1), punkt 4	
bornit z domieszką gersdorfitu*	B2	21.361	0.022	4.945	0.041	0.037	15.110	0.138	3.120	-	14.103	0.030	45.570	104.477	rys. 41 (2), punkt 1	
galena		13.194	0.232	0.082	0.024	-	-	86.578	0.304	-	0.085	-	-	100.499	rys. 42 (1), punkt 1	
sfaleryt		33.050	64.597	0.080	-	-	0.001	0.163	0.156	-	0.044	0.003	-	98.094	rys. 42 (1), punkt 2	
chalkopiryt		33.138	0.128	26.195	0.036	0.023	0.029	6.615	30.737	-	0.034	0.030	-	96.965	rys. 42 (1), punkt 3	
bornit		27.945	0.061	12.308	-	0.099	0.060	0.104	56.495	-	0.013	0.019	-	97.104	rys. 42 (2), punkt 1	
kobaltyn		21.847	-	1.670	-	0.024	26.766	0.126	5.156	-	5.752	0.015	41.992	103.348	rys. 42 (2), punkt 2	
chalkopiryt		35.374	0.048	30.177	-	0.024	0.041	0.191	33.831	-	0.021	0.010	-	99.717	rys. 42 (2), punkt 3	
galena		B7	13.057	-	0.084	-	-	0.000	85.458	0.172	-	0.006	-	-	98.777	rys. 43 (1), punkt 1
kobaltyn			20.917	0.034	0.534	0.017	0.019	30.234	0.129	1.538	-	4.589	0.034	42.376	100.421	rys. 43 (2), punkt 1
bornit			25.627	0.034	9.936	-	0.099	3.167	0.072	54.161	-	0.381	0.019	3.447	96.943	rys. 43 (2), punkt 2
bornit	26.249		0.053	10.915	-	0.101	0.144	0.130	61.253	-	-	0.004	-	98.849	rys. 43 (2), punkt 3	
chalkopiryt	35.431		0.015	30.229	0.013	-	0.049	0.160	33.504	-	0.023	-	-	99.424	rys. 43 (2), punkt 4	
bornit	34.760		0.059	19.211	-	0.189	7.163	0.216	25.705	-	1.093	0.068	9.639	98.103	rys. 43 (2), punkt 5	
piryt	B10	54.204	0	46.248	0	0.007	0.048	0.056	0.268	0	0.006	0.056	0	100.893	rys. 44 (1), punkt 1	
chalkopiryt		32.662	0	30.121	0.001	0.069	0.055	0.148	32.26	0	0.006	0.006	0	95.328	rys. 44 (1), punkt 2	
kubanit**		44.639	0	40.259	0.027	0.019	0.121	0.09	13.75	0	0.017	0.08	0.032	99.034	rys. 44 (2), punkt 1	
piryt		50.076	0	43.788	0	0.018	0.052	0.233	2.925	0	0	0.137	0	97.229	rys. 44 (2), punkt 2	

\*próbka wymaga dalszych analizy w celu potwierdzenia

\*\*analiza kubanitu jest dyskusyjna, ze względu na niską zawartość Cu i wysoką zawartość S. Wymagane są dalsze analizy.

### 5.3.6. Strefa wzbogacona w otworach na obszarze Niemstów-Wielowieś oraz obliczenia metalu ekwiwalentnego

Dla dobranej furty eksploatacyjnej ze wszystkich otworów (łącznie 30 próbek) zestawilem metryki statystyczne opisujące całą wzbogaconą serię w otworach (tab. 17).

Tab. 17. Statystyka opisowa dla próbek wyselekcjonowanych teoretycznych furt eksploatacyjnych z obszaru Niemstów-Wielowieś.

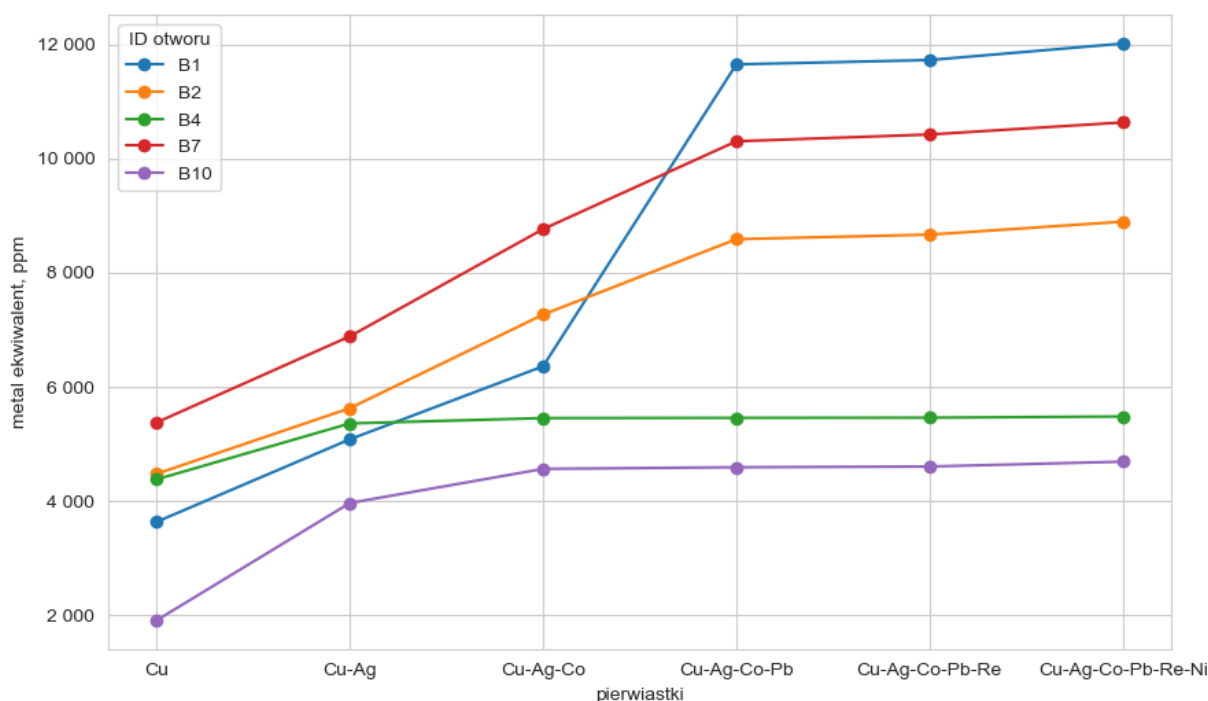
	Ilość próbek	Średnia	Odchyl. Stand.	min	25%	50%	75%	max
<b>Mo</b>	30	5.458827	8.226552	0.1056	0.276125	0.546	7.682125	31.175
<b>Ni</b>	30	26.1111	23.4383	2.9	6.489	17.3225	43.1075	73.554
<b>Co</b>	30	67.39877	83.61963	2.275	13.2675	33.48	97.3575	376.832
<b>Mn</b>	30	507.2423	779.7027	22.05	104.875	205.875	561.025	3085.5
<b>Sb</b>	30	1.617013	2.423747	0.2162	0.42325	0.63225	1.244375	11.616
<b>V</b>	30	8.226	13.54263	0.22	1.05	2	6.525	45.9
<b>La</b>	30	2.112933	2.920483	0.4	0.66375	1.08	1.97	13.86
<b>Cr</b>	30	145.2094	135.2261	1.92	13.2715	156.6825	242.1375	426.72
<b>Ti</b>	30	0.000571	0.000719	0.00011	0.000206	0.000275	0.000458	0.0033
<b>W</b>	30	0.078917	0.055564	0.01	0.025	0.075	0.11	0.18
<b>Sc</b>	30	0.988433	1.081758	0.21	0.405	0.625	0.96875	4.565
<b>Ga</b>	30	0.690433	0.49741	0.198	0.4125	0.555	0.66	2.295
<b>Ge</b>	30	0.022667	0.008214	0.01	0.015625	0.02375	0.0275	0.045
<b>Nb</b>	30	0.01611	0.031853	0.0022	0.004	0.0055	0.011875	0.1485
<b>Y</b>	30	3.649183	3.676027	0.4312	1.046625	2.109	4.4195	13.893
<b>Ce</b>	30	5.2926	7.671089	0.814	1.60125	2.65	4.8745	36.945
<b>Be</b>	30	0.4959	0.790002	0.06	0.12	0.18	0.4425	3.41
<b>Li</b>	30	2.138933	1.974455	0.65	0.9975	1.581	2.1	9.225
<b>Pd</b>	30	2.160333	0.70329	1	1.5625	2.25	2.6875	3.51
<b>Pt</b>	30	0.559333	0.468717	0.2	0.3125	0.45	0.55	2.2
<b>Cu</b>	30	1562.264	955.9444	195.115	790.1531	1424.493	2038.739	3477.76
<b>Pb</b>	30	2362.118	7181.528	5.3375	14.94855	31.559	71.2925	36575
<b>Zn</b>	30	127.0484	248.0937	2.555	13.7825	41.54	78.16875	1134.65
<b>Ag</b>	30	7041.513	3936.721	1080.8	4320.575	5773.05	9029.09	15939
<b>As</b>	30	127.0877	191.6497	4.025	15.615	22.81	204.315	816.805
<b>Au</b>	30	0.164633	0.161506	0.02	0.045	0.105	0.21875	0.55
<b>Sn</b>	30	0.2507	0.184383	0.09	0.15	0.205	0.27375	1.045
<b>Re</b>	30	106.3347	170.1388	4.5	19.1625	35.8	109.6125	816.55

Dla każdego z otworów wykonałem obliczenie metalu ekwiwalentnego przy założeniu miedzi jako metalu głównego (tab. 18, rys. 45). Otrzymane wartości ekwiwalentu, pokazują, że otwory charakteryzują się dużą zmiennością, która dla miedzi wynosi 32,9%, a dla ekwiwalentu Cu-Ag-Co-Pb-Re-Ni jest to 38,2%. Zauważalny jest wpływ obliczenia ekwiwalentu dla powiększającej się grupy pierwiastków. Największy wzrost obserwowany jest od ujęcia samej miedzi do ekwiwalentu Cu-Ag-Co-Pb. Wyniki pokazują, że wartość brzeżną na poziomie 0,7% ekwiwalentu miedzi, przyjmowanego w KGHM Polska Miedź S.A. osiągnięte są w otworze B2 oraz B7 przy ujęciu Cu-Ag-

Co. Gorsze wyniki obserwowane są dla otworu wysuniętego najbardziej na północ (B10) oraz otworu B4.

Tab. 18. Wyniki obliczeń metalu ekwiwalentnego dla kolejnych zestawów pierwiastków w podziale na otwory wykonane na obszarze Niemstów-Wielowieś.

Id otworu	Metal ekwiwalentny					
	Cu	Cu-Ag	Cu-Ag-Co	Cu-Ag-Co-Pb	Cu-Ag-Co-Pb-Re	Cu-Ag-Co-Pb-Re-Ni
B1	3635.31	5081.54	6360.96	11650.99	11727.29	12016.32
B2	4476.35	5626.96	7266.32	8588.66	8668.32	8895.64
B4	4379.67	5360.17	5453.88	5457.85	5460.85	5482.03
B7	5376.70	6886.11	8764.53	10303.44	10422.78	10634.19
B10	1909.91	3965.99	4563.52	4592.27	4605.19	4690.73

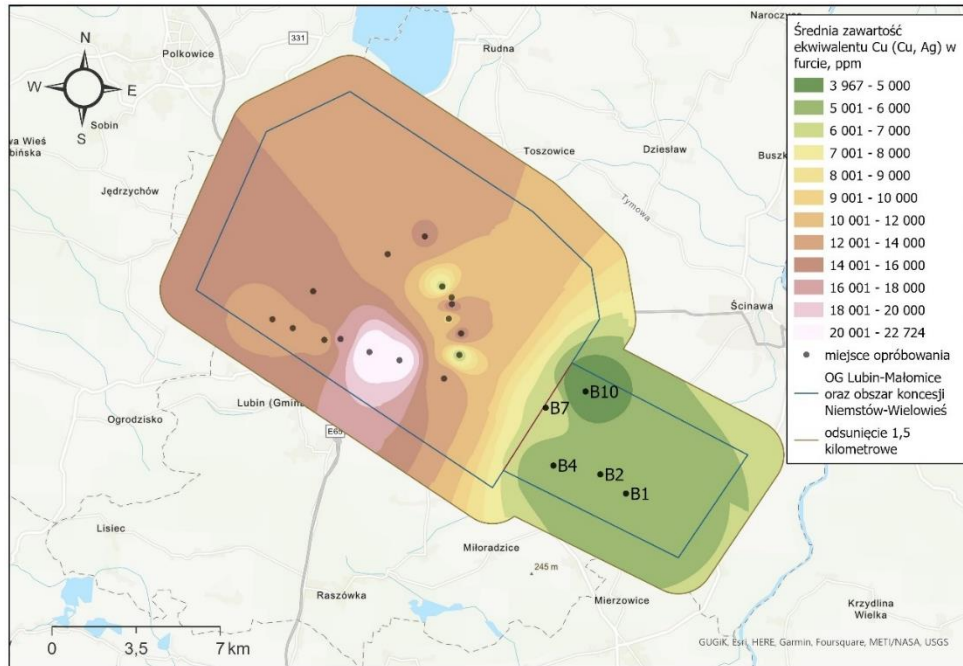


Rys. 45. Zmiana metalu ekwiwalentnego w dobranej furcie dla poszczególnych otworów w zależności od pierwiastków ujętych w ekwiwalencji.

### 5.3.7. Przestrzenne występowanie metali na obszarze ZG Lubin i Niemstów-Wielowieś

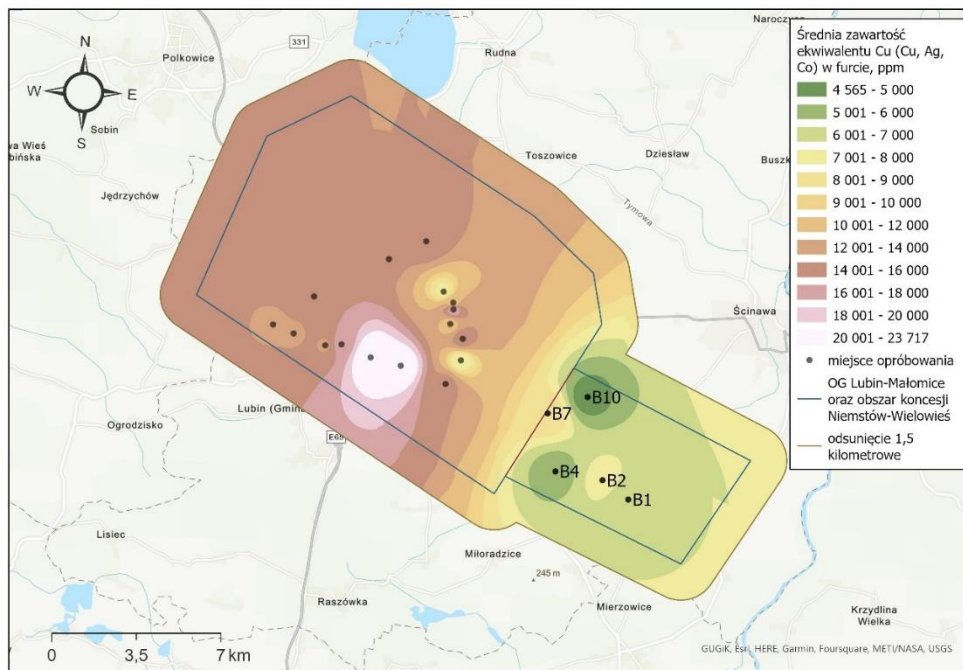
Dzięki wykonaniu obliczeń przy zachowaniu tej samej metodyki dla próbek z obszaru ZG Lubin oraz Niemstów-Wielowieś możliwe było stworzenie map wzbogacenia poszczególnymi zbiorami pierwiastków (zał. 5).

Uzyskane wyniki porównawcze wskazują, że obszar Niemstów-Wielowieś posiada istotnie mniejsze zawartości miedzi ekwiwalentnej (Cu, Ag). W południowo-centralnej części obszaru ZG Lubin furta może zawierać nawet do niemal 23 000 ppm miedzi ekwiwalentnej podczas, gdy na obszarze Niemstów Wielowieś jej zawartości wahają się od około 4000 ppm do 7000 ppm (rys. 19, rys. 46).



Rys. 46. Przestrzenny rozkład metalu ekwiwalentnego (Cu, Ag) dla obszaru górniczego Lubin-Małomice oraz obszaru Niemstów-Wielowieś (wschód).

Sytuacja ta jest analogiczna przy dodatkowym uwzględnieniu w ekwiwalencie kobaltu. Dla ZG Lubin maksymalne zawartości miedzi ekwiwalentnej (Cu, Ag, Co) w furcie to nawet niemal 24 000 ppm (rys. 47). Kobalt ma wpływ na ekwiwalent miedzi na obszarze Niemstów-Wielowieś, szczególnie dla otworów położonych w jego centralnej i północno-zachodniej części. Jednak wciąż są to zawartości istotnie mniejsze niż w przypadku obszaru ZG Lubin (maksymalnie ok. 8600 ppm miedzi ekwiwalentnej).



Rys. 47. Przestrzenny rozkład metalu ekwiwalentnego (Cu, Ag, Co) dla obszaru górniczego Lubin-Małomice oraz obszaru Niemstów-Wielowieś (wschód).

## 5.5. Niemstów-Wielowieś – metody pozyskania

### 5.4.1. Metody górnicze

Obszar Niemstów-Wielowieś jest położony w najbliższym sąsiedztwie obszaru ZG Lubin. Przy uwzględnieniu powierzchni obszaru oraz jakości rudy jedyną potencjalną szansą wydobywania w obecnej sytuacji byłoby wydłużenie obszaru ZG Lubin. KGHM Polska Miedź S.A. posiada dobrze zakorzeniony system eksploatacji, którym jest technologia komorowo-filarowa z ugięciem stropu. Jest ona wykorzystywana we wszystkich polskich zakładach górniczych <sup>[181]</sup>.

W ramach badań dobrą teoretyczną furty, dla otworu B1 = 2,5 m, B2 = 2,1 m, B4 = 2,2 m, B7 = 2,25 m, B10 = 3,5 m. Kierowałem się analizą geochemiczną, przy uwzględnieniu minimalnej wysokości furty na 2 m. Takie oszacowanie wysokości powoduje, że powinna być zastosowana metoda górnicza umożliwiającą wybieranie mało miąższych złóż.

Dodatkowo otwory charakteryzują się dużą przestrzenną zmiennością występowania wzbogaconych stref, co powoduje, że należy podjąć starania nad opłacalnym ekonomicznie doborem pola. Jednym z rozwiązań może być zastosowanie mniejszych pól oraz szybkiego dochodzenia do nich (wybieranie hotspotów).

Ze względu na niewystarczającą dostępność danych są to wyłącznie wskazania, które mogą zostać rozpatrzone w przypadku poszerzenia badań poszukiwawczo-rozpoznawczych i późniejszej potencjalnej eksploatacji.

### 5.4.2. Technologie przerobcze

W przypadku przerobu rudy z Niemstów-Wielowieś, ze względu na zależność od technologii wykorzystywanych w KGHM Polska Miedź S.A., stosowane byłoby wzbogacanie flotacyjne. Taki sposób przetwórstwa jest najskuteczniejszy w przypadku tego typu rud. Sugerowanym elementem rozważenia jest dokonanie prób przeróbki na wyselekcjonowanych odmianach litologicznych, co mogłoby pozytywnie wpłynąć na ostateczny wynik. Jednak w takim podejściu zmianie musiałby ulec cały proces technologiczny w KGHM Polska Miedź S.A. (np. selektywna eksploatacja).

---

Rozdział 6. Antroposfera – potencjał metali krytycznych w odpadach górniczych, przeróbczych i hutniczych zeskładowanych na obszarze Dolnego Śląska

---

Zawarte w tym rozdziale badania były opisane i przedstawione w poniższych:

1. publikacjach:

- Kaczan W., Kudełko J., Wirth H. Szklary nickel deposit - a review and introduction to attempts in hydrometallurgical processing. *Mineral Economics*. 2021, s. 1-8.
- Kudełko J., Wirth H., Kaczan W., Bagiński L. Characteristics of clay raw materials from the Turów Lignite Mine Waste, Poland : potential for industrial applications. *Sustainability*. 2021, vol. 13, nr 12, art. 6513, s. 1-11.

2. materiałach pokonferencyjnych

- Ptak M., Suchorab N., Kaczan W. Do we have to waste the waste? (Poland). W: XIX Conference of PhD Students and Young Scientists : Interdisciplinary topics in mining and geology : Sosnówka near Karpacz, Poland, May 29-31, 2019 / ed. Jan Blachowski. [Melville, NY] : AIP Publishing, 2020. art. 020006, s. 1-9. ISBN: 978-0-7354-1960-5
- Merlo A., Kaczan W., Leonard G., Wirth H. Assessing the environmental pertinence of cobalt exploitation from slag in KGHM mines. *Environmental Sciences Proceedings*. 2021, vol. 9, nr 1, art. 33, s. 1-5. ISSN: 2673-4931
- Kaczan W., Wirth H., Kudełko J., Sroga C. Challenges in the management of mining waste. *Environmental Sciences Proceedings*. 2021, vol. 9, nr 1, art. 28, s. 1-7. ISSN:2673-4931
- Trybała P.M., Kaczan W, Górecki A. Mining waste volume estimation using airborne Lidar data and historical maps: a case study of tailing piles in Szklary, Lower Silesia. *Environmental Sciences Proceedings*. 2021, vol. 9, nr 1, art. 32, s. 1-5. ISSN: 2673-4931

3. referatach konferencyjnych

- Kaczan W., Wirth H. The proposition of a systematic approach in the method of historical prospecting and exploration of anthropogenic deposits. *International Conference Mineral deposits safeguarding as a basis of mineral materials safety, 2022 Kraków*.



„Po chodniku idzie mężczyzna z wózkiem na złom czy węgiel. Pytamy, on wie, pokazuje. Może sam ciuła jakiś grosz na hałdzie. Od wielu pokoleń istnieje kultura hałdziarzy, którym hałda nie pozwala zginąć. W pokopalnianych resztkach jest oddany na wieczyste składowanie żużel, gruz, skały, ale też węgiel i inne skarpy. Tutaj trwa od pokoleń gorączka węgla, hałdy są naszym Kłodike.

...

Dla wielu to hasiok, śmietnik. Tymczasem hałda żywiła i truła zarazem – mówi Wojtek. – Są trzy fazy życia hałdy i relacji człowieka z nią: usypywanie, potem kohabitacji, gdy dzieci się na niej bawią, ludzie z niej żyją, i wreszcie zamieranie, kiedy resztki węgla się kończą. Wtedy zaczyna być widziana jako zagrożenie. Od narodzin przez życie aż po śmierć. To cykl życia hałdy: inhalowanie trucizną i utrzymywanie się z niej.”

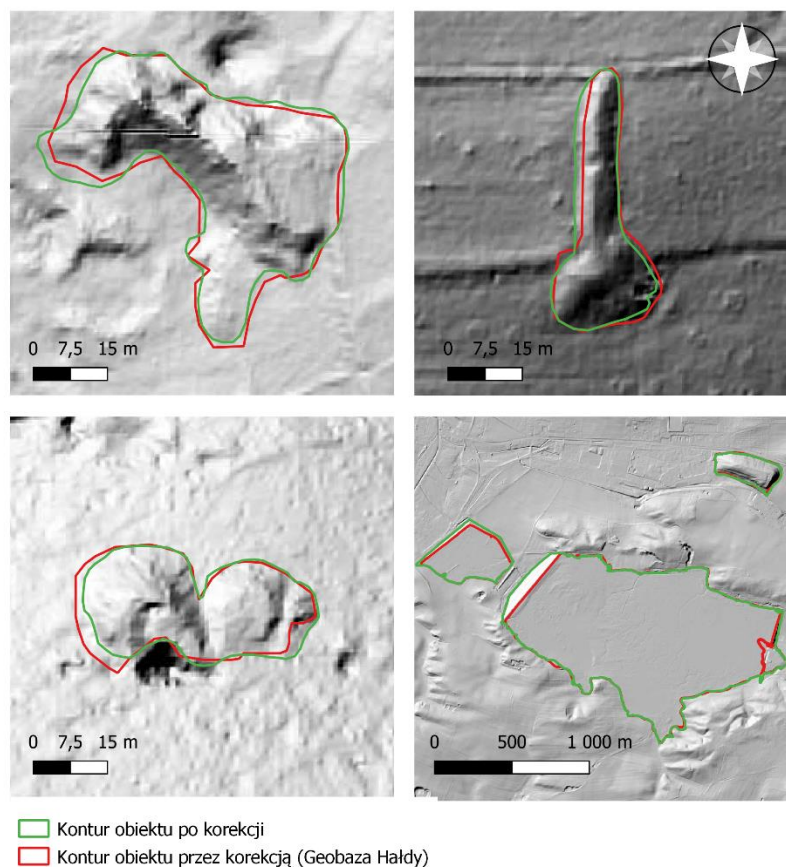
Zbigniew Rokita, *Kajs*



## 6.1. Baza potencjalnych zasobów antropogenicznych na Dolnym Śląsku

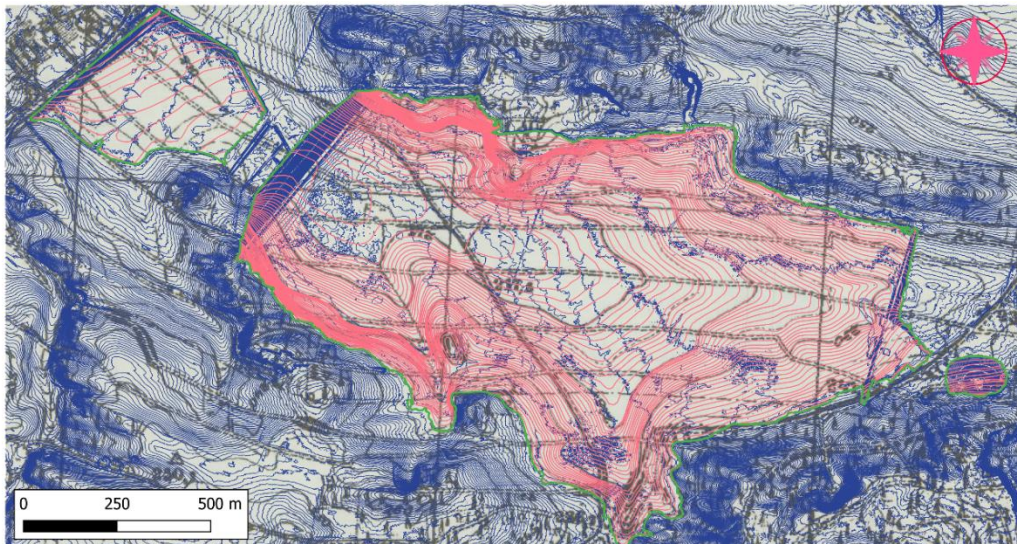
W celu całościowego spojrzenia na problematykę występowania odpadów górniczych, przerobowych i hutniczych na Dolnym Śląsku stworzyłem geoprzestrzenną bazę danych. Informacje czerpałem w głównej mierze z bazy Hałdy wykonanej przez Państwowy Instytut Geologiczny-Państwowy Instytut Badawczy [131]. Dane przetwarzałem wspólnie z dr Adamem Góreckim w celu otrzymania odpowiedniego wkładu dla badań w kierunku pozyskania informacji o potencjale metali krytycznych w tych odpadach. Wykonane kroki to:

- 1) pozyskanie danych w postaci pliku .shp oraz .xlsx z Narodowego Archiwum Geologicznego (druga wersja opublikowanej geobazy Hałdy);
- 2) odfiltrowanie obiektów niezwiązanych z występowaniem rud (w głównej mierze hałd węglowych);
- 3) poszerzenie bazy o obiekty znajdujące się w bliskim sąsiedztwie tych już udokumentowanych na podstawie obrazu LiDAR i ortofotomapy;
- 4) poszerzenie bazy o obiekty z obszaru Szklar;
- 5) korekcja granic obiektów w oparciu o aktualne dane LiDAR (rys. 48);



Rys. 48. Przykłady uszczegółowienia konturów obiektów na potrzeby obliczenia ich objętości

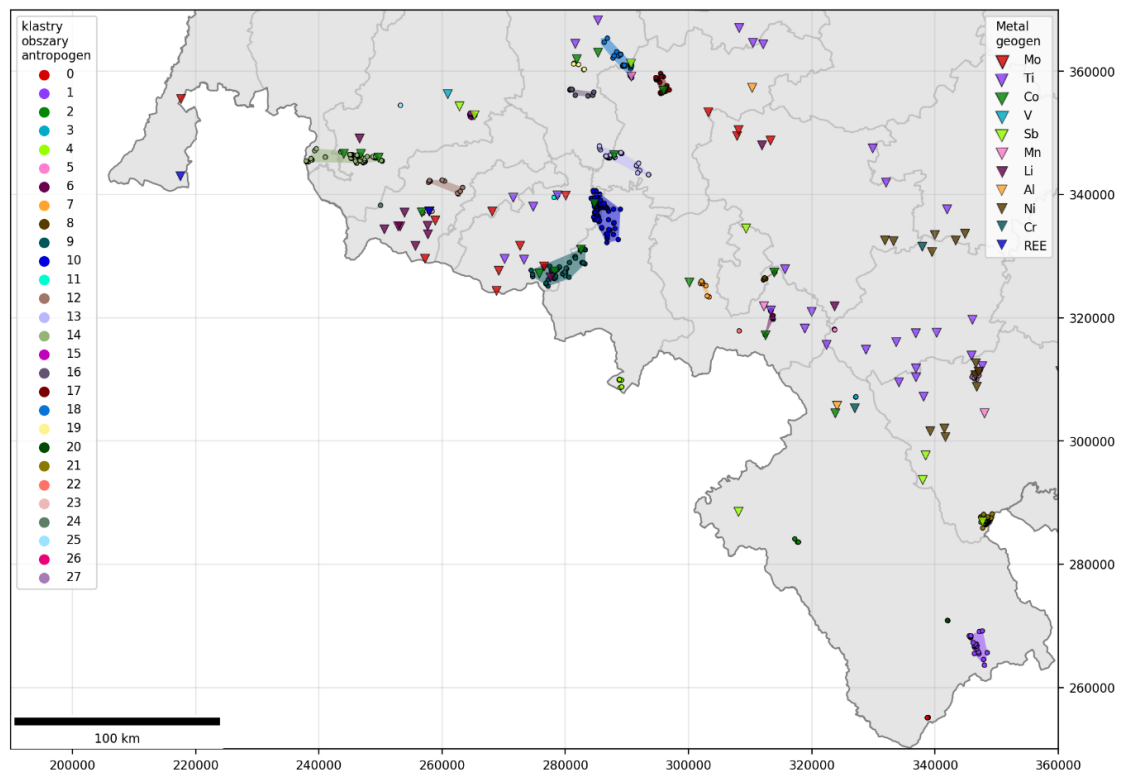
- 6) odtworzenie spągów wszystkich obiektów w oparciu o historyczne mapy topograficzne (rys. 49);



- kontury obiektów
- odtworzony kształt dna osadnika
- aktualna topografia terenu

Rys. 49. Przykład odtworzenia spągu obiektu na podstawie map Messtichblätter oraz map współczesnych

- 7) pogrupowanie hałd w klastry przy wykorzystaniu algorytmu DBSCAN;
- 8) zestawienie lokalizacji klastrów i obiektów z bazą wystąpień geogenicznych (rys. 50);



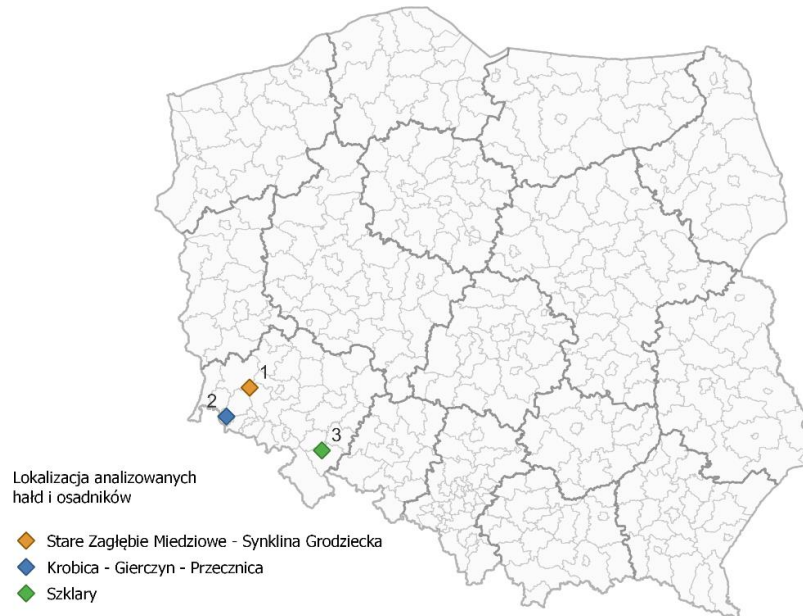
Rys. 50. Baza danych obiektów antropogenicznych (punkty) oraz obszarów ich sklastrowania, a także wystąpień geogenicznych (trójkąty)

- 9) selekcja reprezentatywnych klastrów

Ostatecznie wyselekcjonowałem obszary takie jak (rys. 51):

- Krobica-Gierczyn-Przecznica – hałdy reprezentowane przez znaczną liczbę pozycji w bazie, są to obiekty stosunkowo małe, rozproszone i przykryte roślinnością;

- Stare Zagłębie Miedziowe, synklina grodziecka – hałdy i osadniki mające znaczne rozmiary oraz występujące w formie kilku obiektów skupionych na mniejszym obszarze;
- Szklary – hałdy żużlu oraz nadkładu o średnich rozmiarach, skupione wokół jednego obszaru górniczego.



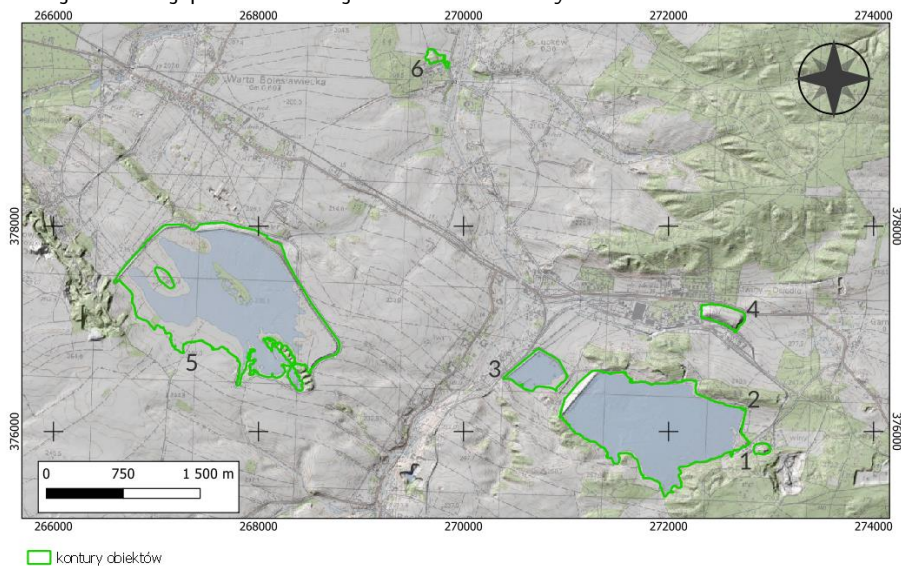
Rys. 51. Lokalizacja obszarów analizy obiektów antropogenicznych

10) Selekcja obiektu do obliczeń potencjału metali krytycznych

## 6.2. Stare Zagłębie Miedziowe – identyfikacja potencjału

### 6.2.1. Lokalizacja obiektów

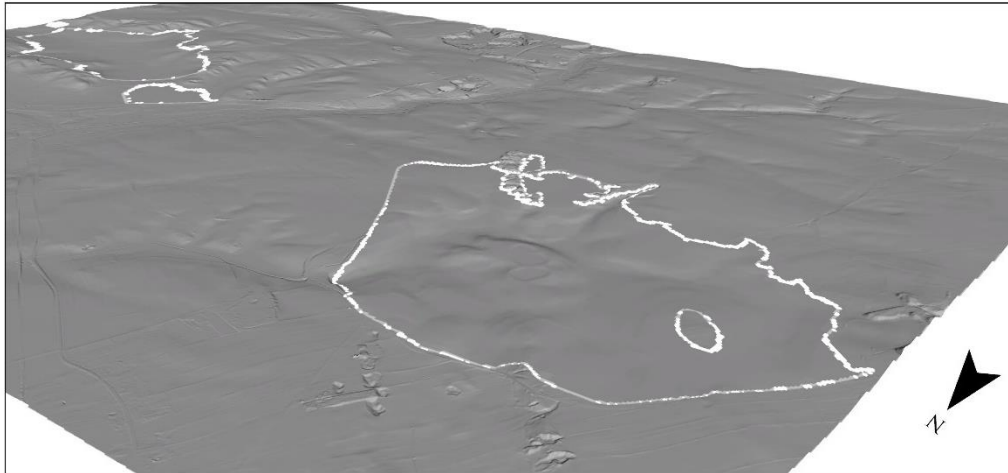
Analizowane obiekty na które składają się trzy obiekty osadnikowe i trzy hałdy są zlokalizowane w pobliżu miejscowości Iwiny, Warta Bolesławiecka, Lubków. Są one rozłożone na obszarze o wielkości około 7 na 4,5 km (rys. 52). Największym jest tzw. osadnik Wartowice, drugim natomiast pod względem zajmowanej powierzchni jest zbiornik Iwiny.



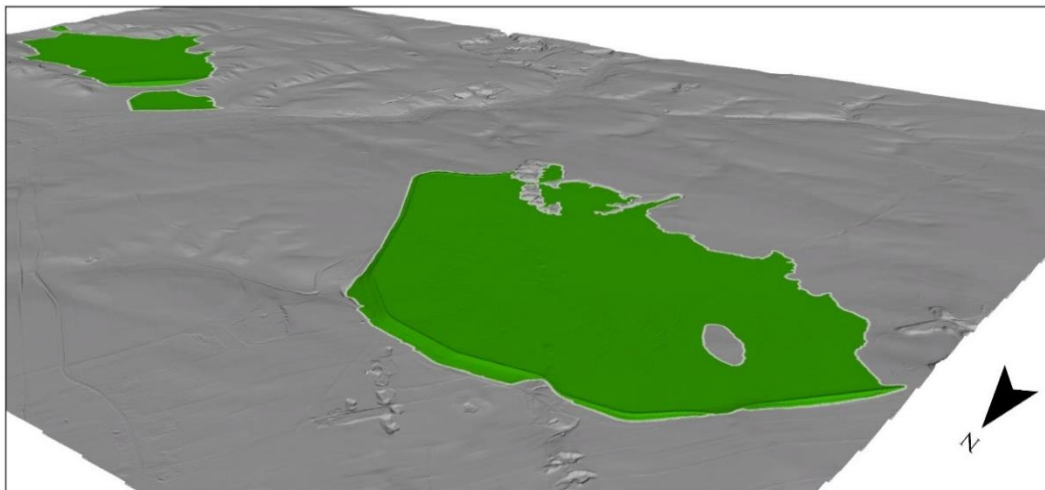
Rys. 52. Lokalizacja obiektów antropogenicznych w obszarze Iwiny

### 6.2.2. Objętości obiektów

Osadniki poflotacyjne tak jak i analizowane obiekty charakteryzują się tym, że ze względu na rodzaj składowanego materiału (pulpa) były umieszczane w naturalnych lub antropogenicznych obniżeniach terenu. Taka sytuacja jest obserwowana zarówno na odtworzonym spągu osadników Wartowice (rys. 53 (1)) i Iwiny (rys. 54 (1)). Natomiast wierzchnia warstwa takich obiektów to przeważnie powierzchnia płaska powiązana z tamami/zaporami, co również jest obserwowane dla analizowanych obiektów (rys. 53 (2), rys. 54 (2)).



1)



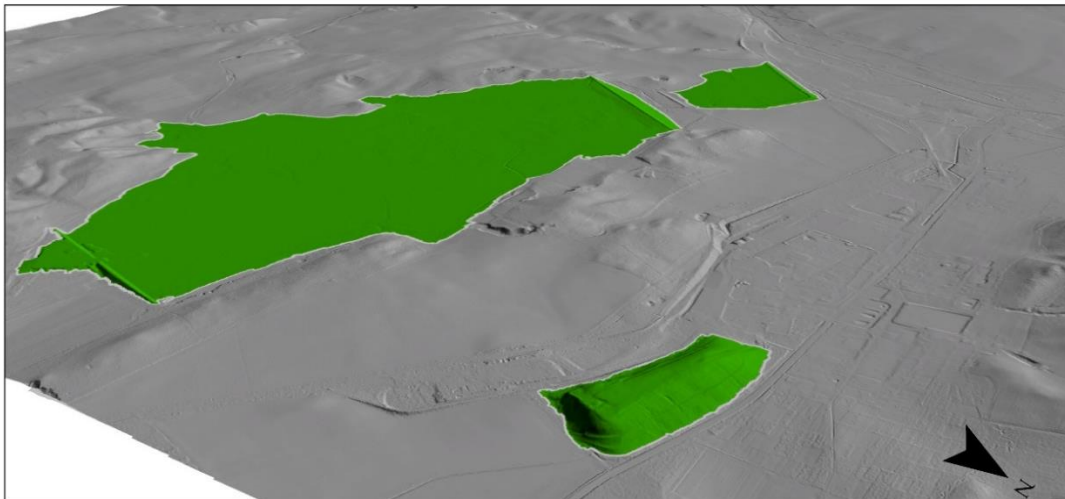
2)

Rys. 53. Obszar osadnika Wartowice 1) – odtworzona topografia terenu na podstawie historycznej mapy topograficznej 2) – obecna rzeźba terenu.

W przypadku hałd natomiast możliwe są różne przypadki, jednak na opisywanym przykładzie dominowały tereny płaskie lub o małym nachyleniu (rys. 54 (1)).



1)



2)

Rys. 54. Obszar osadnika lwin 1) – odtworzona topografia terenu na podstawie historycznej mapy topograficznej 2) – obecna rzeźba terenu.

Dzięki wykorzystaniu opracowanego sposobu obliczenia objętości obiektów tj. zdefiniowania ich granicy, odtworzeniu spągu oraz wykorzystaniu stworzonego algorytmu możliwe było obliczenie objętości obiektów, których suma wyniosła niemal 29 milionów  $m^3$  (tab. 19). Objętość hałdy numer 4 przyjęła wartości bliskie tych spotykanych w literaturze naukowej <sup>[130]</sup>. Pełna charakterystyka obiektów zawarta jest w zał. 6.

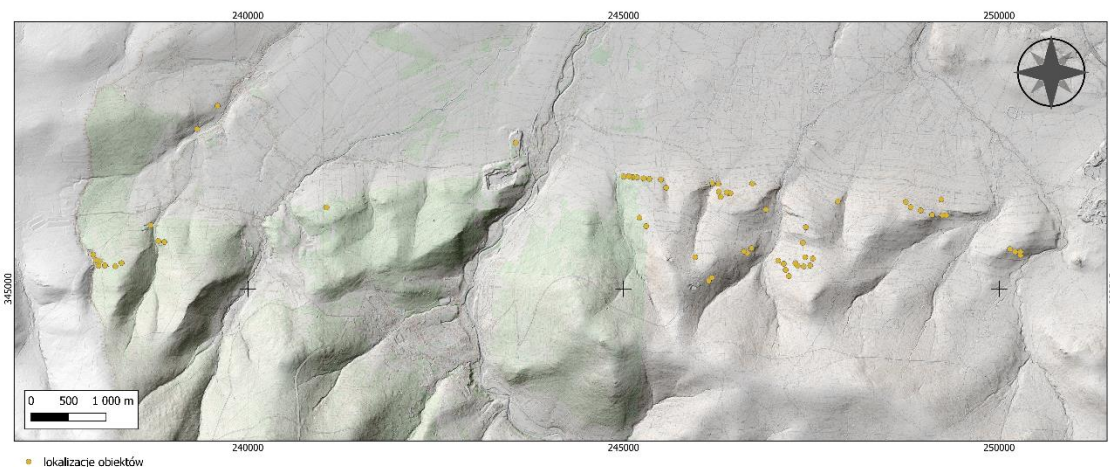
Tab. 19. Objętości obiektów w obszarze lwin

id obiektu	Objętość [ $m^3$ ]
1	73 866.36
2	13 031 513.34
3	179 882.53
4	932 631.12
5	14 671 733.83
6	56 945.87
<b>suma</b>	<b>28 946 573.05</b>

## 6.3. Krobica-Gierczyn-Przecznica – identyfikacja potencjału

### 6.3.1. Lokalizacja obiektów

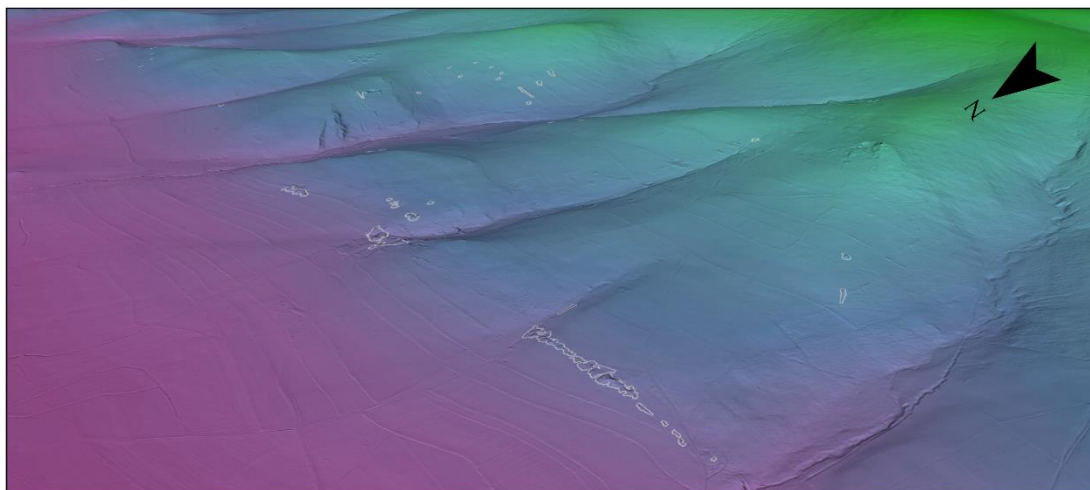
W celu ukazania różnorodności obiektów na Dolnym Śląsku do analizy wyselekcjonowałem obszar Krobica-Gierczyna-Przecznica. Hałdy na tym obszarze występują zgodnie z przebiegiem struktury, z którą są związane – pasmem łupków łuszczycowych. Wystąpienia hałd rozciągają się na równoleżnikowo rozciągniętym pasie o długości ok. 14 km i szerokości 2-3 km (rys. 55). Co istotne obiekty te cechują stosunkowo małe rozmiary (maksymalne wymiary nie przekraczające 100 m dla większości obiektów)



● lokalizacje obiektów

Rys. 55. Lokalizacja obiektów antropogenicznych w obszarze Krobica-Gierczyn-Przecznica

Hałdy występują na granicy mezoregionu Pogórze Izerskie oraz Góry Izerskie. Co jest również zauważalne w rzeźbie terenu przechodzącej w topografię górską (rys. 56).

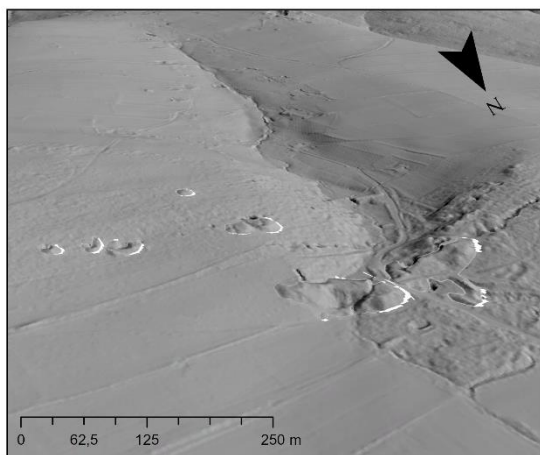


Rys. 56. Morfologia terenu w pobliżu Gierczyna

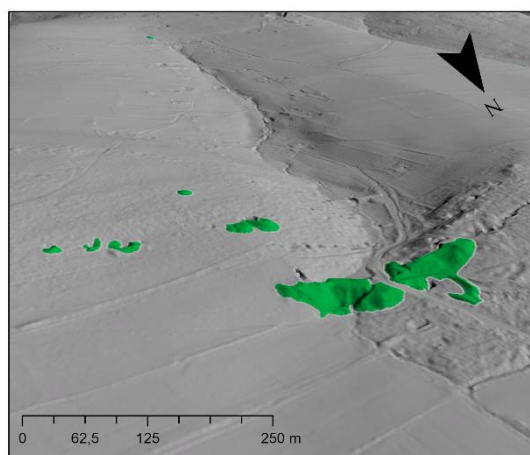
### 6.3.2. Objętości obiektów

Odtworzenie spągów obiektów było utrudnione ze względu na fakty takie jak małe rozmiary obiektów, oraz często występowały one wokół wyrobisk (wkopów, szybków), co znacząco utrudniało pełne zrozumienie rzeźby terenu przed powstaniem obiektu (rys 57-58).



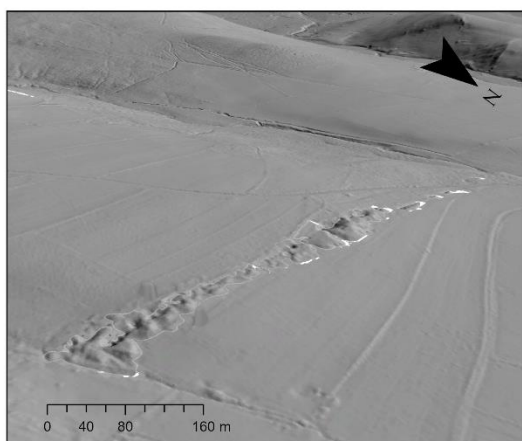


1)

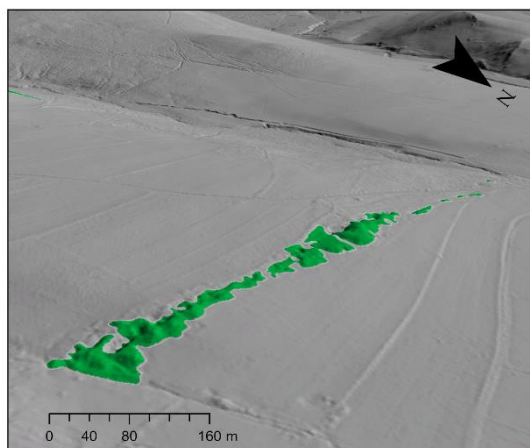


2)

Rys. 57. Obszar zeskładowania hałd w pobliżu Gierczyna 1) – odtworzona topografia terenu na podstawie historycznej mapy topograficznej 2) – obecna rzeźba terenu.



1)



2)

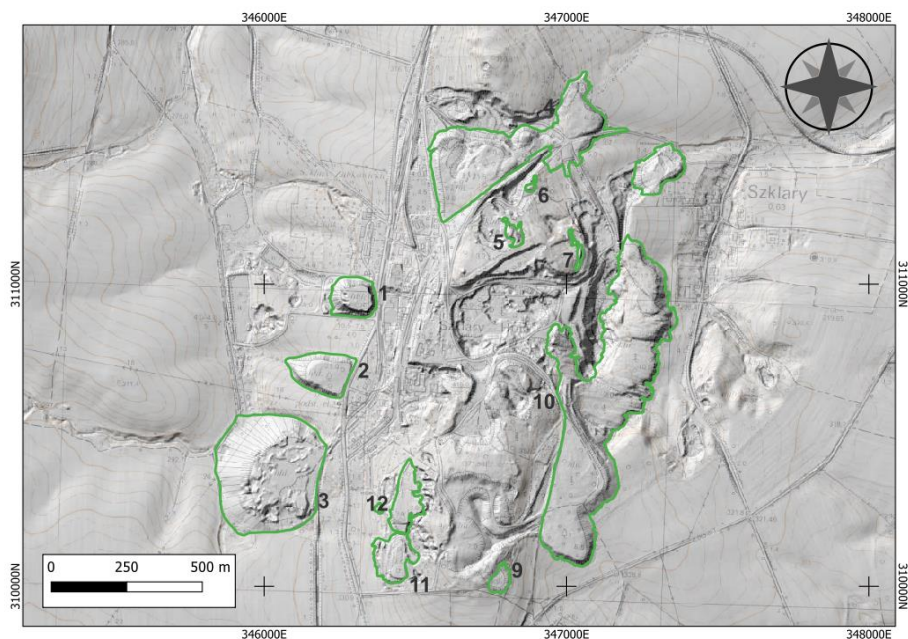
Rys. 58. Obszar zeskładowania hałd w pobliżu Gierczyna 1) – odtworzona topografia terenu na podstawie historycznej mapy topograficznej 2) – obecna rzeźba terenu.

Ostatecznie, sumaryczna obliczona objętość 65 hałd z obszaru Krobica-Gierczyn-Przecznica wynosi 448 864,70 m<sup>3</sup> (pełna tabela – zał. 7). Stanowi to zaledwie 1,5% objętości obiektów z lwin.

## 6.4. Szklary – identyfikacja potencjału

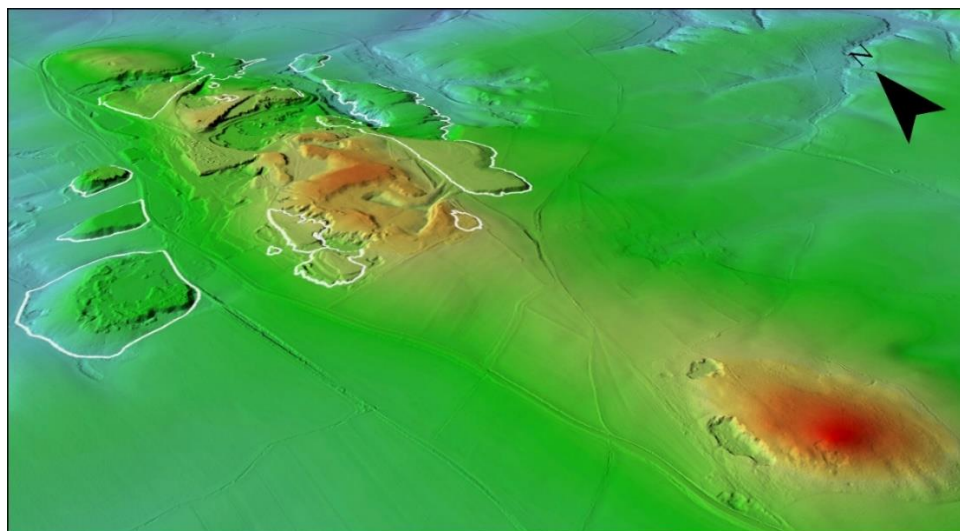
### 6.4.1. Lokalizacja obiektów

Hałdy występujące w Szklarach przez dziesiątki lat wkomponowały się w krajobraz. Największą uwagę zwracają hałdy żużla zlokalizowane po zachodniej stronie obszaru (rys 59). Jednak w trakcie prac określiłem położenie 11 hałd nadkładu również w centralnej i wschodniej części masywu (rys. 59).



Rys. 59. Lokalizacja hałd na obszarze dawnej działalności górniczej w Szklarach

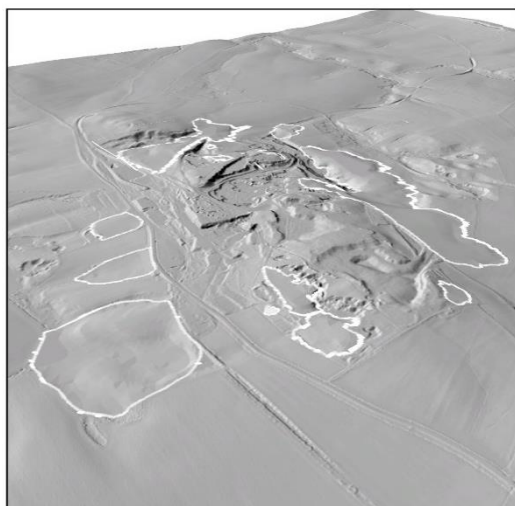
Hały występujące na tym terenie są wynikiem wyeksploatowania centralnej części masywu Szklar – Szklanej Góry (rys. 60)



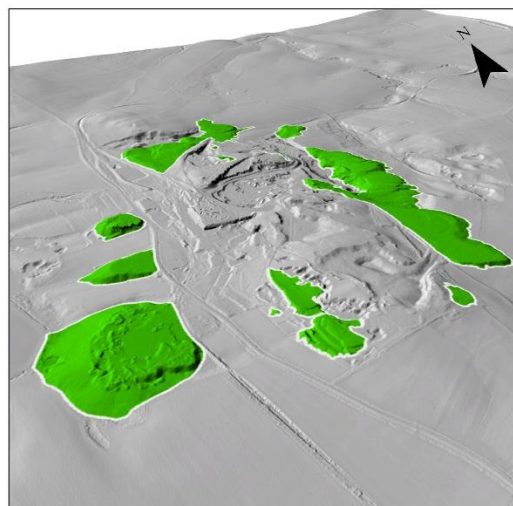
Rys. 60. Masyw Szklar rozciągający się południkowo. Od zachodu widoczne Wzgórze Koźmickie, następnie w znacznej części wyeksploatowana Szklana Góra, a na północy Wzgórze Tomickie.

#### 6.4.2. Objętości obiektów

W przypadku odtworzenia spągów hałd zużła było to stosunkowo prostym zadaniem, natomiast w przypadku hałd nadkładu do istotnych utrudnień należy uwzględnić fakt ich częściowego zeskładowania w wyrobiskach odkrywkowych. Wobec tego wymagało to, dokładnego przyjrzenia się sytuacji i próbie odtworzenia przebiegu spągu w miejscach występowania przykrytych warstwami materiału skarp wyrobiska.



1)



2)

Rys. 61. 1) Odtworzona rzeźba terenu Szklar przed zeskładowaniem odpadów.

Przy wykorzystaniu metodyki oraz algorytmu opisanego w Rozdziale 3 wykonałem obliczenia objętości dla 13 wyszczególnionych hałd na obszarze Szklar. Ich sumaryczna objętość wyniosła około 3 miliony m<sup>3</sup>, powierzchnia przekracza 17 000 m<sup>2</sup>. Największa z hałd (3) miała objętość bliską 1,4 mln m<sup>3</sup> (tab. 20). Łączna objętość hałd na tym obszarze stanowi 10,5% objętości materiału z okolic Iwin i Warty Bolesławieckiej i niemal siedmiokrotność ilości materiału zeskładowanego w okolicy Krobicy-Gierczyna-Przecznicy. Pełna charakterystyka obiektów ze Szklar jest zawarta w zał. 8.

Tab. 20. Wyniki obliczeń objętości oraz powierzchnia każdego z obiektów na obszarze Szklar.

<b>id obiektu</b>	<b>Objętość [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Powierzchnia [m<sup>2</sup>]</b>
<b>1</b>	189 377.99	17 437
<b>2</b>	238 599.21	23 734
<b>3</b>	1 346 292.09	118 694
<b>4</b>	342 869.39	108 707
<b>5</b>	8981.43	3 405
<b>6</b>	1130.89	911
<b>7</b>	2994.00	1 876
<b>8</b>	39 271.34	18 460
<b>9</b>	5174.62	4 604
<b>10</b>	877 287.63	214 896
<b>11</b>	48 289.86	16 836
<b>12</b>	32 216.28	15 704
<b>13</b>	420.06	611
<b>suma</b>	3 051 978.59	17 437

#### 6.4.3. Poszukiwanie i rozpoznawanie hałd na terenie Szklar przy wykorzystaniu metody historycznego poszukiwania i rozpoznawania

Analiza materiałów historycznych, zgodnie z metodą historycznego poszukiwania i rozpoznawania, pozwoliła na częściowe odtworzenie historii obiektów. Najlepszym przykładem jest hałda numer 1 (rys. 58). Na materiałach kartograficznych (Messtischblätter) z roku 1908 teren jest nieprzekształcony. Mapa topograficzno-geologiczna z roku 1929 uwidacznia trzy znaczące fakty (rys. 62):

- 1) na terenie miała miejsce działalność górnicza, zorientowana na produkcję rud niklu (odwrócony symbol górniczy, napis Nickel);
- 2) w zaznaczonym miejscu doszło do zeskładowania materiału antropogenicznego (symbol A – niem. Antropogenische);
- 3) obiekt ten jest połączony z infrastrukturą po drugiej stronie drogi – plany sytuacyjne z tego okresu pokazują, że była to huta.

Obecnie (2023) na zaznaczonym terenie wciąż istnieje obiekt wyróżniający się swoją morfologią od terenu wokół.

Taki ciąg logiczny pozwala na stwierdzenie, że analizowana hałda powstała pomiędzy rokiem 1908 a 1929 i była efektem działalności górniczej. Była wiązana z eksploatacją rud niklu i z działaniem huty. Zestawione ze sobą fakty pokazują, że w tym przypadku jest to hałda żużla pohnutniczego z przerobu rud niklu i że wciąż występuje na tym terenie.



Rys. 62. Przykład analizy metody historycznego poszukiwania i rozpoznawania na terenie Szklar

Dalsze poszerzenie analizy dotyczy przypisania metali, które w całym opisanym procesie mogły migrować ze złoża do odpadów hutniczych.

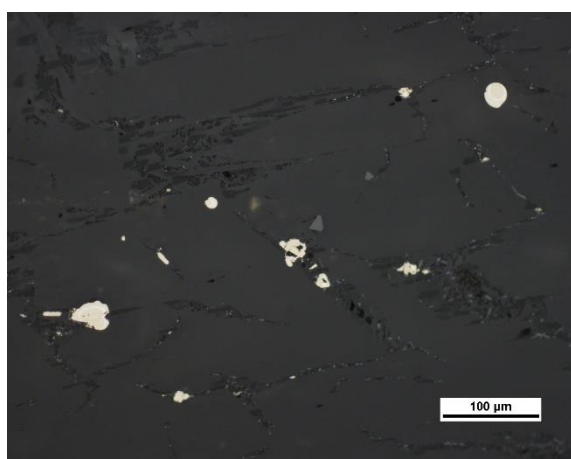
#### 6.4.4. Analizy geochemiczne prób żużla z hałdy w Szklarach

W ramach badań potwierdzających występowanie metali w próbach żużla ze Szklar we współpracy z dr Gabrielą Kozub-Budzyń wykonałem badania prób żużla pod mikrosondą elektro-nową. Próba ta posłużyła jako indykator (rys. 63).

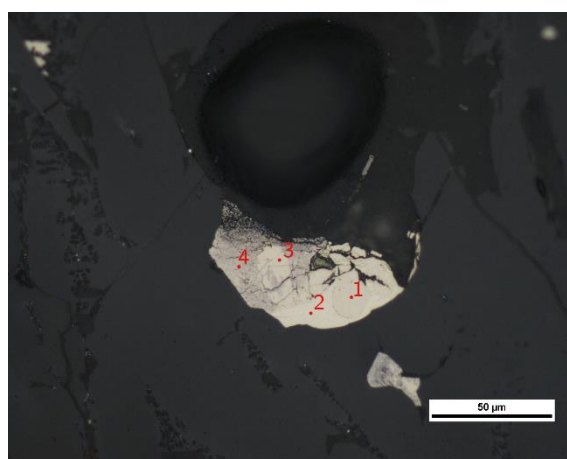


Rys. 63. Analizowana hałda żużla w roku 2019, miejsce poboru próby - indykatora

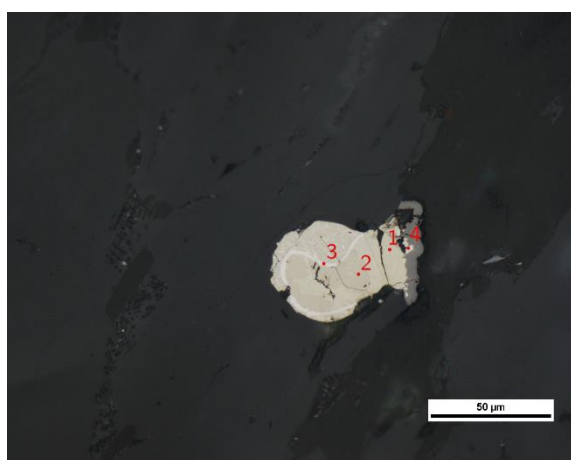
Wyniki wskazują na występowanie w szczególności stopów żelaza i niklu z małą domieszką kobaltu (rys. 64, tab. 21-22).



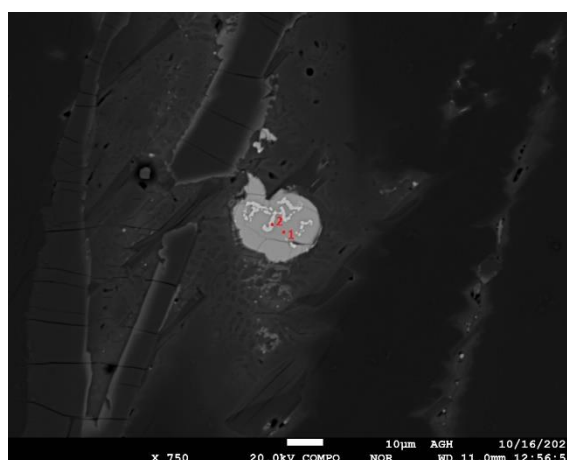
1)



2)



3)



4)

Rys. 64. Obrazy mikroskopowe wystąpień metali w próbce żużla oraz miejsca wykonywania analizy mikrosondą elektronową

Tab. 21. Wyniki analiz pod mikrosondą wystąpień metali w próbce z hałdy żużla w Szklarach.

S	Zn	Fe	Hg	Ag	Co	Pb	Cu	Sb	Ni	Mn	As	Suma [%]	Zdjęcie i punkt
34,22	-	31,48	-	0,012	0,216	0,112	-	0,005	34,723	0,024	-	100,792	rys. 64 (2), punkt 1
30,095	-	13,091	-	0,003	0,117	0,166	-	-	57,136	0,015	-	100,623	rys. 64 (2), punkt 2
34,46	-	31,538	-	-	0,202	0,192	-	-	34,137	0,019	-	100,548	rys. 64 (2), punkt 3
36,428	-	13,19	0,049	0,001	0,098	0,17	-	0,004	45,051	0,005	-	94,996	rys. 64 (2), punkt 4
30,407	-	11,838	-	-	0,136	0,158	-	-	58,841	0,011	-	101,391	rys. 64 (3), punkt 1
34,312	-	29,906	-	0,001	0,231	0,156	-	-	35,361	0,006	-	99,973	rys. 64 (3), punkt 2
3,603	-	29,371	0,022	-	0,307	0,041	-	0,009	67,389	0,027	-	100,769	rys. 64 (3), punkt 3
0,11	-	26,871	-	0,004	0,215	0,016	-	-	71,231	0,005	-	98,452	rys. 64 (3), punkt 4
33,332	-	34,986	-	0,002	0,22	0,174	0,007	-	29,976	0,001	-	98,698	rys. 64 (4), punkt 1
7,741	-	30,954	0,027	0,017	0,28	0,054	-	-	58,016	0,01	-	97,099	rys. 64 (4), punkt 2

Tab. 22. Wyniki analiz pod mikrosondą matrycy w próbce z hałdy żużla w Szklarach

SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	ZnO	MgO	CaO	NiO	CoO	PbO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CuO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Suma [%]	Zdjęcie
29,923	0,161	0,324	-	32,482	0,761	-	20,157	12,883	-	-	0,022	0,005	-	-	0,041	-	-	96,759	rys. 64 (1)
53,484	0,042	1,213	1,074	2,853	0,106	0,006	17,781	21,701	0,049	-	-	0,004	-	0,021	0,033	-	-	98,367	
30,361	0,14	6,16	-	18,589	0,438	0,035	9,291	26,103	-	-	0,024	0,087	0,313	0,076	0,064	-	-	91,681	
53,228	0,024	1,418	1,222	2,955	0,135	-	18,058	21,285	0,042	-	-	-	0,003	0,094	0,015	-	-	98,479	
53,65	0,041	1,094	1,332	2,652	0,093	0,022	18,054	21,194	0,021	-	-	0,005	-	0,062	0,02	-	-	98,24	
37,73	0,033	0,051	0,112	21,72	0,46	0,016	36,645	1,234	0,045	-	0,042	-	-	0,007	0,016	-	-	98,111	
41,44	0,208	8,288	0,004	14,447	0,399	-	8,111	23,349	0,046	0,027	0,005	0,026	-	0,06	0,099	-	-	96,509	
53,574	-	1,528	1,263	3,019	0,091	-	18,181	21,276	0,069	0,002	-	-	-	0,033	-	-	-	99,036	

#### 6.4.5. Potencjalna wartość hałdy z obszaru Szklar

W Szklarach główną kopalinią jest nikiel, wobec tego stanowi on podstawę do obliczenia stosunku poszczególnych cen metali.

Obliczenia potencjalnej wartości dla hałdy (1):

$$PW_{o.a.} = W_{Meq} + W_{te} + W_{kt}$$

Wartość metali w obiekcie:

$$W_{Meq} = M_{eq} \cdot \text{masa obiektu} \cdot \text{cena}_{MeG} [PLN]$$

Gdzie:

Metal ekwiwalentny, liczony na podstawie średniej z wyników analiz próbek – indykatorów. Dla obliczonych średnich odchylenie standardowe jest wyższe od nich co jest wynikiem dużej zmienności geochemicznej w obrębie hałdy. Ostatecznie oznacza to możliwie wysoki wpływ na uzyskane wartości [182]:

$$M_{eq} = \%Me_G + \sum_{n=1} \%Me_x \cdot scm_x [\%]$$

$$M_{eq} = \%Ni + \%Co \cdot scm_{Co} + \%Cr \cdot scm_{Cr} [\%]$$

$$M_{eq} = 0,170 + 0,016 \cdot 2,53 + 0,449 \cdot 0,53 = 0,448 \%$$

Masa obiektu, równoważna obliczonej objętości oraz dobranej gęstości nasypowej [183]:

$$\text{masa obiektu} = \text{objętość} \cdot \text{gęstość nasypowa} [t]$$

$$\text{masa obiektu} = 189\,377,99 \text{ m}^3 \cdot 1,4 \frac{t}{\text{m}^3} = 265\,129,19 \text{ t}$$

Cena metalu głównego równa cenie niklu na LME w roku 2022 pomnożona przez kurs dolara na dzień 1.06.2023.

$$\text{cena}_{Ni} = 25\,814,83 \frac{\text{US\$}}{t} \cdot 4,06 \frac{\text{PLN}}{\text{US\$}} = 104\,808,2 \frac{\text{PLN}}{t}$$

Po podstawieniu powyższych:

$$W_{Meq} = 0,448 \% \cdot 265\,129,19 \text{ t} \cdot 104\,808,2 \frac{\text{PLN}}{t} = 124\,613\,761,92 [PLN]$$

Wartość terenu:

Wartość działki jest zależna od jej potencjalnej ceny rynkowej oraz powierzchni obiektu. Jako cenę rynkową przyjąłem cenę działek budowlanych w miejscowościach położonych w bliskim sąsiedztwie Szklar.

$W_{te} = \text{cena rynkowa działki} \cdot \text{powierzchnia odzyskanego terenu [PLN]}$

$$W_{te} = 36 \frac{\text{PLN}}{\text{m}^2} \cdot 17\,437 \text{ m}^2 = 627\,732 \text{ PLN}$$

Wartość kopalin towarzyszących:

W przypadku kopalin towarzyszących w analizowanej hałdzie przyjąłem możliwość sprzedaży żużla po ekstrakcji niklu. Jego cenę przyjąłem na podstawie analizy cen rynkowych żużli do wykorzystania na kruszywo.

$$W_{kt} = \sum_{n=1} W_{kt_n}$$

$W_{kt} = \text{cena żużla} \cdot (\text{masa hałdy} - \text{masa metali}) \text{ [PLN]}$

$$W_{kt} = 20 \frac{\text{PLN}}{\text{t}} \cdot (265\,129,19 - 397,69) = 5\,294\,629,92 \text{ [PLN]}$$

Ostatecznie potencjalna wartość wyniesie:

$$PW_{o.a.} = W_{Meq} + W_{te} + W_{kt}$$

$$PW_{o.a.} = 124\,613\,761,92 + 627\,732 + 5\,294\,629,92 = 130\,520\,298,29 \text{ PLN}$$

#### 6.4.6. Analiza SWOT hałdy

W celu zobiektywizowania spojrzenia na potencjał obiektów antropogenicznych zaproponowałem wykorzystanie analizy SWOT w metodzie PESTEL (opis – Rozdział 3). Takie ujęcie pozwala na analizę czynników również pozafinansowych, mających istotny wpływ na możliwość eksploatacji obiektu. Również w przypadku analizowanej, przykładowej hałdy w Szklarach kwestie wykraczające poza jej potencjalną wartość mogą mieć wpływ na przyszły projekt (tab. 23).

Cel analizy: Określenie możliwości eksploatacji i przeróbki hałdy w Szklarach pod kątem odzysku metali, terenu oraz kopalin towarzyszących.

Wynik analizy: Do istotnych mocnych stron hałdy jako potencjału antropogenicznego jest udokumentowane wystąpienie metali w składzie żużla oraz możliwość jego wykorzystania jako ścierniwo, a także odzysk terenu, co nadaje hałdzie potencjalną wartość na poziomie 130 milionów złotych. Do jej słabych stron należy brak pełnego rozpoznania zawartości metali w całym obiekcie oraz brak opracowanej technologii przerobu żużla. Wśród znaczących ograniczeń jest także niepewna sytuacja właścicielska. Dla hałdy szansą byłoby pozyskanie funduszy na dalsze badania, a także wsparcie ze strony samorządu w kierunku oczyszczania terenów gminy. Wśród zagrożeń leży wyparcie projektu przez bardziej opłacalne geogeniczne surowce metali i kruszywa. Blokerem może być również sprzeciw społeczny i brak wsparcia przez samorząd terytorialny.



Tab. 23. Analiza SWOT PESTEL hałdy w Szklarach

Czynniki wewnętrzne	
Mocne strony +	Słabe strony –
<p>Wskazanie mocnych stron hałdy jako potencjału do eksploatacji</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Potencjalna wartość hałdy na poziomie 130 milionów złotych.</li> <li>Udokumentowane występowanie metali w odpadzie (Ni, Fe, Cr, Co)</li> <li>Możliwość wykorzystania materiału po przerobie, dzięki sprawdzonym właściwościom fizycznym (jako materiał ścierny)</li> <li>Bliskość głównych dróg</li> <li>Możliwość odzysku terenu w pobliżu parkingu dla tirów</li> <li>Możliwość likwidacji negatywnego wpływu hałdy na środowisko</li> </ol>	<p>Wskazanie słabych stron hałdy jako potencjału do eksploatacji</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Brak opracowanej metody przerobu w kierunku pozyskania metali</li> <li>Zmiany właścicielskie hałdy</li> <li>Stosunkowo mała objętość obiektu</li> <li>Potrzeba uniknięcia pylenia w trakcie eksploatacji</li> <li>Brak szczegółowego rozpoznania hałdy</li> <li>Okresowe ubywanie materiału w wyniku eksploatacji obiektu</li> </ol>
Czynniki zewnętrzne (PESTEL)	
Szanse +	Zagrożenia –
<p>Szanse mogące pojawić się przed potencjalnym projektem geologiczno-górnictwem hałdy w ujęciu PESTEL</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Wzrost znaczenia i cen metali w szczególności tych krytycznych (Co, Cr)</li> <li>Wspieranie finansowe projektów dla potencjalnych zasobów antropogenicznych przez fundusze krajowe i zagraniczne</li> <li>Wsparcie samorządu terytorialnego projektów oczyszczających tereny gminy.</li> </ol>	<p>Zagrożenia mogące pojawić się przed potencjalnym projektem geologiczno-górnictwem hałdy w ujęciu PESTEL</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Większe znaczenie tańszych surowców pochodzących z zasobów geogenicznych</li> <li>Brak zgody społeczności lokalnej na rozpoczęcie projektu</li> <li>Brak wsparcia projektu przez samorząd terytorialny</li> </ol>

## 6.5. Szklary – metody pozyskania

### 6.5.1. Metody górnicze

Hałdy w Szklarach cechuje podobna forma wystąpienia jak w przypadku innych obiektów w przedstawionej bazie danych - obiekty te występują na powierzchni Ziemi. Ze względu na ten fakt, skuteczną metodą eksploatacji jest wykorzystanie metody odkrywkowej. W znacznej większości są to obiekty o stosunkowo niewielkich rozmiarach, wobec czego odpowiednie byłoby wykorzystanie koparek jednonaczyniowych połączonych z transportem kołowym. W przypadku proponowanego scenariusza – eksploatacji złoża oraz jednoczesnego wyeksploatowania hałd. Sposób eksploatacji powinien być zaadaptowany z tego wykorzystanego w głównym procesie górniczym.

### 6.5.2. Metody przeróbcze

Na obszarze Szklar wyróżniłem dwa rodzaje hałd – nadkładowe oraz żużlowe. W przypadku skał nadkładowych przemieszanych ze skałami wzbogaconymi ich charakterystyka jest analogiczna to tej spotykanej dla rudy, wobec tego zaproponowana w Rozdziale 5 metoda hydrometalurgicznego wzbogacenia jest metodą adekwatną również dla odpadów.

Drugim wymienionym rodzajem obiektów odpadowych są hałdy żużła, przeprowadzone badania mineralogiczne udowodniły, że metale występują głównie w postaci tzw. sferul, czyli stopów i minerałów rozproszonych w krzemianowej matrycy. Adekwatną technologią przeróbki dla takich materiałów jest skruszenie i zmielenie urobku do odpowiedniej frakcji, a następnie wykorzystania prostych metod wzbogacenia jak metoda magnetyczna. W przypadku kontynuacji badań nad żużłami ze Szklar rekomenduję wykonanie badań w tym zakresie.

---

## Rozdział 7. Wykorzystanie metali krytycznych na Dolnym Śląsku

---

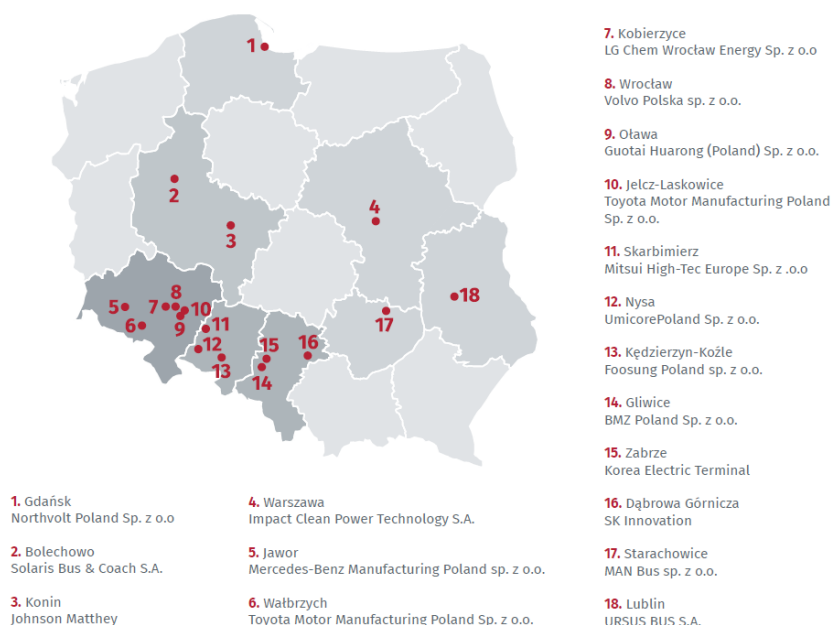


Wykonane badania dotyczyły 14 metali (lit, aluminium, tytan, wanad, chrom, mangan, kobalt, nikiel, gal, german, niob, molibden, antymon, wolfram) oraz 2 grup metali (platynowce, pierwiastki ziem rzadkich). Ostatecznie przeprowadzone identyfikacje i selekcja obszarów powodowały zacieśnienia się listy potencjalnych do pozyskania metali na Dolnym Śląsku. Wskazałem na współwystępowanie kobaltu w złożu polimetalicznym LGOM oraz występowanie niklu, chromu i kobaltu w złożach oraz odpadach Szklar.

Kobalt może być wykorzystywany w produkcji akumulatorów, nadstopów, katalizatorów i magnesów i jest notowany na Londyńskiej Giełdzie Metali (LME) jak niemal czysty metal (99,8%). Jego cena wynosi ok. 33 000 US\$/t (3-miesięczna cena kobaltu na czerwiec 2023). Nikiel również jest stosowany do produkcji baterii i katalizatorów oraz stopów. Cena produktu o zaw. 99,8% niklu na giełdzie londyńskiej wynosi na czerwiec 2023 ok. 21 000 US\$/t. Chrom jest wykorzystywany szczególnie przy produkcji stali nierdzewnej i żaroodpornej. Jest sprzedawany na giełdzie Szanghajskiej a jego cena w 2022 roku to ok. 11 000 US\$/t. Należy też dodać, że istnieje możliwość sprzedawania nie tylko końcowych produktów, ale też koncentratów.

Istotny jest fakt obecnych wyzwań Europy związanych z jednej strony z szybkim rozwojem technologicznym, transformacją energetyczną a z drugiej z potrzebą rozwoju przemysłu zbrojeniowego, w tym również nacisk na krajową produkcję zbrojeń. Kobalt, chrom i nikiel są szeroko wykorzystywane właśnie w tych obszarach przemysłu co powoduje, że stają się one istotne nie tylko ekonomicznie, ale też strategicznie.

Dolny Śląsk jako obszar wysoko rozwinięty, o dobrej infrastrukturze komunikacyjnej, bliski zachodnim krajom jest wysoce atrakcyjny inwestycyjnie. Ostatnie lata związane są z szybkim rozwojem elektromobilności, która wymaga produkcji akumulatorów, a Dolny Śląsk, dzięki swojej przychylności dla inwestycji stał się hubem dla firm takich jak LG Energy Solution Wrocław czy Mercedes-Benz Manufacturing Poland sp. z o.o. Jest także miejscem rozwoju firm z obszaru automotive (Toyota) (rys. 65).



Rys. 65. Firmy z obszaru automotive i elektromobilności w Polsce w roku 2019 [184]

Podsumowując powyższe, wykorzystanie metali krytycznych w tym kobaltu, niklu i chromu mogłoby mieć miejsce na terenie Dolnego Śląska, ze względu na rozwinięty i wciąż rozwijający się przemysł automotive. Na przeszkodzie stoją wyzwania związane z przede wszystkim zachętą tych inwestorów do wspierania inicjatyw surowcowych na Dolnym Śląsku. Dodatkowo, abym im sprostać niezbędne jest identyfikowanie potencjałów oraz rozwój i wdrażanie ich pozyskania



---

## Rozdział 8. Dyskusja

---





W rozprawie przedstawiłem szereg badań oraz analiz mających na celu wskazanie systematycznego sposobu postępowania, które doprowadzi do określenia potencjałów metali krytycznych w zasobach geogenicznych i antropogenicznych. Tak postawiony problem badawczy spowodował, że w pracy nie skupiłem się wyłącznie na jednym narzędziu, ale na różnorodnych metodach, w dużej części związanych z budową baz danych, ich przetwarzaniem oraz analityką. Próba usystematyzowania wymusza podchodzenie do zagadnień w sposób umożliwiający generalizację wyników. Na przeszkodzie realizacji tematyki stanął brak niezbędnych danych (zawartości metali krytycznych, objętości obiektów antropogenicznych), które uzupełniono poprzez autorskie ujęcie (1) metody historycznego poszukiwania i rozpoznawania zasobów antropogenicznych, (2) metody obliczania metalu ekwiwalentnego dla zasobów geogenicznych i antropogenicznych, (3) sposobu obliczania objętości hałd przy uwzględnieniu kształtu spągu.

Metoda historycznego poszukiwania i rozpoznawania zasobów antropogenicznych znajduje zastosowanie do obiektów zróżnicowanych pod względem czasu powstania, geometrii, geologii, sposobu składowania czy typu obiektu (hałda, osadnik). Jednak do jej słabości zaliczyć można to, że w przedstawionym kształcie dostarcza ona wyłącznie informacje jakościowe. Jest też zależna od materiałów historycznych, więc mogą pojawić się takie przypadki, w których możliwości jej zastosowania będą ograniczone przez znaczący brak źródeł. Metoda ta również opiera się o dowody pośrednie, a nie bezpośrednie (tak jak typowa kampania poszukiwawczo-rozpoznawcza w terenie). Rozwój zaprezentowanego podejścia może umożliwić również ilościowe analizy, jeżeli badanie oparte będzie o silne dowody i logiczne ułożenie cyklu powstania hałdy.

Zaprezentowany sposób szacowania ekwiwalentu zasobów geogenicznych pozwala na wstępny szacunek potencjału metali krytycznych w otworach wiertniczych. Jest to dobry wskaźnik dla projektów na wczesnym etapie analizy, gdzie brakuje danych pozwalających na zastosowanie narzędzi geostatystycznych i ekonomicznych do oceny i wyceny zasobów. Wskaźnik, ze względu na swój charakter, ma słabe strony, takie jak niemożność uwzględnienia istotnych parametrów przerobczych (uzysk) czy operacyjnych (kosztów).

Obliczanie potencjalnej wartości dla zasobów antropogenicznych w zaprezentowanej pracy pozwala na oszacowanie wartości całego obiektu traktowanego jako potencjalne zasoby. Wskaźnik ten, podobnie jak w przypadku zasobów geogenicznych, posiada szereg ograniczeń, które są wynikiem braku danych na analizowanym etapie, co jest zrozumiałe na takim etapie zaawansowania projektu geologiczno-górniczego.

Obliczenie objętości obiektów antropogenicznych zostało wykonane poprzez zastosowanie narzędzi oferowanych w ramach pakietu ModelBuilder programu ArcGIS Pro. Stworzony model pozwala na obliczenie objętości z danych LiDAR oraz z wymodelowanych w trakcie trwania pracy powierzchni dolnych hałd (warstw przed powstaniem obiektu). Do słabych stron modelu należy to, że objętość obliczana jest w oparciu o różnicę pomiędzy rastrowymi danymi, więc nie jest w pełni zachowana geometria obiektów w miejscu ich styku z powierzchnią, w kolejnej wersji algorytmu wskazuję możliwość zastosowania triangulacji jako alternatywnego sposobu modelowania powierzchni oraz kolejno obliczenie objętości pomiędzy dwiema warstwami.

Ostatecznie całość prezentowanych zagadnień jest komplementarna i możliwa do zastosowania w zaproponowanym kształcie. Powyższe kwestie stanowią szansę na dalszy rozwój tematyki.



---

## Rozdział 9. Podsumowanie i wnioski

---



W ramach pracy zaprezentowałem możliwość określenia potencjału metali krytycznych w zasobach geogenicznych i antropogenicznych na przykładzie obszaru Dolnego Śląska. Realizacja pracy pozwoliła na uzyskanie odpowiedzi na pytanie, czy na Dolnym Śląsku występują takie potencjały oraz w jaki sposób można je określić.

Metodyka dla zasobów geogenicznych, przedstawiona w niniejszej pracy, pozwoliła na stwierdzenie, że na Dolnym Śląsku występują obszary o podwyższonym potencjale metali krytycznych. Jednym z nich jest wschodnia część terenu górniczego Lubin oraz przylegającego do niego dawnego obszaru koncesyjnego Niemstów-Wielowieś.

Przedstawiona analiza dla studium przypadku Niemstów-Wielowieś oparta była na danych zebranych poprzez wywiercenie 5 otworów poszukiwawczo-rozpoznawczych oddalonych od siebie o około 1,5 km. W porównaniu do dojrzałych projektów eksploracyjnych jest to mała szczegółowość badań, nie pozwalająca na szacowanie zasobów. Perspektywa na poszerzenie wiedzy na temat tego terenu została otwarta w roku 2022, ze względu na wydanie koncesji Niemstów-Redlice 4/2022/p firmie Viper Trading. Wyniki ich prac, o ile wykonane zostaną z należytą starannością, mogą przyczynić się do udokumentowania zasobów na tym terenie. Nowo wydana koncesja jest też swego rodzaju potwierdzeniem, że obszar ten jest wciąż obiektem zainteresowania inwestorów. Badania powinny koncentrować się na możliwości odzysku poszczególnych metali. W przypadku kobaltu proponowane jest uwzględnienie realiów operacyjnych w KGHM Polska Miedź S.A. co oznacza, że odzyskanie tego metalu mogłoby następować na etapie hutniczym. Niezbędna jest analiza możliwości odzysku z żużli będących ostatecznym odpadem. Moje analizy wykazały występowanie tam kobaltu w wartościach mogących stanowić ekonomiczną zasadność. Określiłem również mineralizację kobaltu obszaru Niemstów-Wielowieś poprzez rozpoznanie kobaltynu. Otrzymana maksymalna zawartość metalu ekwiwalentnego (Cu, Ag, Co, Pb) w teoretycznej furcie na tym obszarze wyniosła 11650,99 ppm, podczas gdy obliczona przy zachowaniu tej samej metodyki maksymalna zawartość metalu ekwiwalentnego na obszarze ZG Lubin wyniosła 23 750 ppm.

Drugim obszarem są Szklary, Były one przedmiotem działalności górniczej w przeszłości, a współcześnie są obiektem badań poszukiwawczo-rozpoznawczych (Ferrite Resources Polska). Jednocześnie od roku 1983 nie jest na tym obszarze prowadzona żadna działalność górnicza wynikająca z (1) wciąż zbyt niskiego stopnia rozpoznania obszaru, (2) średniego potencjału ekonomicznego (ceny niklu są wciąż zbyt niskie, aby nadać małemu złożu wymiar biznesowy), (3) zagrożenia środowiskowego związanego z występowaniem azbestu. Przedstawione w pracy analizy wskazują na dwa główne kierunki mogące stanowić szansę na poprawienie sensowności i ekonomiczności potencjalnego projektu w Szklarach. Jest to w głównej mierze dostosowanie do zasad Gospodarki o Obiegu Zamkniętym oraz potrzeba prowadzenia dalszych badań nad technologią ługowania na hałdach rud ze Szklar.

W obszarze antroposfery, ze względu na metodyczne podejście, wyszczególniłem szereg metod, które mogą stać się przedmiotem dalszego rozwoju dla dyscypliny. Należą do nich:

- 1) metoda historycznego poszukiwania i rozpoznawania – dalsze analizy powinny dążyć do pogłębienia efektywności przedstawionego podejścia poprzez próbę przypisania ilościowego strumienia pierwiastków do cyklu życia obiektu antropogenicznego. Jednocześnie metoda ta, poprzez swój ogólny charakter, pozwala na różnicowanie obiektów na składowiska odpadów chemicznych, komunalnych oraz hałdy popiołów.
- 2) sposób obliczania objętości – dalsze prace powinny prowadzić do udoskonalenia modelu w kontekście dokładności szacowania objętości w miejscu styku hałdy z terenem. Może to zostać wykonane poprzez zastosowanie modelowania TIN zamiast rastrów różnicowych.
- 3) Obliczenie potencjalnej wartości dla możliwych zasobów antropogenicznych – wciąż niewyczerpana jest lista czynników mogących stać się parametrami uwzględnianymi we wzorze, a zbliżającymi oszacowaną wartość do wartości realnej.

Przedstawione wyniki badań jak analiza bazy hałd, jej poprawa oraz obliczenie objętości obiektów pozwoliły na porównanie ze sobą trzech obszarów na Dolnym Śląsku (1) części Starego Zagłębia Miedziowego w okolicach Iwin, (2) szeregu hałd w okolicach Krobicy-Gierczyna-Przecznicy, oraz (3) Szklar. Taki wybór podyktowany był potrzebą przedstawienia reprezentatywnych przykładów w kontekście różnic oraz podobieństw obiektów antropogenicznych na Dolnym Śląsku.

- 1) Obszar Iwin charakteryzuje się występowaniem wielkoobszarowych osadników o znaczących objętościach przekraczających nawet 13 milionów m<sup>3</sup>, a także nielicznych choć objętościowych dużych hałd.
- 2) Na terenach Krobicy-Gierczyna-Przecznicy występuje 65 hałd rozrzuconych na pasie o długości ok. 15 kilometrów, jednak ich rozmiary i objętości są stosunkowo małe.
- 3) Szklary to obszar pośredni w stosunku do dwóch pozostałych, występuje na nim 13 hałd o objętościach od 420 do 1 346 292 m<sup>3</sup>.

Wykorzystałem Szklary jako reprezentatywny przykład i na wyselekcjonowanej hałdzie żużla, dzięki wykorzystaniu dostępnych wyników analiz oraz własnych badań dokonałem analizy potencjalnej wartości, która wyniosła 130 milionów złotych

## Spis załączników

1. ModelBuilder dla metody obliczania objętości obiektów
2. Średnie ceny produktów metali w okresie 2008-2022
3. Baza geogenicznych wystąpień metali krytycznych
4. Profile geochemiczne i litologiczne dla otworów B1, B2, B4, B7 i B10
5. Mapy interpolacji metalu ekwiwalentnego na obszarze ZG Lubin i Niemstów-Wielowieś
6. Baza obiektów antropogenicznych Iwiny
7. Baza obiektów antropogenicznych Krobica-Gierczyn-Przecznica
8. Baza obiektów antropogenicznych Szklary

## Słownik wykorzystanych pojęć

Termin	Tłumaczenie - angielski	Wyjaśnienie	Źródła
Surowce krytyczne	Critical Raw Materials, Critical Minerals	Za surowce krytyczne dla polskiej gospodarki zostały przyjęte takie surowce strategiczne, których możliwości pozyskania zarówno ze źródeł pierwotnych, jak i wtórnych są obciążone albo dużym ryzykiem albo istnieją bardzo duże trudności ich pozyskania, a możliwości ich substytucji są niewielkie. Są to w szczególności surowce znajdujące się na liście surowców krytycznych dla Unii Europejskiej, ale także takie surowce, które mimo występowania w dużej ilości są niemożliwe do pozyskania np. z powodu uwarunkowań planistycznych, protestów społecznych itp.	[19]
Złoże kopaliny	Mineral deposit	Naturalne nagromadzenie minerałów i skał oraz innych substancji stałych, gazowych i ciekłych, których wydobywanie może przynieść korzyść gospodarczą.	[72]
Złoża antropogeniczne	Anthropogenic deposit	Nagromadzenie kopaliny użytecznej, utworzonej przez człowieka, w rezultacie zbierania odpadów kopalnianych, przerobczych, technologicznych i innych w czasie, gdy nieznan był sposób ich wykorzystania. Uznanie takiego nagromadzenia za złożę następuje w chwili przystąpienia do jego wybierania.	[185]
Zasoby antropogeniczne	Anthropogenic Resource	Zasób antropogeniczny to nagromadzenie lub wystąpienie materiału antropogenicznego o istotnym zainteresowaniu gospodarczym, w takiej formie, jakości i ilości, że istnieją realne perspektywy na ostateczne eksploatacje gospodarczą.	[40]
Geosfera	Geosphere	Geosfera obejmuje skały i minerały na Ziemi - od płynnej skały i ciężkich metali w głębokiej części wnętrza planety do piasku na plażach i szczytów gór. Geosfera obejmuje również abiotyczne (nieżywe) części gleb oraz szkielety zwierząt, które mogą ulec fosylizacji w geologicznym okresie.	[186]
Antroposfera	Antroposphere	Antroposfera oznacza część środowiska, która jest stworzona lub zmodyfikowana przez ludzi. Antroposfera obejmuje wszystkie dziedziny działalności człowieka. W Antroposferze, istoty ludzkie spowodowały znaczące zmiany w systemach ziemi poprzez swoją transformację i wykorzystanie materiałów i energii, oraz emisję stałych, płynnych i gazowych odpadów.	[40]
Potencjał mineralizacyjny	Potential mineralization	Każdy pojedynczy minerał albo kombinacja minerałów występujących w masie, albo złożu, o potencjalnej wartości ekonomicznej. Termin ten ma na celu objęcie wszystkich form, w jakich może występować mineralizacja, niezależnie od klasy złoża, sposobu występowania, genezy czy składu.	[78]
Surowce	Raw Materials	To nieprzetworzone materiały, które są postawą produkcji towarów, produktów gotowych, energii lub materiałów pośrednich będących budulcem dla przyszłych towarów.	[187]
Obiekt unieszkodliwiania odpadów	Waste disposal facility	Obiekt przeznaczony do składowania odpadów wydobywczych w formie stałej, ciekłej, w roztworze lub zawiesinie, w tym hałdy i stawy osadowe, obejmujący tamy lub inne konstrukcje służące do powstrzymywania, zatrzymywania, ograniczania lub umacniania takiego obiektu; za obiekt unieszkodliwiania odpadów wydobywczych nie	[188]

		uznaje się wyrobiska górniczego wypełnianego odpadami wydobywczymi w celach rekultywacyjnych i technologicznych	
Odpady przerobcze	Tailings	Oznaczają odpady w formie stałej lub szlamu, które pozostają po przeróbce minerałów w drodze procesu separacji (np.: kruszenia, mielenia, klasyfikacji ziarnowej, flotacji i innych procesów fizykochemicznych) w celu oddzielenia użytecznych minerałów od mniej użytecznych skał	[81]
Hałda	Heap, dump, pile	Obiekty inżynieryjne do składowania odpadów na powierzchni ziemi	[81]
Staw osadowy (osadnik)	pond	Oznacza obiekt naturalny lub inżynieryjny przeznaczony do składowania odpadów drobnoziarnistych, zazwyczaj odpadów przerobczych, wraz ze zmieniającą się ilością wody niezwiązanej, kora pochodzi z przeróbki surowców mineralnych oraz z oczyszczania i recyklingu wody technologicznej	[81]
Metale główne/bazowe	Base metals	klasyfikacja metali, które zwykle są uważane za mało wartościowe i mają większą aktywność chemiczną w porównaniu do metali szlachetnych (złoto, srebro, platyna itp.). Ten ogólny termin zazwyczaj odnosi się do metali o dużym wolumenie i niskiej wartości, takich jak miedź, ołów, cyna i cynk.	[189]
Metale szlachetne	Precious metals	Stosunkowo rzadkie i cenne metale, takich jak złoto, srebro oraz metale z grupy platynowców	[189]
Poszukiwanie	Prospecting	Wykonywanie prac geologicznych w celu ustalenia i wstępnego udokumentowania złoża kopaliny, wód podziemnych albo kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla	[72]
Rozpoznawanie	Exploration	Wykonywanie prac geologicznych na obszarze wstępnie udokumentowanego złoża kopaliny, wód podziemnych albo kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla	[72]
Prace geologiczne	Geological works	Projektowanie i wykonywanie badań oraz innych czynności, w celu ustalenia budowy geologicznej kraju, a w szczególności poszukiwania i rozpoznawania złóż kopaliny, wód podziemnych oraz kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla, określania warunków hydrogeologicznych, geologiczno-inżynierskich, także sporządzanie map i dokumentacji geologicznych oraz projektowanie i wykonywanie badań na potrzeby wykorzystania ciepła Ziemi lub korzystania z wód podziemnych	[72]
Informacja geologiczna	Geological information	Dane i próbki geologiczne wraz z wynikami ich przetworzenia i interpretacji, w szczególności przedstawione w dokumentacjach geologicznych oraz zapisane na informatycznych nośnikach danych	[72]
Rozłączenie	Decoupling	Zerwanie związku między wzrostem gospodarczym a dobrostanem ludzkości	[58,64,190]
Gospodarka o obiegu zamkniętym	Circular economy	Prowadzenie działalności w uwzględnieniu zasad recycle, reuse, reduce	[191]



## Spis tabel

Tab. 1. Porównanie strategii politycznych odnośnie surowców krytycznych w różnych krajach/regionach [35, 51].	32
Tab. 2. Surowce krytyczne dla USA, UE, Australii, Japonii oraz Polski (opracowanie własne w oparciu o [19,26,28–32,36–39]), na niebiesko oznaczono surowce ujęte w ramach rozprawy doktorskiej.	33
Tab. 3. Zawartość metali krytycznych w skorupie ziemskiej.	37
Tab. 4. Zawartość metali bazowych w skorupie ziemskiej.	37
Tab. 5. Przykładowe typy złóż dla metali krytycznych.	39
Tab. 6. Przykładowe typy złóż dla metali bazowych.	39
Tab. 7. Globalni producenci metali krytycznych na rok 2020, opracowanie własne	42
Tab. 8. Ewolucja metod poszukiwawczo-rozpoznawczych oraz sposobów prezentacji informacji geologicznej, uzupełniona wersja tabeli przedstawionej w artykule [78]	46
Tab. 9. Wykorzystanie oraz ceny produktów metali krytycznych.	52
Tab. 10. Wykorzystanie oraz ceny produktów metali bazowych i szlachetnych.	54
Tab. 11. Propozycja materiałów wykorzystywanych na potrzeby metody historycznego poszukiwania i rozpoznawania.	68
Tab. 12. Wskaźniki ilorazu cen poszczególnych metali w stosunku do wybranego metalu głównego.	78
Tab. 13. Analiza wyzwań dla projektów geologiczno-górnictwa dla obiektów antropogenicznych na każdym etapie cyklu życia projektu.	83
Tab. 14. Ocena istotności wyzwań dla projektów geologiczno-górnictwa dla obiektów antropogenicznych.	85
Tab. 15. Statystyka opisowa dla całego zbioru próbek z otworów na obszarze Niemstów-Wielowieś ważonych interwałem profilu w zestawieniu ze średnią zaw. metali w litosferze.	98
Tab. 16. Wyniki analiz pod mikrosondą elektronową próbek pobranych z otworów z obszaru Niemstów-Wielowieś.	106
Tab. 17. Statystyka opisowa dla próbek wyselekcjonowanych teoretycznych furt eksploatacyjnych z obszaru Niemstów-Wielowieś.	107
Tab. 18. Wyniki obliczeń metalu ekwiwalentego dla kolejnych zestawów pierwiastków w podziale na otwory wykonane na obszarze Niemstów-Wielowieś.	108
Tab. 19. Objętości obiektów w obszarze Iwin.	119
Tab. 20. Wyniki obliczeń objętości oraz powierzchnia każdego z obiektów na obszarze Szklar.	123
Tab. 21. Wyniki analiz pod mikrosondą wystąpień metali w próbce z hałdy żużła w Szklarach.	126
Tab. 22. Wyniki analiz pod mikrosondą matrycy w próbce z hałdy żużła w Szklarach. Błąd! Nie zdefiniowano zakładek.	
Tab. 23. Analiza SWOT PESTEL hałdy w Szklarach	129

## Spis obrazów i wykresów

Rys. 1. Produkcja górnicza metali per capita w odniesieniu do roku 1900, opracowanie własne na podstawie danych USGS [1], inspirowane pracą [2].	17
Rys. 2. Zmiana w ilości i różnorodności wykorzystywanych metali na przestrzeni czasu [3].	18
Rys. 3. Udokumentowane złoża rud metali w Polsce, opracowanie własne przy wykorzystaniu danych CBDG [4].	18
Rys. 4. (1) atrakcyjność regionów dla przemysłu, (2) istotność dla gospodarki narodowej, opracowanie własne na podstawie [6].	19
Rys. 5. Liczba wystąpień wyrażenia w tytułach, abstraktach w podziale na rok: (1) „critical raw materials” OR „critical minerals” (baza Scopus); (2) „critical raw materials” OR „critical minerals” (baza Dimensions.ai); (3) „critical raw materials” AND exploration (baza Scopus); (4) „critical raw materials” AND exploration (baza Dimension.ai); (5) „surowce krytyczne” (baza BazTech); (6) „critical raw materials” i afiliacja „Poland” (Scopus) [7].	20
Rys. 6. Częstość występowania haseł „critical minerals” oraz „critical raw materials” w wyszukiwarce Google [10].	21
Rys. 7. Liczba wystąpień wyrażenia w podziale na rok: (1) („critical raw materials” OR „critical minerals”) AND tailing* (baza Dimensions) (2) („critical raw materials” OR „critical minerals”) AND tailing* (baza Scopus) (3) („critical raw materials” OR „critical minerals”) AND waste? (baza Dimensions) (4) („critical raw materials” OR „critical minerals”) AND waste? (baza Scopus).	22
Rys. 8. Schemat struktury rozprawy doktorskiej.	24
Rys. 9. Struktura metodyki wyznaczenia krytyczności, opracowanie własne na podstawie [40 – 42].	30
Rys. 10. Podział na geosferę oraz antroposferę oraz potencjalne źródła metali krytycznych.	35
Rys. 11. Średnie zawartości poszczególnych metali w skorupie ziemskiej.	36
Rys. 12. Globalni producenci surowców krytycznych, przetłumaczono [49].	40
Rys. 13. Producenci surowców krytycznych w Europie, opracowanie własne na podstawie [24].	41
Rys. 14. Globalne zużycie surowców naturalnych i produkt krajowy brutto w okresie 1970-2017 [58].	43
Rys. 15. Koncepcja decouplingu, tłumaczenie z [61].	44
Rys. 16. Cele zrównoważonego rozwoju [65].	45
Rys. 17. Sposoby interpolacji spągu obiektów (hałd), przetłumaczono [91].	48
Rys. 18. Występowanie składowisk komunalnych, przemysłowych oraz mogilników na Dolnym Śląsku w roku 2002	56
Rys. 19. Lokalizacja złóż rud miedzi eksploatowanych przez KGHM Polska Miedź SA. oraz lokalizacja dawnego obszaru koncesyjnego Niemstów-Wielowieś wraz z miejscami wykonania otworów rozpoznawczych, opracowanie własne przy wykorzystaniu danych [4]	57
Rys. 20. Propozycja analizy utraty metali w procesie geologiczno-górnicznym w oparciu o założenia LCA.	64
Rys. 21. Propozycja metody historycznego poszukiwania i rozpoznawania	67
Rys. 22. Logika proponowanego procesu obliczenia objętości obiektów antropogenicznych	69
Rys. 23. Proponowana metodyka określenia identyfikacji potencjalnych zasobów geogenicznych i antropogenicznych oraz rekomendacje dla kopalń.	74
Rys. 24. Średnioroczne ceny produktów metali w okresie 2008-2022. Opracowanie własne na podstawie danych BGR	76

Rys. 25. Wykres średni cen metali w rosnących przedziałach czasu począwszy od roku 2008.....	77
Rys. 26. Stosunek cen metali do ceny miedzi. ....	79
Rys. 27. Przyjęte modele obiektów oraz możliwe wpływy na ich potencjał jak i zagrożenia związane z eksploatacją 1) schemat przyjętego modelu hałdy, 2) schemat przyjętego modelu osadnika, 3) hałda i procesy wpływające na jej charakterystykę, 4).....	81
Rys. 28. Mapy wystąpień metali krytycznych na Dolnym Śląsku, opracowanie własne....	91
Rys. 29. Lokalizacja analizowanych miejsc potencjału metali krytycznych w utworach geogenicznych.....	92
Rys. 30. Wyzwania stojące przed projektem w Szklarach na wybranych etapach projektu [122] .....	93
Rys. 31. Zdjęcia obszaru Szklar z roku 2019, 1 – północna część obszaru, 2 – centralna i południowa część obszaru [122].....	93
Rys. 32. Propozycja całościowego projektu zagospodarowania złóż i hałd obszaru Szklar w ujęcie Gospodarki o Obiegu Zamkniętym [121,122] .....	94
Rys. 33. Ruda laterytowa a metody wzbogacania, przetłumaczono [167].....	95
Rys. 34. Przepływ miedzi, srebra oraz kobaltu od złóż do produktów/odpadów w strukturze KGHM Polska Miedź S.A. Opracowanie własne na podstawie [173–175] .....	97
Rys. 35. Zawartości w próbkach ważone długością opróbowanego interwału .....	99
Rys. 36. Histogramy ilości próbek do zawartości poszczególnych pierwiastków z całego zbioru prób z obszaru Niemstów-Wielowieś.....	100
Rys. 37. Macierz korelacji spearmana dla pełnego zbioru próbek pobranych z otworów wywierconych na obszarze Niemstów-Wielowieś, *p-value>0,05 .....	101
Rys. 38. Zawartości pierwiastków w poszczególnych otworach wywierconych na obszarze Niemstów-Wielowieś.....	102
Rys. 39. Profil geochemiczny otworu B1 na podstawie zawartości w próbkach oraz zważonych interwałem profilu zawartości w próbkach. Oznaczono dobraną potencjalną furkę eksploatacyjną.....	103
Rys. 40. Profil geochemiczny i litologiczny otworu B1. ....	104
Rys. 41. Mikroskopowe zobrazowania próbek z otworu B1 z oznaczeniem punktów badania mikrosondą elektronową; a) 1 – piryt, 2 - chalkopiryt, 3 - piryt, 4 – chalkopiryt; b) 1 – gersdorfit .....	104
Rys. 42. Mikroskopowe zobrazowania próbek z otworu B2 z oznaczeniem punktów badania mikrosondą elektronową; a) 1 – galena, 2 – sfaleryt, 3 – chalkopiryt; b) 1 – bornit, 2 – kobaltyn, 3 – chalkopiryt. ....	105
Rys. 43. Mikroskopowe zobrazowania próbek z otworu B7 z oznaczeniem punktów badania mikrosondą elektronową; a) 1 – galena; b) 1 – kobaltyn, 2 – bornit, 3 – bornit, 4 – chalkopiryt, 5 – bornit?.....	105
Rys. 44. Mikroskopowe zobrazowania próbek z otworu B10 z oznaczeniem punktów badania mikrosondą elektronową; a) 1 – piryt, 2 - chalkopiryt b) 1 – kubanit?, 2 – piryt? .....	105
Rys. 45. Zmiana metalu ekwiwalentnego w dobranej furcie dla poszczególnych otworów w zależności od pierwiastków ujętych w ekwiwalencie.....	108
Rys. 46. Przestrzenne przedstawienia rozkładu metalu ekwiwalentnego (Cu, Ag) dla obszaru górniczego Lubin-Małomice oraz obszaru Niemstów-Wielowieś (wschód).....	109
Rys. 47. Przestrzenne przedstawienia rozkładu metalu ekwiwalentnego (Cu, Ag, Co) dla obszaru górniczego Lubin-Małomice oraz obszaru Niemstów-Wielowieś (wschód).....	109
Rys. 48. Przykłady uszczegółowienia konturów obiektów na potrzeby obliczenia ich objętości.....	115
Rys. 49. Przykład odtworzenia spągu obiektu na podstawie map Messtichblatter oraz map współczesnych.....	116

Rys. 50. Baza danych obiektów antropogenicznych (punkty) oraz obszarów ich sklastrowania, a także wystąpień geogenicznych (trójkaty).....	116
Rys. 51. Lokalizacja obszarów analizy obiektów antropogenicznych.....	117
Rys. 52. Lokalizacja obiektów antropogenicznych w obszarze Iwin.....	117
Rys. 53. Obszar osadnika Wartowice 1) – odtworzona topografia terenu na podstawie historycznej mapy topograficznej 2) – obecna rzeźba terenu. ....	118
Rys. 54. Obszar osadnika Iwiny 1) – odtworzona topografia terenu na podstawie historycznej mapy topograficznej 2) – obecna rzeźba terenu. ....	119
Rys. 55. Lokalizacja obiektów antropogenicznych w obszarze Krobica-Gierczyn-Przecznica .....	120
Rys. 56. Morfologia terenu w pobliżu Gierczyna .....	120
Rys. 57. Obszar zeszkładowania hałd w pobliżu Gierczyna 1) – odtworzona topografia terenu na podstawie historycznej mapy topograficznej 2) – obecna rzeźba terenu. ....	121
Rys. 58. Obszar zeszkładowania hałd w pobliżu Gierczyna 1) – odtworzona topografia terenu na podstawie historycznej mapy topograficznej 2) – obecna rzeźba terenu. ....	121
Rys. 59. Lokalizacja hałd na obszarze dawnej działalności górniczej w Szklarach.....	122
Rys. 60. Masyw Szklar rozciągający się południkowo. Od zachodu widoczne Wzgórze Koźmickie, następnie w znacznej części wyeksploatowana Szklana Góra, a na północy Wzgórze Tomickie. ....	122
Rys. 61. 1) Odtworzona rzeźba terenu Szklar przed zeszkładowaniem odpadów. ....	123
Rys. 62. Przykład analizy metody historycznego poszukiwania i rozpoznawania na terenie Szklar .....	124
Rys. 63. Analizowana hałda żużla w roku 2019, miejsce poboru próby - indykatora.....	125
Rys. 64. Obrazy mikroskopowe wystąpień metali w próbce żużla oraz miejsca wykonywania analizy mikrosondą elektronową .....	125

## Literatura

1. USGS. (2023). *Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States*. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/historical-statistics-mineral-and-material-commodities>
2. Hanghøj, K., & Gauss, R. (2018). *Raw Materials for sustainable development: Opportunities and challenges*. [https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pp/unfc\\_egrm/egrc9\\_apr2018/ws\\_24\\_April/p.3\\_Hanghoj.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pp/unfc_egrm/egrc9_apr2018/ws_24_April/p.3_Hanghoj.pdf)
3. Zepf, V. (Red.). (2014). *Materials critical to the energy industry: An introduction* (2. ed., [rev.]). University of Augsburg.
4. PIG CBDG. (2023). *Surowce—Złóża kopalin* [Data set].
5. Instytut Badań nad Gospodarką Rynkową. (2016). *Atrakcyjność inwestycyjna województw i podregionów polski 2016*. <https://www.ibngr.pl/Media/Files/Atrakcyjnoscinwestycyjna-2016-raport>
6. Szkoła Główna Handlowa w Warszawie. (2017). *Atrakcyjność inwestycyjna regionów 2017*.
7. Elsevier. (2023). *Baza Naukowa Scopus* [Data set]. <https://www.scopus.com>
8. Digital Science. (b.d.). *Baza Naukowa Dimensions* [Data set]. Pobrano 22 marzec 2023, z <https://app.dimensions.ai/discover/publication>
9. Konsorcjum BazTech. (b.d.). *Baza Naukowa BazTech*. Pobrano 22 marzec 2023, z <https://baztech.icm.edu.pl/>
10. Google. (2023). *Google trends*. <https://trends.google.pl/trends/>
11. *INCO-Piles 2020*. (2023). <https://site.unibo.it/inco-piles-2020/en/project>
12. *RIS-CuRE*. (2023). <http://ris-cure.zag.si/>
13. *RIS-RECOVER*. (b.d.). Pobrano 22 marzec 2023, z <http://ris-recover.zag.si/>
14. *ORAMA*. (2023). <https://orama-h2020.eu/about-the-project/>
15. *CORDIS*. (2023). <https://cordis.europa.eu/project/id/641999>
16. *CORDIS*. (2023). <https://cordis.europa.eu/project/id/101058522>
17. *Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*.
18. Schulz, K. J., DeYoung, Jr., John H., Seal II, R. R., & Bradley, D. C. (2017). *Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply* (Report Nr 1802; Professional Paper, s. 862). USGS Publications Warehouse. <https://doi.org/10.3133/pp1802>
19. *Polityka Surowcowa Państwa. Załącznik do uchwały nr 39 Rady Ministrów z dnia 1 marca 2022 r. (Poz. 371)*, (2022). <https://www.gov.pl/web/klimat/polityka-surowcowa-panstwa---dokument>
20. Smakowski, T. J. (2011). *Surowce mineralne – krytyczne czy deficytowe dla gospodarki UE i Polski*. 81.
21. Galos, K., Lewicka, E., Burkowicz, A., Guzik, K., Kamyk, J., Kot-Niewiadomska, A., & Szlugaj, J. (2021). *Nowa metodyka wyznaczania surowców kluczowych, strategicznych i krytycznych dla polskiej gospodarki*. 69.
22. Radwanek-Bąk, B., Galos, K., & Nieć, M. (2018). *Surowce kluczowe, strategiczne i krytyczne dla polskiej gospodarki*. 66(3). <https://geojournals.pgi.gov.pl/pg/article/view/26911/18629>
23. Komisja Europejska. (2017). *Methodology for establishing the EU list of critical raw materials: Guidelines*. Publications Office. <https://doi.org/10.2873/769526>
24. Komisja Europejska. (2020). *Study on the EU's List of Critical Raw Materials: Factsheets on Critical Raw Materials*. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42883/attachments/1/translations/en/renditions/native>
25. Komisja Europejska. (2023). *Study on the critical raw materials for the EU 2023: Final report*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585>

26. Załączniki do rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady ustanawiającego ramy na potrzeby zapewnienia bezpiecznych i zrównoważonych dostaw surowców krytycznych oraz zmieniającego rozporządzenia (UE) nr 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 i (UE) 2019/1020, COM/2023/160 (2023). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023PC0160>
27. Komisja Europejska. (2017). *Study on the review of the list of Critical Raw Materials. Criticality Assessments*. <https://hytechcycling.eu/wp-content/uploads/Study-on-the-review-of-the-list-of-Critical-Raw-Materials.pdf>
28. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Stawianie czoła wyzwaniom związanym z rynkami towarowymi i surowcami, nr COM/2011/0025 (2011). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0025>
29. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. W sprawie przeglądu wykazu surowców krytycznych dla UE i wdrażania inicjatywy na rzecz surowców, COM/2014/0297 (2014). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0297>
30. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. W sprawie wykazu surowców krytycznych dla UE 2017, COM/2017/0490 (2017). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017DC0490>
31. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Odporność w zakresie surowców krytycznych: Wytyczanie drogi do większego bezpieczeństwa i bardziej zrównoważonego rozwoju, COM/2020/474 (2020). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474>
32. Australian Government, Geoscience Australia. (b.d.). *Critical Minerals at Geoscience Australia*. Pobrano 23 marzec 2023, z <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/minerals/critical-minerals#heading-1>
33. Rząd Kanady. (2022). *Canada's critical minerals strategy: Discussion Paper. Opportunities from exploration to recycling: Powering the green and digital economy for Canada and the world*. <https://www.canada.ca/content/dam/nrcan-rncan/documents/critical-minerals-discussion-paper-eng-2.pdf>
34. International Energy Agency. (2022). *Final List of Critical Minerals 2022*. <https://www.iea.org/policies/15271-final-list-of-critical-minerals-2022>
35. Nakano, J. (2021). *The Geopolitics of Critical Minerals Supply Chains*. CSIS. [https://csis-website-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/publication/210311\\_Nakano\\_Critical\\_Minerals.pdf?DR03x5jlrwLnNjmPDD3SjEkGEZFEcgt](https://csis-website-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/publication/210311_Nakano_Critical_Minerals.pdf?DR03x5jlrwLnNjmPDD3SjEkGEZFEcgt)
36. Rząd Wielkiej Brytanii. (2023). *Policy paper. Resilience for the Future: The UK's Critical Minerals Strategy*. <https://www.gov.uk/government/publications/uk-critical-mineral-strategy/resilience-for-the-future-the-uks-critical-minerals-strategy#fn:9>
37. USGS. (2022). *U.S. Geological Survey Releases 2022 List of Critical Minerals*. <https://www.usgs.gov/news/national-news-release/us-geological-survey-releases-2022-list-critical-minerals>
38. Ministerstwo Zasobów Naturalnych Kanady. (2022). *The Canadian Critical Minerals Strategy. From exploration to recycling: Powering the Green and Digital Economy for Canada and the World*. <https://www.canada.ca/content/dam/nrcan-rncan/site/critical-minerals/Critical-minerals-strategyDec09.pdf>
39. *World Mining Data 2022*. (2022). [Data set]. [https://www.world-mining-data.info/?World\\_Mining\\_Data\\_\\_\\_Data\\_Section](https://www.world-mining-data.info/?World_Mining_Data___Data_Section)
40. UNECE. (2018). *Specifications for the application of the United Nations Framework Classification for Resources to Anthropogenic Resources*.

41. Rudnick, R. L., & Fountain, D. M. (1995). *Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective*. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/95RG01302>
42. Rudnick, R. L., & Gao, S. (2014). 4.1—Composition of the Continental Crust. W H. D. Holland & K. K. Turekian (Red.), *Treatise on Geochemistry (Wydanie drugie)* (s. 1–51). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>
43. Clarke, F. W., & Washington, H. S. (1924). *The composition of the Earth's crust* (Nr 127; Professional Paper). USGS Publications Warehouse. <https://doi.org/10.3133/pp127>
44. Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (1993). *Biogeochemia pierwiastków śladowych*.
45. Delura, K. (2012). Chromitites from the Braszowice-brzeźnica Massif, Lower Silesia—Potential Chromium Source for Industry? *Gospodarka Surowcami Mineralnymi - Mineral Resources Management*, 28(1). <https://doi.org/10.2478/v10269-012-0002-6>
46. British Geological Survey. (2009). *Mineral profile—Lithium*. <https://www.bgs.ac.uk/news/mineral-profile-lithium/>
47. British Geological Survey. (2009). *Cobalt—Mineral profile*. <https://core.ac.uk/download/pdf/58862.pdf>
48. British Geological Survey. (2009). *Mineral profile—Platinum Group Elements*. [https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/download/mineralProfiles/platinum\\_group\\_elements\\_profile.pdf](https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/download/mineralProfiles/platinum_group_elements_profile.pdf)
49. British Geological Survey. (2009). *Mineral profile—Rare Earths Elements*. [https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/download/mineralProfiles/rare\\_earth\\_elements\\_profile.pdf](https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/download/mineralProfiles/rare_earth_elements_profile.pdf)
50. Geological Survey of Sweden. (2021). *Critical Raw Materials*. <https://www.sgu.se/en/mineral-resources/critical-raw-materials/>
51. Trompiz, G., Vidalon, D., & Trompiz, G. (2022). French lithium mine project unveiled in electric car race. *Reuters*. <https://www.reuters.com/business/frances-imerys-wants-become-leading-lithium-producer-europe-2022-10-24/>
52. Imerys. (2023). *EMILI Project Overview | Beauvoir-lithium*. <https://emili.imerys.com/en/emili-project-overview>
53. Huge rare earth metals discovery in Arctic Sweden. (2023). *BBC News*. <https://www.bbc.com/news/world-europe-64253708>
54. LKAB. (2023). *Europe's largest deposit of rare earth metals is located in the Kiruna area*. <https://lkab.com/en/press/europes-largest-deposit-of-rare-earth-metals-is-located-in-the-kiruna-area/>
55. Nik, M. (2023). *Doubts over Turkey's rare earths find*. <https://www.dw.com/en/doubts-grow-over-turkeys-huge-discovery-of-rare-earths/a-62607675>
56. Meadows, D., Meadows, D., Randers, J., & Behrens, W. (1972). *The Limits of Growth*. A Potomac Associates Book.
57. *Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth, A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel*. Fischer-Kowalski, M., Swilling, M., von Weizsäcker, E.U., Ren, Y., Moriguchi, Y., Crane, W., Krausmann, F., Eisenmenger, N., Giljum, S., Hennicke, P., Romero Lankao, P., Siriban Manalang, A., Sewerin, S. (2011).
58. *Decoupling 2: Technologies, opportunities and policy options. A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel*. Von Weizsäcker, E.U., de Lardereel, J., Hargroves, K., Hudson, C., Smith, M., Rodrigues, M. (2014).
59. *Zamknięty obieg—Otwarte możliwości*. (2018). Deloitte.
60. OECD. (2001). *Environmental Strategy for the First Decade of 21st Century*.
61. United Nations Environment Programme. (2020). *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want*. UN. <https://doi.org/10.18356/689a1a17-en>

62. United Nations Environment Programme. (2023). *Słownik UNEP*. <https://www.resourcepanel.org/glossary>
63. Jonathan, W. (2019). Vaclav Smil: 'Growth must end. Our economist friends don't seem to realise that'. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/books/2019/sep/21/vaclav-smil-interview-growth-must-end-economists>
64. Fletcher, R., & Rammelt, C. (2017). Decoupling: A Key Fantasy of the Post-2015 Sustainable Development Agenda. *Globalizations*, 14(3), 450–467. <https://doi.org/10.1080/14747731.2016.1263077>
65. Vadén, T., Lähde, V., Majava, A., Järvensivu, P., Toivanen, T., Hakala, E., & Eronen, J. T. (2020). Decoupling for ecological sustainability: A categorisation and review of research literature. *Environmental Science & Policy*, 112, 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.06.016>
66. Serwis Rzeczypospolitej Polskiej. (2023). *Cele Zrównoważonego Rozwoju*. <https://www.gov.pl/web/polskapomoc/cele-zrownowazonego-rozwoju>
67. *Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015*, (testimony of Organizacja Narodów Zjednoczonych - Zgromadzenie Ogólne). <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/291/89/PDF/N1529189.pdf?OpenElement>
68. The United States Environmental Protection Agency. (2023). *What is a Circular Economy?* <https://www.epa.gov/circulareconomy/what-circular-economy>
69. *Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Nowy plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym na rzecz czystszej i bardziej konkurencyjnej Europy*, (2020) (testimony of Komisja Europejska). [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0007.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0007.02/DOC_1&format=PDF)
70. *Mapa Drogowa Transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym*. (2019, wrzesień 24). <https://www.gov.pl/web/rozwoj-technologie/rada-ministrow-przyjela-projekt-mapy-drogowej-goz>
71. Circle Economy. (2022). *The circularity gap report 2022*. Circle Economy. [https://drive.google.com/file/d/1NMAUtZcoSLwmHt\\_r5TLWwB28QJDghi6Q/view](https://drive.google.com/file/d/1NMAUtZcoSLwmHt_r5TLWwB28QJDghi6Q/view)
72. Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo Geologiczne i Górnicze, nr Dz. U. 2011 Nr 163 poz. 981. Pobrano 21 czerwiec 2023, z <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20111630981/U/D20110981Lj.pdf>
73. Nieć, M. (2012). *Metodyka dokumentowania złóż kopalin stałych. Część 1. Poszukiwanie i rozpoznawanie złóż. Planowanie i organizacja prac geologicznych* (T. 1). Ministerstwo Środowiska.
74. Nieć, M. (2012). *Metodyka dokumentowania złóż kopalin stałych. Część 2. Kartowanie geologiczne złóż* (T. 2). Ministerstwo Środowiska.
75. Nieć, M. (2012). *Metodyka dokumentowania złóż kopalin stałych. Część 3. Opróbowanie złóż kopalin* (T. 3). Ministerstwo Środowiska.
76. Nieć, M. (2012). *Metodyka dokumentowania złóż kopalin stałych. Część 4. Szacowanie zasobów* (T. 4). Ministerstwo Środowiska.
77. Nieć, M. (1990). *Geologia Kopalniana* (II poprawione i uzupełnione). Wydawnictwa Geologiczne.
78. JORC Committee. (2013). *JORC Code 2012*. [https://www.jorc.org/docs/JORC\\_code\\_2012.pdf](https://www.jorc.org/docs/JORC_code_2012.pdf)
79. Nieć, M. (2016). Wczoraj i dziś dokumentowania geologicznego złóż kopalin i problemy prawa geologicznego i górniczego. *Górnictwo Odkrywkowe*, R. 57.
80. ORAMA. (b.d.). *Final Report—ORAMA Project*. [https://orama-h2020.eu/wp-content/uploads/ORAMA\\_WP6\\_DEL6.6\\_20191115\\_v.1.0.pdf](https://orama-h2020.eu/wp-content/uploads/ORAMA_WP6_DEL6.6_20191115_v.1.0.pdf)
81. *Dyrektywa 2006/21/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 15 marca 2006 r. W sprawie gospodarowania odpadami pochodzącymi z przemysłu wydobywczego oraz zmieniająca*



dyrektywę 2004/35/WE. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:02006L0021-20090807&from=EN>

82. Komisja Europejska. (b.d.). *Guidance mining Waste*. Pobrano 1 luty 2023, z [https://environment.ec.europa.eu/pdf/waste/mining/Pre\\_selection\\_GUIDANCE\\_FINAL.pdf](https://environment.ec.europa.eu/pdf/waste/mining/Pre_selection_GUIDANCE_FINAL.pdf)

83. ORAMA. (2019). *WP2. Secondary Raw Materials*. [https://orama-h2020.eu/wp-content/uploads/ORAMA\\_final\\_event\\_SRM.pdf](https://orama-h2020.eu/wp-content/uploads/ORAMA_final_event_SRM.pdf)

84. EPA. (2023). *Oficjalna strona internetowa EPA - sekcja pobierania danych*. <https://gis.epa.ie/GetData/Download>

85. Norwegian Environment Agency. (2023). *Norwegian Environment Agency—Oficjalna strona internetowa*. <https://www.norskeutslipp.no/en/Landfills/?SectorID=300>

86. GeoZS - Słoweńska Służba Geologiczn. (2014). *Faze projekta—Izdelava popisa zaprtih objektov za ravnanje z Odpadki iz rudarskih in drugih dejavnosti izkoriščanja mineralnih surovin*. [http://www.arso.gov.si/varstvo%20okolja/odpadki/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/PORO%C4%8CULO%203%20FAZE\\_21022014.pdf](http://www.arso.gov.si/varstvo%20okolja/odpadki/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/PORO%C4%8CULO%203%20FAZE_21022014.pdf)

87. ORAMA. (2018). *Draft report on the analysis of data collection methods and recommendations for the improvement of SRM statistical datasets Deliverable 2.1*. [https://orama-h2020.eu/wp-content/uploads/ORAMA\\_WP2\\_-DEL2.1\\_20180531\\_v1.0.pdf](https://orama-h2020.eu/wp-content/uploads/ORAMA_WP2_-DEL2.1_20180531_v1.0.pdf)

88. GeoZS - Słoweńska Służba Geologiczn. (2017). *Spremljanje zaprtih objektov za ravnanje z odpadki iz rudarskih in drugih dejavnosti izkoriščanja mineralnih surovin*. <http://www.arso.gov.si/varstvo%20okolja/odpadki/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/OdpadkiRudarji.pdf>

89. Szamałek, K. (2021). *Złoża antropogeniczne jako źródło metali w gospodarce o obiegu zamkniętym. Dokumentowanie i wycena antropogenicznych złóż rud metali*. Webinarium „Gospodarka o obiegu zamkniętym w braźny wydobywczey - strategie, praktyki i zasady monitorowania”. [http://polval.org.pl/wp-content/uploads/2021/06/Rudy-metali\\_K.-Szama%C5%82ek.pdf](http://polval.org.pl/wp-content/uploads/2021/06/Rudy-metali_K.-Szama%C5%82ek.pdf)

90. Ptak, M., Suchorab, N., & Kaczan, W. (2020). *Do we have to waste the waste? (Poland)*. 020006. <https://doi.org/10.1063/5.0000481>

91. Büttner, P., Nühlen, J., & Kuhn, K. (2022). *Mine Waste, Mining, Processing and Smelter Dumps—Handbook for Exploration and Recovery Methods for Secondary Raw Material Deposits*. BGR. <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/414554>

92. DroneDeploy. (2019). *Accurate Stockpile Measurements with Drones. A Guide to Stockpile Measurements and Inventory Management with DroneDeploy*. <https://www.dronedeploy.com/resources/ebooks/accurate-stockpile-measurement-management-with-drones/>

93. Trybała, P., Kaczan, W., & Górecki, A. (2021). *Mining Waste Volume Estimation Using Airborne Lidar Data and Historical Maps: A Case Study of Tailing Piles in Szklary, Lower Silesia*. *Innovations-Sustainability-Modernity-Openness Conference (ISMO'21)*, 32. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2021009032>

94. *Mineral commodity summaries 2023* (Report Nr 2023; Mineral Commodity Summaries, s. 210). (2023). USGS Publications Warehouse. <https://doi.org/10.3133/mcs2023>

95. Dera, BGR. (2022). *Preismonitor Dezember 2022*.

96. *Państwowy Instytut Geologiczny—Kopalnia Wiedzy*. (2023). <https://www.pgi.gov.pl/muzeum/kopalnia-wiedzy-1/12622-molibden.html>

97. *Mineral commodity summaries 2022* (Report Nr 2022; Mineral Commodity Summaries, s. 202). (2022). USGS Publications Warehouse. <https://doi.org/10.3133/mcs2022>

98. U.S. Customs and Border Protection. (2010). *What every Member of the Trade Community Should Know About: Household Articles of Base Metals*. [https://www.cbp.gov/sites/default/files/documents/icp079\\_3.pdf](https://www.cbp.gov/sites/default/files/documents/icp079_3.pdf)

99. *SMM - Rhenium*. (2023). <https://www.metal.com/Other-Minor-Metals/201102250036>

100. Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy. (2023). *Zapotrzebowanie i zastosowanie miedzi*. <https://www.pgi.gov.pl/psg-1/psg-2/informacja-i-szkolenia/wiadomosci-surowcowe/10429-zapotrzebowanie-i-zastosowanie-miedzi.html>
101. Muzeum Geologiczne - Państwowy Instytut Geologiczny. (2023). *Cynk i ołów*. <https://www.pgi.gov.pl/muzeum/kopalnia-wiedzy-1/12710-cynk-i-olow.html>
102. Muzeum Geologiczne - Państwowy Instytut Geologiczny. (2023). *Cyna*. <https://www.pgi.gov.pl/muzeum/kopalnia-wiedzy-1/12593-cyna.html>
103. KGHM. (2023). *Ren*. <https://kg hm.com/pl/biznes/produkty/ren>
104. Mennica Polska. (2023). *Zastosowanie złota w elektronice, medycynie, kosmetyce*. <https://www.mennica.com.pl/produkty-inwestycyjne/poradnik-inwestora-lista/zastosowanie-zlota-w-elektronice-medycynie-kosmetyce>
105. Mennica Polska. (2023). *Zastosowanie srebra w przemyśle*. <https://www.mennica.com.pl/produkty-inwestycyjne/poradnik-inwestora-lista/zastosowanie-zlota-w-elektronice-medycynie-kosmetyce>
106. Żelaźniewicz, A. (2015). *Przyroda Dolnego Śląska* (II). Oddział Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu.
107. Żelaźniewicz, A. (Red.). (2011). *Regionalizacja tektoniczna Polski*. Komitet Nauk Geologicznych PAN.
108. Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska we Wrocławiu. (2002). *Raport o stanie środowiska woj. Dolnośląskiego w 2001 r.*
109. Kulczycka, J., Kowalski, Z., Smol, M., & Wirth, H. (2016). Evaluation of the recovery of Rare Earth Elements (REE) from phosphogypsum waste-case study of WIZÓW Chemical Plant (Poland). *Journal of Cleaner Production*, 113, 345–364.
110. Piestrzyński, A., Banaszak, A., & Zaleska-Kuczmierczyk, M. (2007). *Monografia KGHM Polska Miedź S.A* (II). KGHM CUPRUM Sp. z o.o. CBR.
111. KGHM. (2022). *Raport Zintegrowany KGHM Polska Miedź S.A. i Grupy Kapitałowej KGHM Polska Miedź S.A. za 2021 rok*.
112. Szuflicki, M., Malon, A., & Tyimiński, M. (2022). *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2021 r.* Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy.
113. Kijewski, P., & Wirth, H. (2011). Ren—Występowanie w złożu rud miedzi, produkcja i jej perspektywy. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk*, 81, 103–115.
114. Pazik, P. M., Chmielewski, T., Glass, H. J., & Kowalczuk, P. B. (2016). World production and possible recovery of cobalt from the Kupferschiefer stratiform copper ore. *E3S Web Conf. Volume 8, 2016 Mineral Engineering Conference MEC2016*.
115. Horn, S., Gunn, A. G., Petavratzi, E., Shaw, R. A., Eilu, P., Törmänen, T., Bjerkgård, T., Sandstad, J. S., Jonsson, E., Kountourelis, S., & Wall, F. (2021). Cobalt resources in Europe and the potential for new discoveries. *Ore Geology Reviews*, 130, 103915. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103915>
116. Bartlett, S. C., Burgess, H., Damjanović, B., Gowans, R. M., & Lattanzi, C. R. (2013). *Technical report on the copper-silver production operations of KGHM Polska Miedź S.A in the Legnica-Głogów Copper Belt area of southwestern Poland*.
117. Merlo, A., Kaczan, W., Léonard, G., & Wirth, H. (2021). Assessing the Environmental Pertinence of Cobalt Exploitation from Slag in KGHM Mines. *Innovations-Sustainability-Modernity-Openness Conference (ISMO'21)*, 33. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2021009033>
118. Lenik, P. (2007). *Kobalt w złożu rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej* [Rozprawa Doktorska]. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.
119. Cichowska-Gaździk, R. (2003). *Metale szlachetne, arsen i ołów w produktach hutniczych miedzi ze złóż legnicko-głogowskiego okręgu miedziowego* [Rozprawa Doktorska]. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

120. Niškiewicz, J. (1967). Budowa geologiczna masywu Szklar (Dolny Śląsk). *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, XXXVII–1967(3).
121. Furmankiewicz, M., & Krzyżanowski, K. (2008). Podziemne Relikty Kopalni Niklu w Szklarach. *Dzieje Górnictwa - element europejskiego dziedzictwa kultury*.
122. Kaczan, W. (2017). Geologiczny profil ociosów historycznych wyrobisk Podziemnej Trasy Edukacyjnej w Szklarach. *Hereditas Minariorum*, 4.
123. Kaczan, W., & Wirth, H. (2020). Preliminary analysis of Szklary deposit (SW Poland) in the aspect of critical metals occurrence with respect to the circular economy. *AIP Conference Proceedings*, 2209(1):030001.
124. Kaczan, W., Kudełko, J., & Wirth, H. (2021). Szklary nickel deposit—A review and introduction to attempts in hydrometallurgical processing. *Mineral Economics*, 34.
125. Bońda, D., & Siekiera, D. (2022). *Mapa koncesji na poszukiwanie, rozpoznawanie oraz wydobywanie złóż kopalin chemicznych, skalnych i metali wg stanu na dzień 31.12.2021* [Map].
126. Kaczmarek, W., & Rożek, R. (2008). Historia poszukiwań i rozpoznania złóż rud miedzi w "starym zagłębiu miedziowym". *Dzieje górnictwa - element europejskiego dziedzictwa kultury*.
127. Stolarczyk, T., Kobyłańska, M., Kierczak, J., Madziarz, M., & Garbacz-Klempka, A. (2015). *Leszczyna, Monografia ośrodka górnictwa i metalurgii rud miedzi*. Fundacja Archeologiczna Archeo.
128. Paździora, J. (1987). *Konrad na miedziowej scenie. Szkoc monograficzny Zakładów Górniczych „Konrad”*. Zakłady Górnicze Konrad.
129. Ministerstwo Klimatu. (b.d.). *Lista koncesji na poszukiwanie, rozpoznawanie oraz wydobywanie kopalin ze złóż*. Pobrano 11 czerwiec 2020, z <https://bip.mos.gov.pl/koncesje-geologiczne/raporty-i-zestawienia-dotyczace-udzielonych-koncesji-w-tym-zestawienia-otworow-wiertniczych/raporty-i-zestawienia-rok-2020/raporty-i-zestawienia-marzec-2020-r/>
130. Kowalski, A., Maciejak, K., Wojewoda, J., Kozłowski, A., & Raczyński, P. (2017). Anthropogenic changes of the “Old Copper Basin” area landscape (north-sudetic synclinorium) in the light of lidar-based geomorphometric analysis and archival data. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 0, 0–0. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0010.0080>
131. PIG - PIB. (b.d.). *Geodatabase Hałdy*. 2017. Pobrano 5 czerwiec 2020, z <https://cbdgportal.pgi.gov.pl/haldy/>
132. Zagożdżom, P., & Zagożdżom, K. (2012). Budowa geologiczna w dostępnych sztolniach Rejonu Krobicy – Przeczniczy [Geology of accesible adits in the Krobica—Przecznicza area]. *Dzieje górnictwa – element europejskiego dziedzictwa kultury*, 4, 411–434.
133. Małek, R., Mikulski, S. Z., & Chmielewski, A. (2019). The geochemical-mineralogical characteristic of cassiterite-sulphide mineralization in the historic Saint John and Saint Leopold shafts in the stara kamienica shist belt (Western Sudetes). *Przegląd Geologiczny*, 67(11), 914–924. <https://doi.org/10.7306/2019.50>
134. Szuflicki, M., Malon, A., & Tymiński, M. (2019). *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2018 r.* Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy.
135. BGR. (2010). *Deutschland – Rohstoffsituation 2009*. [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/Rohsit-2009.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/Rohsit-2009.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941)
136. BGR. (2011). *Deutschland – Rohstoffsituation 2010*. [https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA\\_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-07.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941](https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-07.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941)
137. BGR. (2012). *Deutschland – Rohstoffsituation 2011*. [https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA\\_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-13.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941](https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-13.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941)

138. BGR. (2013). *Deutschland – Rohstoffsituation 2012*. [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/Rohsit-2012.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/Rohsit-2012.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941)
139. BGR. (2014). *Deutschland – Rohstoffsituation 2013*. [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/Rohsit-2013.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/Rohsit-2013.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941)
140. BGR. (2015). *Deutschland – Rohstoffsituation 2014*. [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/Rohsit-2014.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/Rohsit-2014.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941)
141. BGR. (2016). *Deutschland – Rohstoffsituation 2015*. [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/Rohsit-2015.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/Rohsit-2015.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941)
142. BGR. (2017). *Deutschland – Rohstoffsituation 2016*. [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/rohsit-2016.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2016.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941)
143. BGR. (2018). *Deutschland – Rohstoffsituation 2017*. [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/rohsit-2017.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2017.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941)
144. BGR. (2019). *Deutschland – Rohstoffsituation 2018*. [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/rohsit-2018.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2018.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941)
145. BGR. (2020). *Deutschland – Rohstoffsituation 2019*. [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/rohsit-2019.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2019.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941)
146. BGR. (2021). *Deutschland – Rohstoffsituation 2020*. [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/rohsit-2020.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2020.html;jsessionid=351715F8EEEC98FD22D96A42ED8759DD.internet941)
147. BGR. (2021). *Preismonitor Dezember 2021*.
148. Fedak, J., & Lindner, M. (1966). Metalogeneza Sudetów. *Instytut Geologiczny Prace*.
149. *Strona internetowa projektu FRAME*. (2023). <https://www.frame.lneg.pt/>
150. EGDl. (2023). *European Geological Data Infrastructure—Mapviewer*. [https://data.geus.dk/egdi/?mapname=egdi\\_new\\_structure#baslay=baseMapGEUS&extent=-9520,1778700,6096720,4637810](https://data.geus.dk/egdi/?mapname=egdi_new_structure#baslay=baseMapGEUS&extent=-9520,1778700,6096720,4637810)
151. Szamałek, K., Szuflicki, M., & Mizerski, W. (2020). *Bilans perspektywicznych zasobów kopalin Polski wg stanu na 31.12.2018 r.* Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy.
152. Cwojdzński, S., Nieć, M., Bossowski, A., Michniewicz, M., Mikulski, S., Mochnacka, K., Mydłowski, A., Oszczepalski, S., Pacuła, J., Petecki, Z., Sroga, C., Stachowiak, A., Wojciechowski, A., Biel, A., & Iwaniec, E. (2008). *Ocena perspektyw występowania złóż rud metali w Sudetach i na Bloku Przedśudeckim w nawiązaniu do aktualnych modeli geotektonicznych*. Państwowy Instytut Geologiczny - Oddział dolnośląski im. Henryka Teisseyre'a.
153. Najwyższa Izba Kontroli - Delegatura w Opolu. (2017). *Wystąpienie pokontrolne* (LOP.410.007.03.2017, P/17/015).
154. Nowiński, R. (2021). *Przestrzenna analiza występowania kobaltu oraz innych metali w obszarze eksploatacyjnym ZG Lubin*. Politechnika Wrocławska.
155. GUGIK. (2023). *Geoportal—Dane pomiarowe LIDAR*. <https://www.geoportal.gov.pl/dane/dane-pomiarowe-lidar>
156. Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy. (2023). *Geobaza Hałdy* [Data set]. <https://cbdportal.pgi.gov.pl/haldy/>
157. Komisja Europejska. (2023). *Europejska Platforma LCA*. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/lifecycleassessment.html>

158. Mikulski, S. Z., Oszczepalski, S., Sadłowska, K., Chmielewski, A., & Małek, R. (2020). Trace Element Distributions in the Zn-Pb (Mississippi Valley-Type) and Cu-Ag (Kupferschiefer) Sediment-Hosted Deposits in Poland. *Minerals*, 10(1), 75. <https://doi.org/10.3390/min10010075>
159. Wellmer, F.-W., Dalheimer, M., & Wagner, M. (2008). *Economic Evaluations in Exploration*. Springer.
160. Junior Mining Network—Drill hole calculator. (2023). <https://www.juniorminingnetwork.com/drill-hole-calculator.html>
161. ifMU GmbH. (b.d.). *Historische Erkundung / Altlasterecherche*. Pobrano 1 czerwiec 2023, z <https://www.ifmu.de/altlasten/erkundung/historische-erkundung-recherche/>
162. Bayerisches Landesamt für & Umwelt. (2016). *Historische Erkundung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen*.
163. Bank, M. (1993). *Basiswissen Umwelttechnik*. Vogel Bucherverlag.
164. NARA. (2023). *NARA - National Archives and Records Administration—Oficjalna strona archiwum*. <https://www.archives.gov/about>
165. Scikit-learn. (2023). *Biblioteka DBSCAN*. <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.DBSCAN.html>
166. Kaczan, W., Wirth, H., Kudełko, J., & Sroga, C. (2021). Challenges in the Management of Mining Waste. *Innovations-Sustainability-Modernity-Openness Conference (ISMO'21)*, 28. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2021009028>
167. Kudełko, J., Wirth, H., Kaczan, W., & Bagiński, L. (2021). Characteristics of Clay Raw Materials from the Turów Lignite Mine Waste, Poland: Potential for Industrial Applications. *Sustainability*, 13(12), 6513. <https://doi.org/10.3390/su13126513>
168. Mikulski, S. (2012). Występowanie i zasoby perspektywiczne rud niklu w Polsce. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 448 (2).
169. Mikulski, S. Z., & Sadłowska. (2015). Mapy obszarów perspektywicznych wystąpień rud metali w Polsce w skali 1: 200 000 – rudy niklu typu wietrzeniowego ( saprolitowego ) na bloku przedsudeckim ( SW Polska ). *Przegląd Geologiczny*, 63(9).
170. Mikulski, S. Z., Oszczepalski, S., Sadłowska, K., Chmielewski, A., & Małek, R. (2018). The occurrence of associated and critical elements in the selected documented Zn-Pb, Cu-Ag, Fe-Ti-V, Mo-Cu-W, Sn, Au-As and Ni deposits in Poland. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 472(472), 21–52. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.7113>
171. Zielińska, A., & Kobyłańska, M. (b.d.). Geologiczne uwarunkowania eksploatacji złoża rud niklu "Szklary 1". *Górnictwo Odkrywkowe*, 52(1).
172. Elias, M. (2013). *Nickel Laterites in SE Asia. Geology, Technology and Economics—Finding the balance*. <https://www.csaglobal.com/wp-content/uploads/2015/03/Bali-2013-Elias.pdf>
173. Elias, M. (2002). Nickel laterite deposits – geological overview, resources and exploitation. *Giant Ore Deposits: Characteristics, Genesis and Exploration*, Eds DR Cooke and J Pongratz., CODES Special Publication 4, Centre for Ore Deposit Research, University of Tasmania.
174. Politechnika Wrocławska. (2005). *Projekt geologicznych prac badawczych na obszarze złoża rud niklu Szklary I*.
175. Kudełko, J., & Wirth, H. (2006). Weryfikacja bazy zasobowej złóż rud laterytowych "Szklary" pod kątem zastosowania procesu hydrometalurgicznego do ekstrakcji niklu. *Czasopismo Techniczne*, 128.
176. Kucha, H. (1973). *Występowanie złota, niklu i kobaltu w złożach miedzi Lubin i Polkowice* [Rozprawa Doktorska].
177. KGHM Metraco. (2023). *Oficjalna strona internetowa Metraco*. <https://metraco.pl/produkty-i-uslugi/kruszywa/>

178. KGHM. (2021). *Zintegrowany Raport KGHM Polska Miedź S.A i Grupy Kapitałowej KGHM Polska Miedź S.A za 2020 rok*.
179. KGHM. (2021). *Wstępne wyniki produkcyjne i sprzedażowe Grupy KGHM Polska Miedź S.A. za grudzień 2020*. <https://kg hm.com/pl/inwestorzy/centrum-wynikow/raporty-produkcyjno-sprzedazowe>
180. Szuflicki, M., Malon, A., & Tymiński, M. (2021). *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2020 r.* Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy.
181. Bartle. (2013). *Raport Techniczny dotyczący produkcji miedzi i srebra przez KGHM Polska Miedź S.A. w Legnicko-Głogowskim okręgu miedziowym w południowo-zachodniej Polsce*.
182. Kierczak, J., Neel, C., Puziewicz, J., & Bril, H. (2009). The mineralogy and weathering of slag produced by the smelting of lateritic ni ores, Szklary, southwestern Poland. *The Canadian Mineralogist*, 47(3), 557–572. <https://doi.org/10.3749/canmin.47.3.557>
183. Recycling Solutions. (2023). *Metalurgical slags*. <https://re-solutions.com.ua/en/our-direction/metalurgicheskie-shlaki/>
184. PAIH. (2019). *Poland, Land of Opportunities. Electromobility and other sectors in the heart of Europe*.
185. Bolewski, A. (1994). *Encyklopedia surowców mineralnych*. CPPGSMIE PAN.
186. UCAR - Center for Science Education. (b.d.). *The Geosphere*. Pobrano 1 czerwiec 2023, z <https://scied.ucar.edu/learning-zone/earth-system/geosphere>
187. CSR Consulting. (2023). *GOZ w praktyce*. <https://gozwpraktyce.pl/slownik/surowce/>
188. *Ustawa z dnia 10 lipca 2008 r. O odpadach wydobywczych*, (2022). <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20220002336/O/D20222336.pdf>
189. mindat. (2023). *Słownik pojęć*. Pobrano 5 czerwiec 2023, z [https://www.mindat.org/glossary/base\\_metal](https://www.mindat.org/glossary/base_metal)
190. Teraz Środowisko. (2023). *Decoupling celem nadrzędnym programów przeciwdziałania odpadom*. Pobrano 2 czerwiec 2023, z <https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/Decoupling-programy-przeciwdzialania-odpadom-333.html>
191. Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>

## Streszczenie w języku polskim

Wyzwania, takie jak walka ze zmianami klimatu, redukcja zanieczyszczeń oraz zmniejszenie wykorzystywania zasobów zintensyfikowały światowe starania o ochronę Ziemi. Są one ujęte w siedemnastu Celach Zrównoważonego Rozwoju. Ich zrealizowanie jest możliwe dzięki transformacji energetycznej oraz wprowadzaniu założeń gospodarki o obiegu zamkniętym na wielu poziomach. Te wyzwania łączą się z koniecznością zużycia licznych, zazwyczaj rzadko występujących surowców, z których istotną grupą są metale wykorzystywane w wysokich technologiach. Próba zabezpieczenia podaży tych surowców jest formułowanie list surowców krytycznych. Pozwala to na ukierunkowanie działań politycznych oraz inwestorskich na konkretne surowce, które zapewnią Polsce i innym krajom europejskim miejsce wśród państw niezależnych, zielonych i wysoko rozwiniętych.

Moja rozprawa doktorska dotyczy bezpośrednio zagadnienia metali krytycznych oraz możliwości zapewnienia ich podaży. Koncentruje się na jednym z najbardziej rozwiniętych, a jednocześnie zasobnych w metale regionów w Polsce – Dolnym Śląsku. Podjąłem się zarówno analizy potencjalnych zasobów geogenicznych, jak i antropogenicznych (w postaci odpadów górniczych, przerobczych i hutniczych).

Rozprawa doktorska realizowana była w ramach projektu *Interdok – Programy Interdyscyplinarnych Studiów Doktoranckich na Politechnice Wrocławskiej*, który umożliwił przeprowadzenie prac przy łączeniu zagadnień geologii złożowej i poszukiwawczej, geochemii, mineralogii, górnictwa oraz ekonomiki i zarządzania w górnictwie.

Tytuł pracy zawiera trzy główne zagadnienia: (1) identyfikację, (2) metody pozyskania i (3) wykorzystanie. Takie ujęcie tematyczne pozwoliło stworzyć ramy poszukiwania i rozpoznawania zasobów metali krytycznych, metod ich eksploatacji i przerobu oraz wykorzystania dla analitycznie wyselekcjonowanych obszarów. Największy nacisk położyłem jednak na fundament, jakim jest identyfikacja potencjału. Potrzeba działań w tym obszarze wzmocniana jest faktem stałej potrzeby poszerzania wiedzy, ale również dostępu do danych o potencjalnych do eksploatacji obecnie lub w przyszłości zasobach metali.

Wynikiem pracy są dwa zbiorcze opracowania (dotyczące geosfery i antroposfery) dla Dolnego Śląska. Dane zebrałem z rzetelnych źródeł i przedstawiłem w postaci geoprzestrzennych baz. Na ich podstawie wyselekcjonowałem obszary i przeprowadziłem analizy pozwalające na określenie potencjału metali krytycznych, ale również wskazałem kierunki dalszego rozwoju ewentualnych badań i prac prowadzących do pozyskania i wykorzystania ich potencjału na tych terenach. Rezultaty wskazują na wyzwania, jakie niesie możliwość pozyskania metali krytycznych na obszarze Dolnego Śląska. Są one związane ze stosunkowo niskimi zawartościami tych surowców w złożach geogenicznych oraz trudnościami w ich wydobyciu i przeróbce. W przypadku zasobów antropogenicznych pewną barierę stanowią również dodatkowe poza-złożowe aspekty jak własność terenów czy kwestie środowiskowe. Otrzymane wyniki rozprawy doktorskiej stanowią przyczynek do zagadnień:

- 1) W obszarze geosfery – czy obszar na południowy-wschód od złoża Lubin-Małomice może być potencjalnym obszarem działalności górniczej w przyszłości?
- 2) W obszarze antroposfery – w jaki sposób można systematycznie analizować obiekty w kontekście surowcowym, w szczególności związanym z metalami krytycznymi oraz które z obszarów na terenie Dolnego Śląska mogą stanowić największy potencjał?

Zaprojektowane, interdyscyplinarne podejście pozwala na wniesienie nowego spojrzenia na kwestie wyznaczania potencjalnych zasobów, w szczególności tych antropogenicznych i daje możliwość oszacowania potencjalnych źródeł metali krytycznych, całość rozprawy stanowi próbę stworzenia systematycznego podejścia do tej kwestii.

## Streszczenie w języku angielskim

Challenges such as fighting climate change, reducing pollution, and decreasing resource consumption have intensified global efforts to protect the Earth. These are encapsulated in the seventeen Sustainable Development Goals. Their realization is possible thanks to global energy transformation and the implementation of circular economy principles at many levels. These challenges are associated with the consumption of numerous, usually rare resources, an important group of which are metals used in high technologies. An attempt to secure the supply of these resources is to formulate lists of critical raw materials. This allows for the direction of political and investment activities towards specific raw materials, which will provide Poland and other European countries with a place among independent, green, and highly developed countries.

My doctoral dissertation directly addresses the issue of critical metals and the possibility of ensuring their supply. It focuses on one of the most developed and at the same time metal-rich regions in Poland - Lower Silesia. I undertook the analysis of potential geogenic resources, as well as anthropogenic ones (in the form of mining, processing, and smelting waste).

The doctoral dissertation was carried out as part of *Interdok – Programy Interdyscyplinarnych Studiów Doktoranckich na Politechnice Wrocławskiej*, which enabled the implementation of works combining the issues of deposit geology and exploration, geochemistry, mineralogy, mining, economics, and management in mining.

The title of the dissertation contains three main elements: (1) identification, (2) methods of obtaining, and (3) utilization. This thematic approach allowed for creating a framework for prospecting and exploring resources of critical metals, methods of their exploitation and processing, as well as their use for analytically selected areas. However, I put the greatest emphasis on the foundation, which is the identification of potential. The need for action in this area is reinforced by the fact of the constant need to expand knowledge, but also access to data on potential resources of metals to be exploited now or in the future.

The results of the work are two comprehensive studies (pertaining to the geosphere and the anthroposphere) for Lower Silesia. I gathered data from reliable sources and presented it in the form of geospatial databases. Based on these, I selected areas and conducted analyses to determine the potential for critical metals, but also indicated directions for further development of potential research and work leading to the extraction and use of their potential in these areas.

The results indicate the challenges associated with the possibility of producing critical metals in the Lower Silesian region. These are related to the relatively low content of these resources in geogenic deposits and difficulties in their extraction and processing. In the case of anthropogenic resources, additional extra-deposit aspects such as land ownership or environmental issues also pose certain barriers.

The results of the doctoral dissertation contribute to important issues:

- 1) In the area of potential geogenic resources - can the area to the southeast of the Lubin-Małomice deposit be a potential area for mining activity in the future?
- 2) In the area of potential anthropogenic resources - how anthropogenic objects can be systematically analysed in the context of raw materials contained, particularly related to critical metals, and which areas in Lower Silesia may have the greatest potential?

The designed interdisciplinary approach, combining geology with economics and environmental protection, brings a fresh perspective on the issue of identifying potential deposits, especially anthropogenic ones, and allows for the estimation of economic potential. The whole conducted work attempts to create a systematic approach to this issue.





Załącznik 2. Średnie ceny produktów metali w okresie 2008-2022

Tab. 1. Średnie ceny produktów metali w okresach od 2008-2015 do 2022 roku w US\$/t.

	2008 - 2022	2009 - 2022	2010 - 2022	2011 - 2022	2012 - 2022	2013 - 2022	2014 - 2022	2015 - 2022
Li	16551.106	16551.106	16551.106	16551.106	16551.106	16551.106	17624.624	19011.879
Al	2036.952	1998.709	2024.422	2012.065	1976.990	1972.774	1986.902	2002.293
Ti	1315.646	1315.646	1315.646	1315.646	1315.646	1183.711	1143.012	1167.060
V	34124.667	32192.143	32743.846	32967.500	33348.182	34182.000	34902.222	36073.750
Cr	9705.139	9583.482	9700.000	9627.083	9316.477	9100.417	9106.019	9124.740
Mn	2499.899	2411.040	2400.415	2388.018	2303.615	2255.309	2248.153	2250.995
Co	42332.755	42332.755	42332.755	42332.755	42332.755	43687.706	45539.461	47393.856
Ni	16469.029	16137.980	16252.491	15767.980	15120.345	14879.100	14863.637	14613.488
Ga	233410.909	233410.909	233410.909	233410.909	233410.909	218431.000	211655.556	208791.250
Ge	934278.667	932396.429	944990.000	970386.667	947730.000	921071.000	877463.333	822901.250
Nb	29308.182	29308.182	29308.182	29308.182	29308.182	27563.000	26574.444	26477.500
Mo	40398.571	40398.571	40398.571	40398.571	40398.571	40398.571	40398.571	40398.571
Sb	8413.406	8413.406	8413.406	8413.406	8413.406	7975.030	7713.156	7497.166
W	35578.000	35704.286	36396.154	36805.833	35725.455	34431.000	33215.556	32127.500
Pt	39170004.729	38321485.287	38286617.626	37026862.755	35357754.311	33903637.422	32357583.038	30837870.833
Pd	33213671.684	34777807.036	36801030.552	38457704.938	39809814.328	41720416.285	43767132.811	46014992.446
Rh	173045463.703	170363782.710	179592100.439	188025693.329	199199664.226	215018127.758	235166683.941	259922322.746
REO	10513847.500	10513847.500	10513847.500	10513847.500	10513847.500	10513847.500	10513847.500	8407823.000
Y	7885.000	7885.000	7885.000	7885.000	7885.000	7885.000	7885.000	6406.000
La	2303.333	2303.333	2303.333	2303.333	2303.333	2303.333	2303.333	1921.250
Ce	13160.000	13160.000	13160.000	12575.833	4770.000	2750.000	2177.778	1837.500
Pr	86188.333	86188.333	86188.333	86188.333	86188.333	86188.333	86188.333	79826.000
Nd	78678.750	78678.750	78678.750	78678.750	78678.750	72191.429	72215.000	73648.000
Sm	3065.000	3065.000	3065.000	3065.000	3065.000	3065.000	3065.000	2488.000
Eu	207463.333	207463.333	207463.333	207463.333	207463.333	207463.333	207463.333	94680.000
Tb	912030.000	912030.000	912030.000	912030.000	912030.000	912030.000	912030.000	962988.000
Dy	300801.667	300801.667	300801.667	300801.667	300801.667	300801.667	300801.667	286450.000
Er	35882.222	35882.222	35882.222	35882.222	35882.222	35882.222	35882.222	31990.000
Cu	6936.447	6935.122	7072.513	7034.041	6871.633	6763.852	6700.703	6680.891
Zn	2335.999	2368.985	2423.931	2445.895	2468.895	2521.011	2588.897	2642.300
Ag	661019.349	673741.859	689336.737	692795.003	653157.030	618323.157	601897.698	600455.380
Sn	21164.553	21356.149	21955.728	22085.698	21758.269	21823.695	21769.782	21752.446
Re	2043000.000	2043000.000	2043000.000	1894300.000	1729222.222	1586625.000	1497571.429	1405500.000
Au	44340959.337	45504375.438	46598426.480	47198340.863	46901713.691	46227404.392	46323974.518	47025249.281
Pb	2070.677	2069.314	2096.012	2091.696	2063.558	2063.185	2054.447	2049.155

Tab. 2. Średnie ceny produktów metali w okresach od 2008-2015 do 2022 roku w US\$/t.

	2015 - 2022	2016 - 2022	2017 - 2022	2018 - 2022	2019 - 2022	2020 - 2022	2021 - 2022	2022 - 2022
Li	19011.879	20817.143	23008.333	24774.000	26765.000	31513.333	43055.000	68480.000
Al	2002.293	2050.953	2125.492	2157.050	2168.840	2294.007	2590.400	2706.050
Ti	1167.060	1213.753	1298.073	1395.772	1467.460	1538.783	1647.760	1904.170
V	36073.750	38571.429	41923.333	44024.000	35040.000	32763.333	36630.000	38990.000
Cr	9124.740	9192.560	9361.302	9441.330	9080.005	8972.957	9992.755	10859.040
Mn	2250.995	2312.744	2418.378	2543.680	2625.425	2892.307	3548.335	3167.920
Co	47393.856	50101.310	54201.198	53895.230	49213.840	54686.583	66364.250	63553.500
Ni	14613.488	15010.951	15913.730	17015.840	17991.378	19354.220	22145.330	25814.830
Ga	208791.250	214841.429	230796.667	250850.000	265607.500	304923.333	372580.000	411330.000
Ge	822901.250	768492.857	757025.000	753206.000	715397.500	729483.333	786165.000	787760.000
Nb	26477.500	27117.143	28158.333	28614.000	26915.000	28243.333	31935.000	36860.000
Mo	40398.571	40398.571	42540.000	44898.000	46400.000	48500.000	53750.000	58300.000
Sb	7497.166	7527.230	7800.180	7796.402	7852.300	8539.703	10202.820	11072.350
W	32127.500	32635.714	33900.000	34796.000	34182.500	35246.667	38420.000	40990.000
Pt	30837870.833	30396234.399	30171225.102	30104608.754	30559606.120	31488334.020	33003062.860	30898796.500
Pd	46014992.446	49412849.839	54369163.000	59655131.544	66288650.405	71897642.860	72479357.035	67811390.140
Rh	259922322.746	292670880.000	336987465.000	395915464.000	473917707.500	582957273.333	665423490.000	577061120.000
REO	8407823.000	7356911.250	6352991.667	5133212.500	5133212.500	5133212.500	5133212.500	8262840.000
Y	6406.000	6305.000	7183.333	9095.000	9095.000	9095.000	9095.000	11860.000
La	1921.250	1812.857	1806.667	1708.000	1587.500	1490.000	1410.000	1350.000
Ce	1837.500	1758.571	1780.000	1722.000	1615.000	1520.000	1445.000	1400.000
Pr	79826.000	82932.500	94580.000	110255.000	110255.000	110255.000	110255.000	128240.000
Nd	73648.000	80227.500	93860.000	116095.000	116095.000	116095.000	116095.000	133760.000
Sm	2488.000	2485.000	2673.333	2980.000	2980.000	2980.000	2980.000	3740.000
Eu	94680.000	51022.500	45336.667	30810.000	30810.000	30810.000	30810.000	29760.000
Tb	962988.000	1067082.500	1287963.333	1683355.000	1683355.000	1683355.000	1683355.000	2044380.000
Dy	286450.000	290380.000	323116.667	393955.000	393955.000	393955.000	393955.000	382080.000
Er	31990.000	30428.571	31085.000	32048.000	33895.000	37206.667	44540.000	53480.000
Cu	6680.891	6849.430	7180.540	7384.186	7599.033	8130.577	9111.905	8911.920
Zn	2642.300	2743.751	2852.653	2844.480	2824.463	2916.503	3242.795	3481.670
Ag	600455.380	614125.189	624796.175	638642.430	672030.980	722534.443	754095.760	699278.740
Sn	21752.446	22564.721	23330.070	23978.270	24933.675	27024.803	31970.830	31354.580
Re	1405500.000	1318600.000	1303250.000	1394333.333	1614500.000	2400000.000	2400000.000	2400000.000
Au	47025249.281	48412594.184	49793147.242	51663613.376	54373503.353	57574806.773	57959758.380	57986443.500
Pb	2049.155	2086.737	2122.805	2083.966	2044.120	2059.860	2177.955	2152.080

Załącznik 3. Baza geogenicznych wystąpień metali krytycznych

Tab. 1. Cechy surowcowe lokalizacji geogenicznych

Lp.	Główny Metal krytyczny	Główny rudny	Wszystkie metale krytyczne	Wszystkie pierwiastki	klasa	Nazwa lokalizacji	Główna kopalina	Rodzaj wystąpienia
1	Mo	Mo	Mo	Mo	D	Działoszyn		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
2	Ti	Fe	Ti	Fe Ti	D	Żarkowice		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
3	Co	Cu	Co, Ni	Cu Pb Zn Ni Co Ag Au FeS <sub>2</sub>	B	Lubichów	rudy miedzi	wystąpienie <sup>[1]</sup>
4	Co	Cu	Co, Ni	Cu Pb Zn Ni Co Ag Au FeS <sub>2</sub>	B	Konrad	rudy miedzi	wystąpienie <sup>[1]</sup>
5	Co	Cu	Co, Ni	Cu Pb Zn Ni Co Ag Au FeS <sub>2</sub>	B	Grodziec	rudy miedzi	wystąpienie <sup>[1,2]</sup>
6	Ti	Au	Ti	Au Ti Zr	B	Złotoryja	rudy złota	wystąpienie <sup>[1]</sup>
7	Co	Cu	Co, Ni	Cu Pb Zn Ni Co Ag Au FeS <sub>2</sub>	B	Wilków Złotoryjskich	rudy miedzi	wystąpienie <sup>[1,3]</sup>
8	V	V	V	V	D	Golejów		wystąpienie <sup>[1]</sup>
9	Sb	As	Sb	As Au Cu Pb Ag Zn Sb FeS <sub>2</sub> , Bi, Co	D	Radomice	rudy złota i arsenu	wystąpienie <sup>[3,4]</sup>
10	Sb	As	Sb	As Au Cu Pb Ag Zn Sb FeS <sub>2</sub>	D	Pilchowice	rudy złota i arsenu	wystąpienie <sup>[1]</sup>
11	Co	Cu	Co, Sb, Ba, Bi, Te	Cu Pb Ag Au As Co Sb Sn Zn Fe FeS <sub>2</sub> Ba, Bi, Te	D	Stara Góra	rudy polimetaliczne	wystąpienie <sup>[1]</sup>
12	Mn	Ba	Mn, Ba	Ba Cu Pb Fe Mn FeS <sub>2</sub>	D	Stanisławów	baryt	złoże barytu <sup>[1,5]</sup>
13	Sb	Fe	Sb, Ba	Fe Cu Pb Zn Sb FeS <sub>2</sub> Ba	D	Wilcza	rudy żelaza	wystąpienie <sup>[1]</sup>
14	Ti	Au	Ti	Au Ti Zr	D	Kopacz	rudy złota	wystąpienie <sup>[1]</sup>
15	Co	Fe	Co, Ni, Sb, Ba	Fe Cu Pb Zn Ni Co Sb FeS <sub>2</sub> Ba	D	Chełmiec	rudy żelaza i metali nieżelaznych	wystąpienie <sup>[1,3]</sup>
16	Co	Co	Co	Co Sn Pb Zn Cu Ni Fe FeS <sub>2</sub>	A	Przecznica	rudy cyny i kobaltu	wystąpienie <sup>[1,3]</sup>

17	Li	Zr	Li, TR	Zr TR As Ti FeS2 Li	D	Skalna Brama	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
18	Li	Ag	Li, Ti, TR, Nb, Ta, Ce, Y	Ag Zn Fe Ti TR Nb Zr Ta Ce Y Ag Li	D	Biała Dolina	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
19	Li	Zr	Li, TR	Zr TR Li	D	Józwin	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
20	Li	Zr	Li, Bi, W, TR	Zr As Cu Bi W TR FeS2 Li	D	Zbójeckie Skały	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
21	Li	Bi	Li, Bi, TR	Bi Zr TR Li	D	Szklarka	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
22	Li	Zr	Li, TR	Zr TR Li	D	Bystroń	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
23	Mo	Mo	Mo	Mo	D	Mały Kocioł Śnieżnej	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
24	Mo	Mo	Mo, TR, Li	Mo As Cu Zr TR FeS2 Li	D	Michałowice	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
25	Mo	Mo	Mo	Mo	D	Cieplice Zdrój	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
26	Ti	Ti	Ti, TR	Ti TR	D	Czarne	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
27	Ti	Fe	Ti, Li	Fe Ti Li	D	Łomnica	przejaw mineralizacji <sup>[1,3]</sup>
28	Ti	Fe	Ti	Fe Ti	D	Bobrów	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
29	Mo	Fe	Mo	Fe Mo	D	Trzecińsko	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
30	Mo	Mo	Mo	Mo	D	Miłków	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
31	Ti	Pb	Ti	Pb Cu Ti	D	Karpacz	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
32	Mo	Mo	Mo	Mo	D	Bierutowice	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
33	Mo	As	Mo, W	As Cu Pb Zn Mo W FeS2	D	Równia pod Śnieżką	wystąpienie <sup>[1]</sup>

34	Ti	As	Ti	As Ti	D	Ściegny		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
35	Mo	Mo	Mo	Mo Pb As	C	Kowary		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
36	Co	Ni	Co, Ni, W, TR	Ni Co W Sn TR FeS2	D	Wołowa Góra		przejaw mineralizacji <sup>[1,3]</sup>
37	Co	U	Co, Bi, Ni	U Fe As Cu Pb Zn Bi Ni Co FeS2	C	Kowary "Wolność"	rudy żelaza i uranu	wystąpienie <sup>[1,3]</sup>
38	Co	Cu	Bi	Cu Fe As Pb Zn Ag Bi FeS2 Co	B	Miedzianka	rudy polimetaliczne	wystąpienie <sup>[1,3]</sup>
39	Ti	Au	Ti	Au Zr Ti	D	Legnickie Pole	rudy złota	wystąpienie <sup>[1,6]</sup>
40	Ti	Au	Ti	Au Zr Ti	D	Mikołajowice	rudy złota	złoże złota <sup>[1,5,7]</sup>
41	Ti	Au	Ti	Au Zr Ti	D	Wądroże	rudy złota	wystąpienie <sup>[1]</sup>
42	Al	Al	Ti, Al	Al Fe Ti	D	Legnica	rudy aluminium	wystąpienie <sup>[1]</sup>
43	Mo	Mo	Mo, W	Mo W Cu Sn FeS2	D	Paszowice		wystąpienie <sup>[1,8]</sup>
44	Mo	Mo	Mo	Mo Cu FeS2	D	Borów		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
45	Mo	Fe	Mo	Fe Mo Cu FeS2	D	Kostrza		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
46	Mo	Fe	Mo, Ti, Be	Fe Pb Cu As Mo Ti Zr Be FeS2	D	Strzegom		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
47	Ti	Ti	Ti	Ti	D	Imbramowice		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
48	Ti	Ti	Ti	Ti	D	Gola Świdnicka		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
49	Ni	Ni	Ni	Ni Mg	D	Gogołów		wystąpienie <sup>[1]</sup>
50	Ni	Ni	Ni	Ni Fe Mg	C	Wiry		wystąpienie <sup>[1]</sup>
51	Cr	Cr	Cr, Ni	Cr Ni Mg	D	Tąpadła	rudy chromu	wystąpienie <sup>[1]</sup>
52	Ni	Ni	Ni	Ni Fe	D	Sulistrowiczki		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
53	Ni	Ni	Ni	Ni Fe	D	Słupica		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>

54	Ni	Ni	Ni	Ni Fe	D	Winna Góra		wystąpienie <sup>[1]</sup>
55	Ni	Ni	Ni	Ni Fe	D	Oleszna		wystąpienie <sup>[1]</sup>
56	Co	U	Co	U Cu Pb Fe Zn Co FeS2	D	Grzmiąca	rudy uranu	wystąpienie <sup>[1]</sup>
57	Ti	Ti	Ti	Ti	D	Jedlinka		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
58	Mn	Cu	Mn, Ba	Cu Mn Ba	D	Podlesie k. Wałbrzycha	węgiel kamienny	złoże węgla kamiennego
59	Co	Cu	Co, Ni, Sb, Bi, Ba	Cu Pb Zn Ni Co Sb Bi FeS2 U Ba	D	Dzieńmorowice		wystąpienie <sup>[1]</sup>
60	Ti	Ti	Ti	Ti	D	Raczkowice		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
61	Ti	Ti	Ti, Li	Ti, Li	D	Michałkowa		przejaw mineralizacji <sup>[1,3]</sup>
62	Ti	Ti	Ti	Ti	D	Walim		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
63	Ti	Ti	Ti	Ti	D	Wielka Sowa		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
64	Ti	Ti	Ti	Ti	D	Kamieniczki		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
65	Ti	Be	Be, Ti, TR	Be Ti TR	D	Bielawa		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
66	Ti	Be	Be, Ti	Be Ti	D	Piława Dolna		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
67	Ti	Ti	Ti	Ti	D	Niemcza		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
68	Ti	Be	Be, Ti, TR	Be Ti TR	B	Piława Górna		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
69	Ti	Be	Be, Ti	Be Ti	D	Owiesno		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
70	Ti	Be	Be, Ti	Be Ti	D	Różana		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
71	Ti	Ti	Ti	Ti	D	Lutomierz		przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>

72	Ti	Ti	Ti	Ti Pb	D	Grodziszczce Ząbkowickie	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
73	Cr	Ni	Cr, Ni	Ni Cr Fe	D	Wolibórz	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
74	Sb	Sb	Sb	Sb	D	Bardo	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
75	Sb	Pb	Sb	Pb Zn Sb FeS <sub>2</sub>	D	Dębowina Dolna	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
76	Sb	Fe	Sb, Ba	Fe Sb Ba	D	Dańczów rudy żelaza	wystąpienie <sup>[1]</sup>
77	Ti	Ti	Ti	Ti	D	Przerzeczyn Zdrój	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
78	Ti	Ti	Ti	Ti	D	Karczowice	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
79	Mn	Fe	Mn	Fe Mn	D	Stolec	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
80	Ni	Ni	Ni, Mg	Ni Fe Mg	D	Braszowice rudy niklu	wystąpienie <sup>[1]</sup>
81	Ni	Ni	Ni, Mg	Ni Fe Mg	D	Brzeźnica Ząbkowicka	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
82	Ti	Ti	Ti	Ti	D	Mikoszów	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
83	Ti	Ti	Ti	Ti Fe	D	Kuropatnik	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
84	Mo	Mo	Mo	Mo	D	Biały Kościół	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
85	Ti	Fe	Ti	Fe Ti	D	Romanów	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
86	Ti	Ti	Ti	Ti	D	Nowina	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
87	Ti	Ti	Ti	Ti	D	Henryków	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>
88	Al	Al	Al	Al Fe	D	Nowa Ruda rudy aluminium	wystąpienie <sup>[1]</sup>
89	Sb	Sb	Sb	Sb	D	Książno	przejaw mineralizacji <sup>[1]</sup>



90	Co	Cu	Co, Ni, V, Mo	Cu Pb Zn As Ni Co V Ag Mo Au Re Cd Hf	A	Radwanice- Wschód	rudy miedzi	złoże wybilansowane <sup>[4]</sup>
91	Co	Cu	Co, Ni, V, Mo	Cu Pb Zn As Ni Co V Ag Mo Au Re Cd Hf	A	Lubin-Małomice	rudy miedzi	złoże bilansowe <sup>[4,5]</sup>
92	Co	Cu	Co, Ni, V, Mo	Cu Pb Zn As Ni Co V Ag Mo Au Re Cd Hf	A	Polkowice	rudy miedzi	złoże bilansowe <sup>[4,5]</sup>
93	Co	Cu	Co, Ni, V, Mo	Cu Pb Zn As Ni Co V Ag Mo Au Re Cd Hf	A	Rudna	rudy miedzi	złoże bilansowe <sup>[4,5]</sup>
94	Co	Cu	Co, Ni, V, Mo	Cu Pb Zn As Ni Co V Ag Mo Au Re Cd Hf	A	Gaworzyce	rudy miedzi	złoże wybilansowane <sup>[4]</sup>
95	Co	Cu	Co, Ni, V, Mo, Li	Cu Pb Zn As Ni Co V Ag Mo Au Re Cd Hf Li	A	Sierszowice	rudy miedzi	złoże bilansowe <sup>[3-5]</sup>
96	Co	Cu	Co, Ni	Cu Pb Zn Ni Co Ag Au FeS <sub>2</sub>	A	Nowy Kościół	rudy miedzi	złoże bilansowe <sup>[4,5]</sup>
97	Co	Cu	Co, Ni	Cu Pb Zn Ni Co Ag Au FeS <sub>2</sub>	A	Wartowice	rudy miedzi	złoże bilansowe <sup>[4,5]</sup>
98	Co	Cu	Co, Ni	Cu Pb Zn Ni Co Ag Au FeS <sub>2</sub>	A	Niecka Grodziecka	rudy miedzi	złoże bilansowe <sup>[4,5]</sup>
99	Ni	Mg	Ni, Mg	Ni Fe Mg	A	Grochów	rudy niklu	złoże bilansowe <sup>[4,5]</sup>
100	Ni	Ni	Ni, Mg	Ni Fe Mg	A	Szklary-Szklana Góra	rudy niklu	złoże bilansowe <sup>[4,5]</sup>
101	Ni	Ni	Ni, Mg	Ni Fe Mg	A	Szklary-Wzgórze Kozmickie	rudy niklu	złoże bilansowe <sup>[4,5]</sup>
102	Ni	Ni	Ni, Mg	Ni Fe Mg	A	Szklary-Wzgórze Siodłowe	rudy niklu	złoże bilansowe <sup>[4,5]</sup>
103	Co	Sn	Co	Sn Zn Co Pb Cu FeS <sub>2</sub> , Bi, In	A	Gierczyn	rudy cyny	złoże bilansowe <sup>[3-5]</sup>
104	Co	Sn	Co	Sn Zn Co Pb Cu FeS <sub>2</sub> , Bi, In	A	Krobica	rudy cyny	złoże bilansowe <sup>[3-5]</sup>
105	Sb	As	Sb, Bi, Co	As Au Cu Pb Ag Zn Sb FeS <sub>2</sub>	B	Złoty Stok	rudy arsenu	złoże bilansowe <sup>[4,5]</sup>
106	Co	Cu	Co, Ni, V, Mo	Cu Pb Zn As Ni Co V Ag Mo Au Re Cd Hf	A	Bytom Odrzański	rudy miedzi	złoże bilansowe <sup>[4,5]</sup>
107	Co	Cu	Co, Ni, V, Mo	Cu Pb Zn As Ni Co V Ag Mo Au Re Cd Hf	A	Głogów	rudy miedzi	złoże bilansowe <sup>[4,5]</sup>
108	Co	Cu	Co, Ni, V, Mo	Cu Pb Zn As Ni Co V Ag Mo Au Re Cd Hf	A	Radwanice-Zachód	rudy miedzi	złoże wybilansowane <sup>[4]</sup>

109	Co	Cu	Co, Ni, V, Mo	Cu Pb Zn As Ni Co V Ag Mo Au Re Cd Hf	A	Retków	rudy miedzi	złoże bilansowe <sup>[4,5]</sup>
110	Co	Cu	Co, Ni, V, Mo	Cu Pb Zn As Ni Co V Ag Mo Au Re Cd Hf	A	Głogów Głęboki-Przemysłowy	rudy miedzi	złoże bilansowe <sup>[4,5]</sup>
111	Ni	Ni	Ni, Mg	Ni Fe Mg	A	Szklary 1	rudy niklu	złoże bilansowe <sup>[4,5]</sup>
112	Co	Cu	Co, Ni, V, Mo	Cu Pb Zn As Ni Co V Ag Mo Au Re Cd Hf	A	Radwanice-Gaworzycze	rudy miedzi	złoże bilansowe <sup>[4,5]</sup>
113	Co	Cu	Co, Ni, V, Mo	Cu Pb Zn As Ni Co V Ag Mo Au Re Cd Hf	A	Retków-Grodziszczce	rudy miedzi	złoże bilansowe <sup>[4,5]</sup>
114	Co	Co	Co		D	Nowa Ruda		wystąpienie <sup>[3]</sup>
115	Li		Li		D	Lutomia		wystąpienie <sup>[3]</sup>
116	Co		Co		D	Boguszów		wystąpienie <sup>[3]</sup>
117	Li		Li		C	Kowary		wystąpienie <sup>[3]</sup>
118	Co		Co, Bi		D	Czarnów		wystąpienie <sup>[3]</sup>
119	Li		Li		D	Szklarska Poreba-Huta		wystąpienie <sup>[3]</sup>
120	Li		Li		D	Szklarska Poręba		wystąpienie <sup>[3]</sup>
121	Co		Co		D	Szklarska Poręba (Czarna Góra)		prospekt
122	REE		REE		D	Szklarska Poręba		wystąpienie <sup>[3]</sup>
123	Li		Li		D	Strzegom		wystąpienie <sup>[3]</sup>
124	Li		Cu, Li		B	Mirsk Wyrwak		wystąpienie <sup>[3]</sup>
125	Ti	Ti	Ti, V		B	Strzegomiany-Kunów		wystąpienie <sup>[9]</sup>
126	Co	Cu	Co, Ni, Li	Cu, Pb, Zn, Co, Ag,	A	Niemstów-Wielowieś	rudy miedzi	Prospekt <sup>[9]</sup>
127	REE		REE		B	Markocice		wystąpienie <sup>[9]</sup>

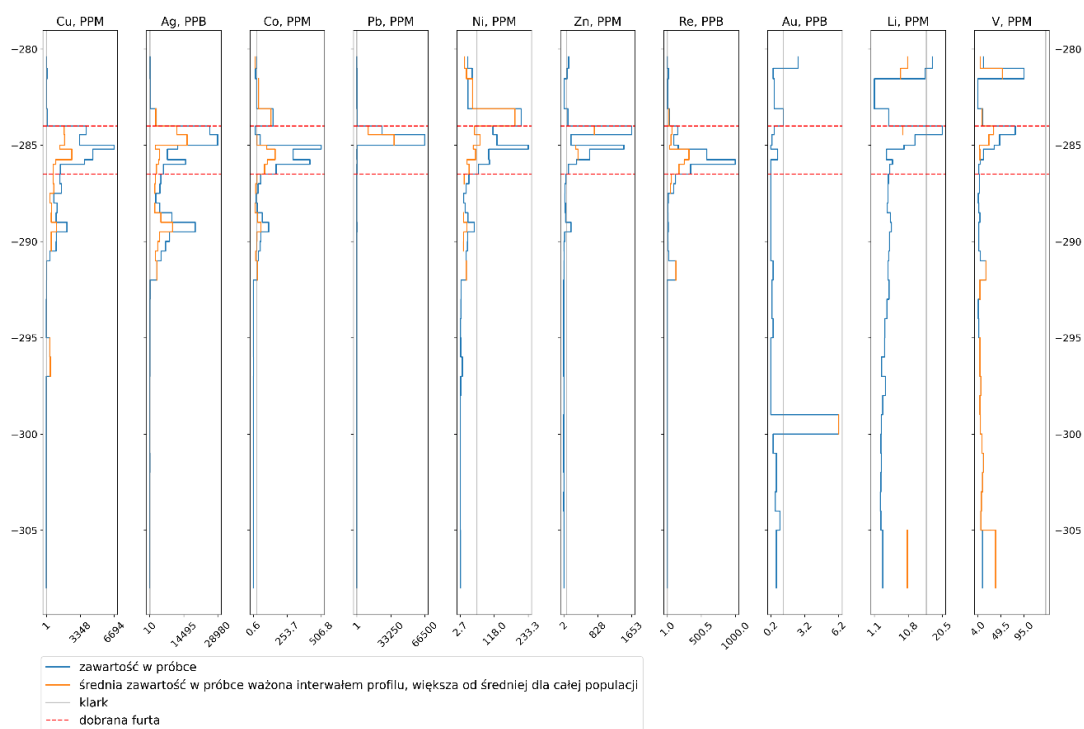
## Spis Literatury

1. Fedak, J., & Lindner, M. (1966). Metalogeneza Sudetów. *Instytut Geologiczny Prace*.
2. Geopark Kraina Wygasłych Wulkanów. (b.d.). *Grodziec—Górnictwo miedzi*. Pobrano 20 maj 2023, z Geopark Kraina Wygasłych Wulkanów

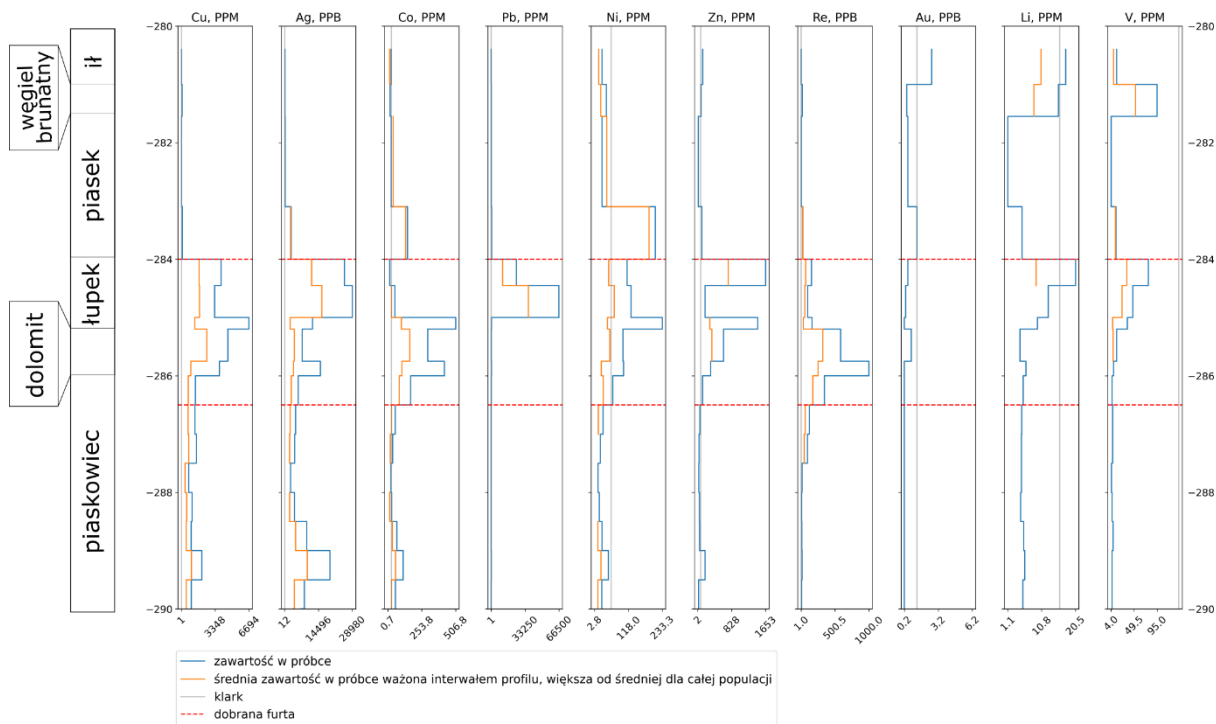
3. Strona internetowa projektu FRAME. (2023). <https://www.frame.lneg.pt/>
4. PIG CBDG. (2023). *Surowce—Złóża kopalni* [Data set].
5. Szuflicki, M., Malon, A., & Tymiński, M. (2022). *Bilans zasobów złóż kopalni w Polsce wg stanu na 31 XII 2021 r.* Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy.
6. Narodowy Instytut Dziedzictwa. (b.d.). *Legnickie Pole—Miejsce eksploatacji surowca, st.2*. Pobrano 5 maj 2023, z <https://zabytek.pl/pl/obiekty/g-290181>
7. Adamiak, B. (2020). *Gorączka złota w Mikołajowicach*. <https://goldenmark.com/pl/mysaver/goraczka-zlota-w-mikolajowicach/>
8. Polski Producent. (b.d.). *Kopalnia Paszowice*. <https://polskiproducent.pl/kopalnia-paszowice-sp-z-oo/kruszywo-granitowe-854>
9. Cwojdzński, S., Nieć, M., Bossowski, A., Michniewicz, M., Mikulski, S., Mochnacka, K., Mydłowski, A., Oszczepalski, S., Pacuła, J., Petecki, Z., Sroga, C., Stachowiak, A., Wojciechowski, A., Biel, A., & Iwaniec, E. (2008). *Ocena perspektyw występowania złóż rud metali w Sudetach i na Bloku Przedśudeckim w nawiązaniu do aktualnych modeli geotektonicznych*. Państwowy Instytut Geologiczny - Oddział dolnośląski im. Henryka Teisseyre'a.

Załącznik. 4. Profile geochemiczne otworów wiertniczych B1, B2, B4, B7 oraz B10 obszaru koncesyjnego Niemstów-Wielowieś

Otwór B1

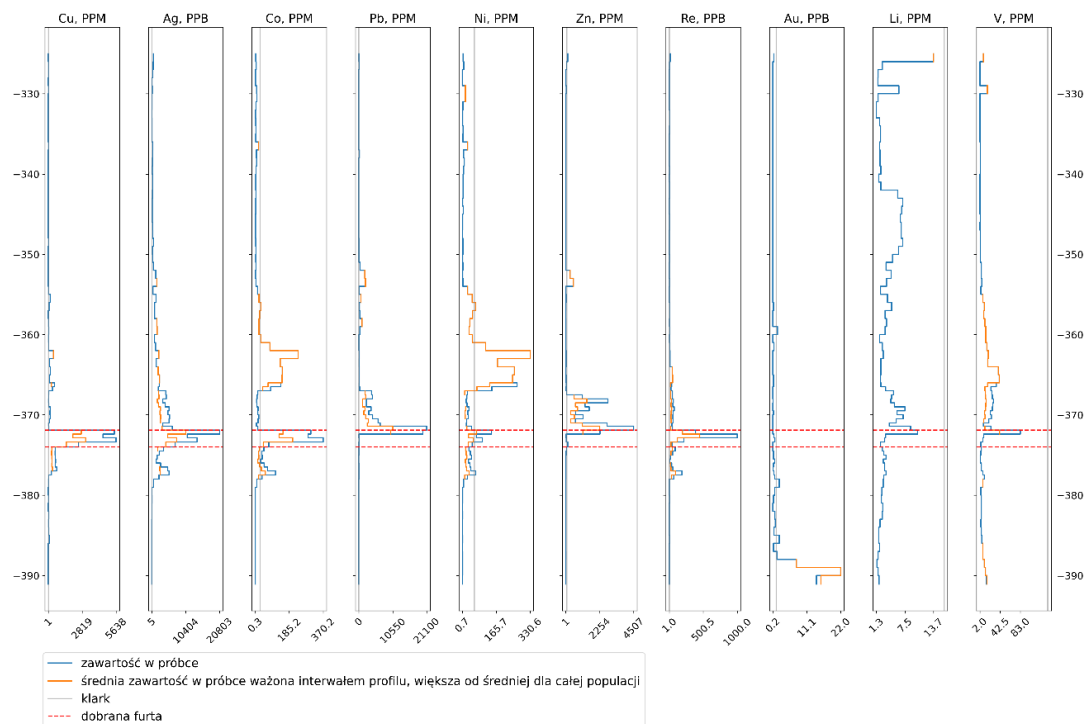


Rys. 1. Profil geochemiczny otworu B1

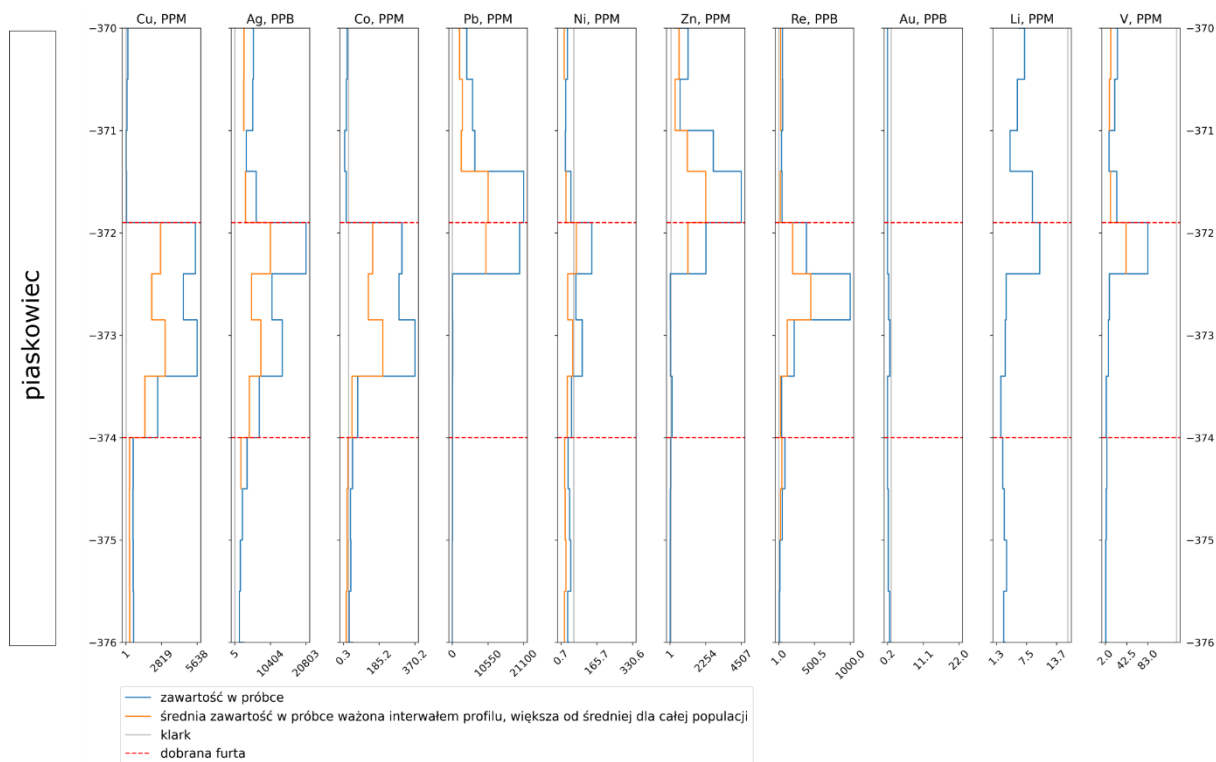


Rys. 2. Profil geochemiczny oraz uproszczony profil litologiczny dobranej furty w otworze B1

## Otwór B2

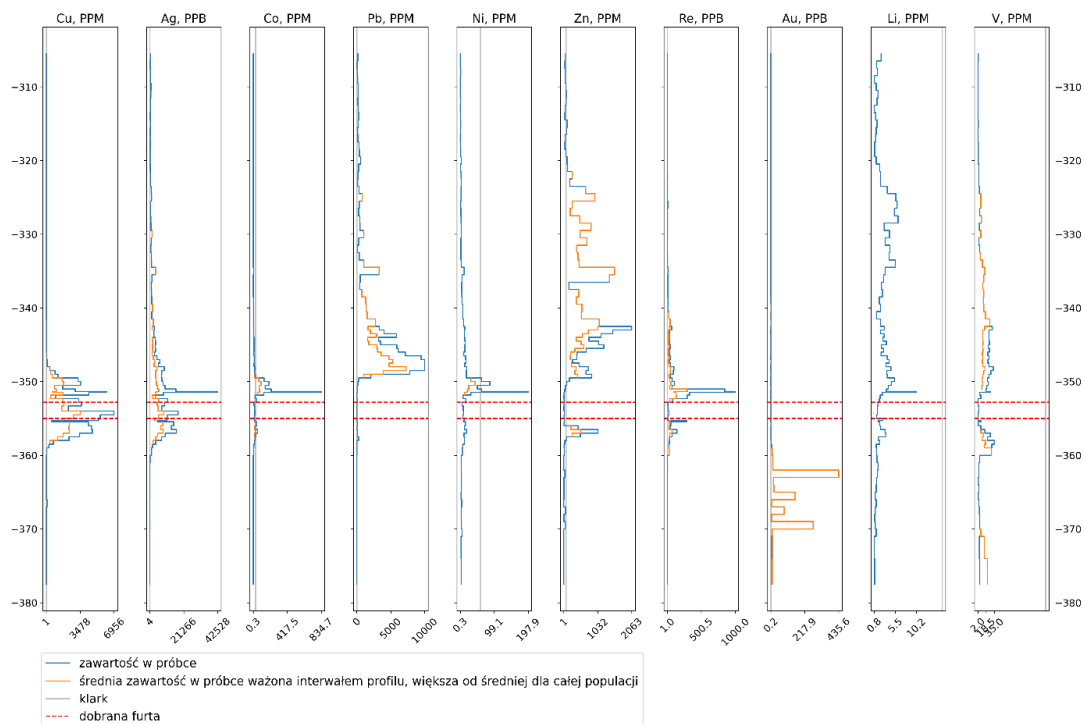


Rys. 3. Profil geochemiczny otworu B2

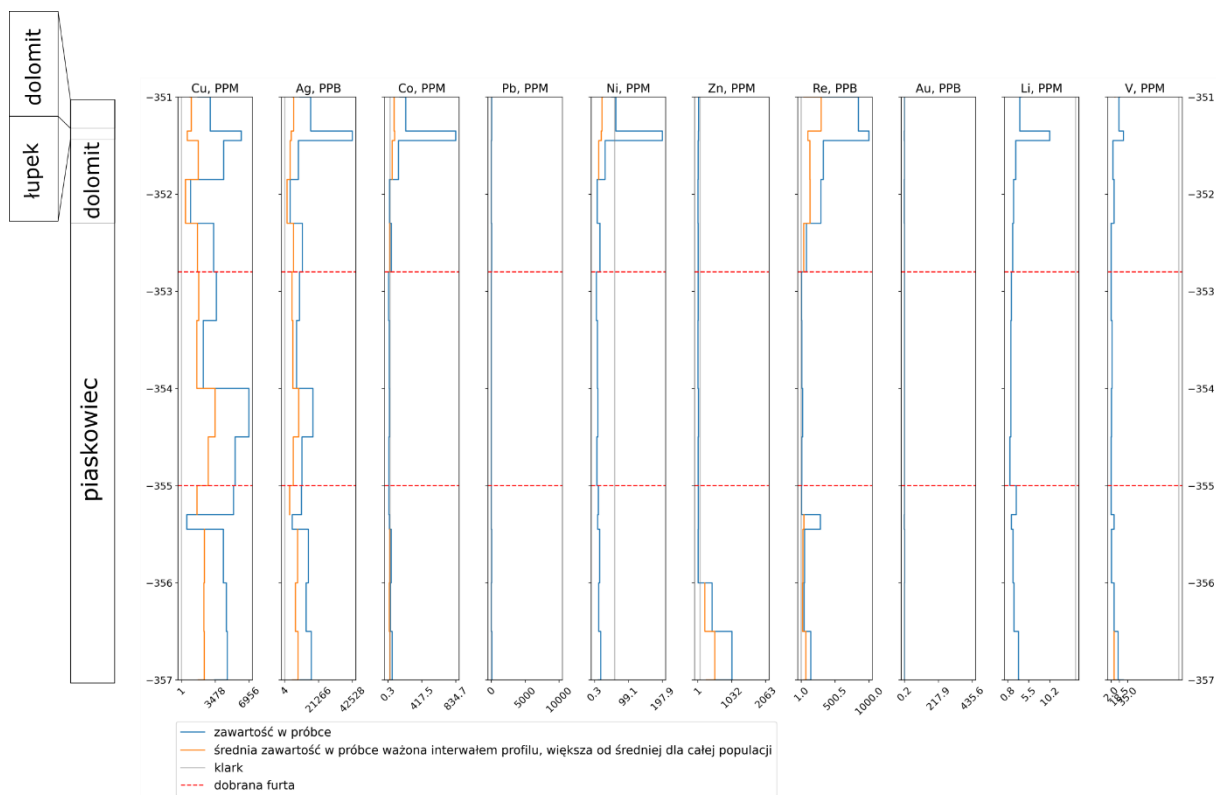


Rys. 4. Profil geochemiczny oraz uproszczony profil litologiczny dobranej furty w otworze B2

# Otwór B4

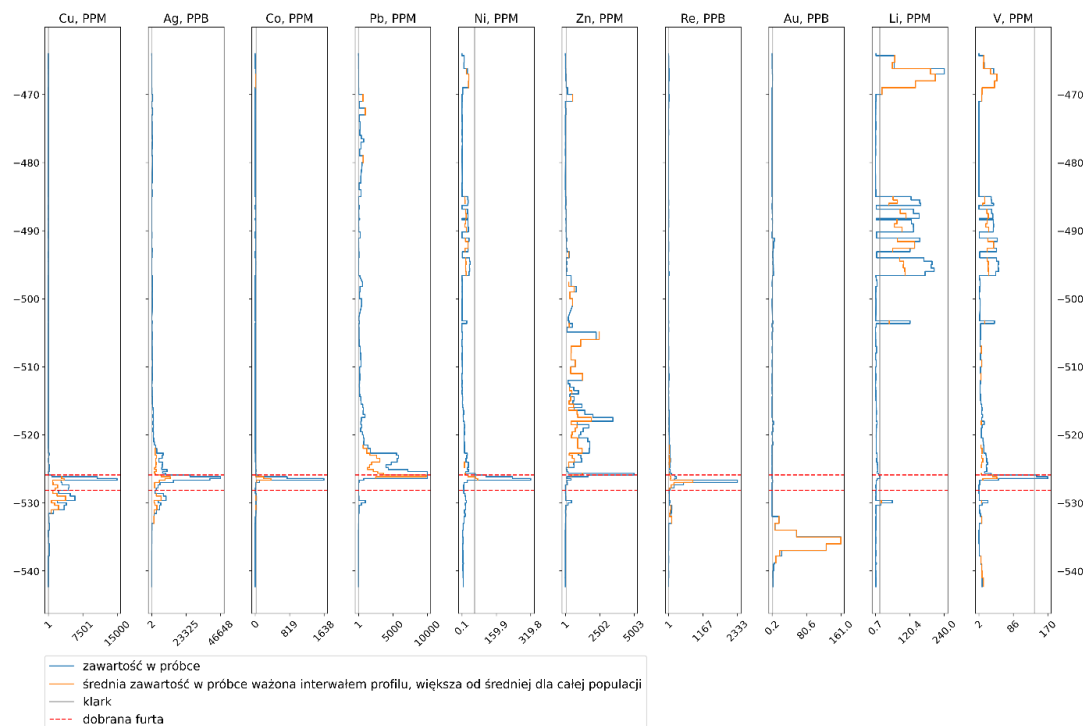


Rys. 5. Profil geochemiczny otworu B4

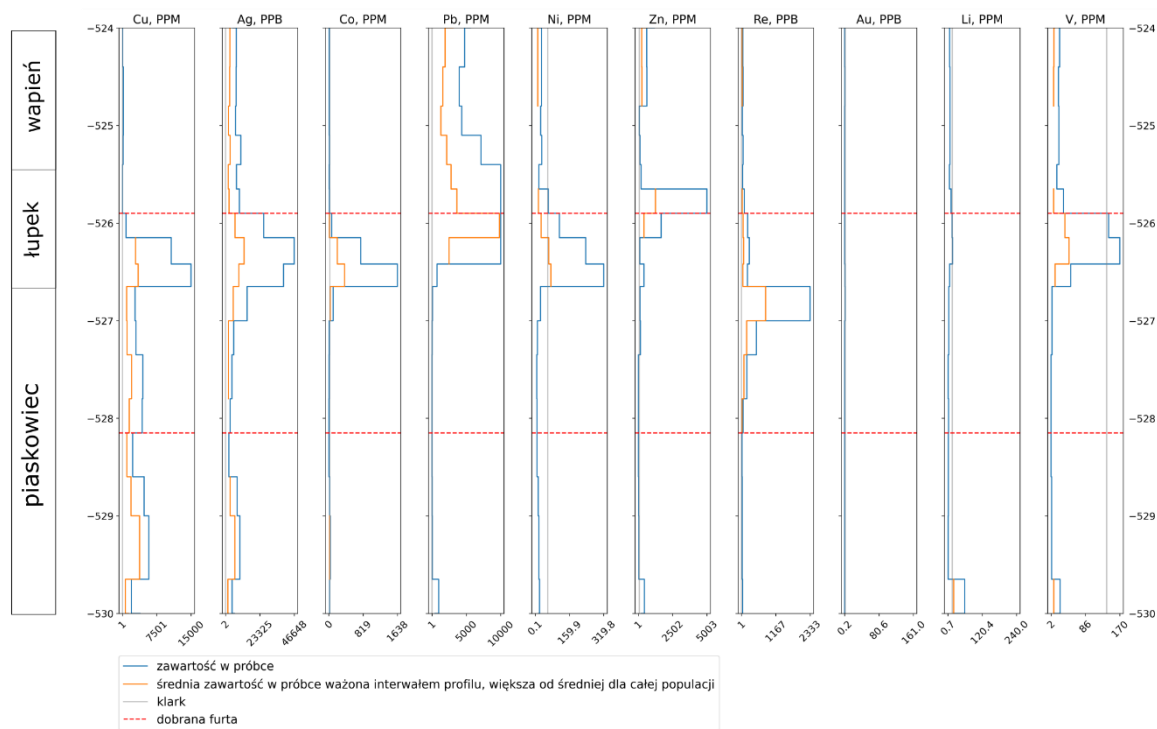


Rys. 6. Profil geochemiczny oraz uproszczony profil litologiczny dobranej furty w otworze B4

## Otwór B7

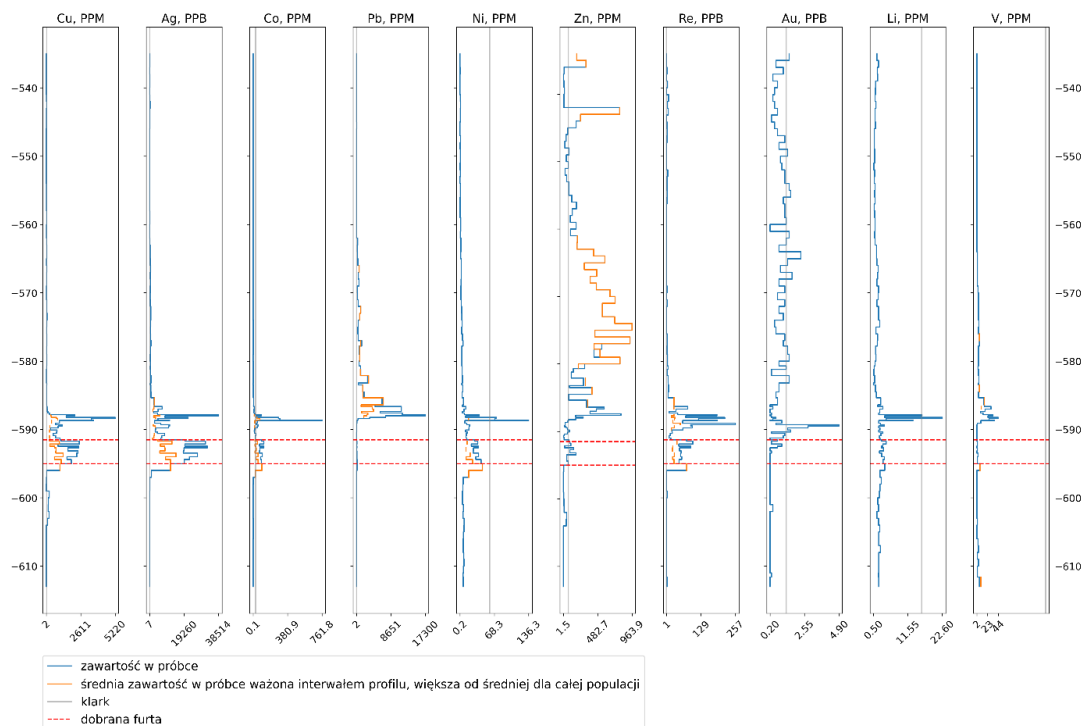


Rys. 7. Profil geochemiczny otworu B7

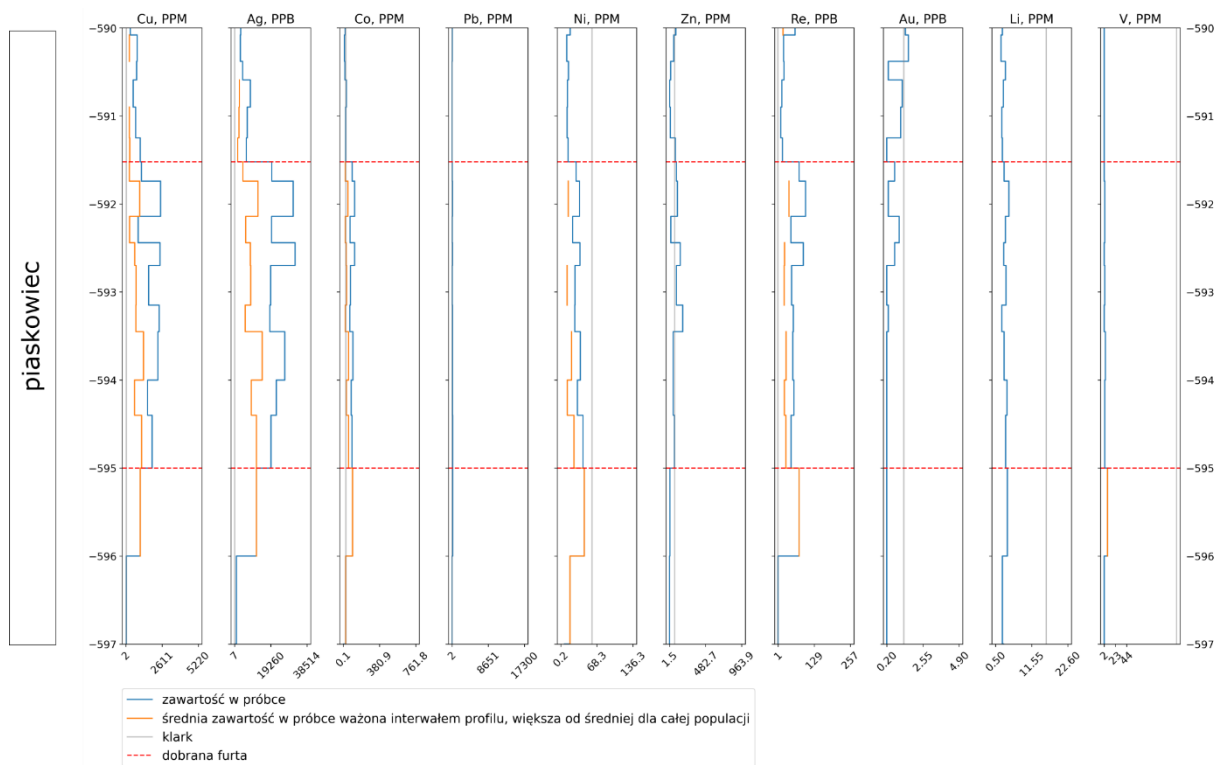


Rys. 8. Profil geochemiczny oraz uproszczony profil litologiczny dobranej furty w otworze B7

## Otwór B10



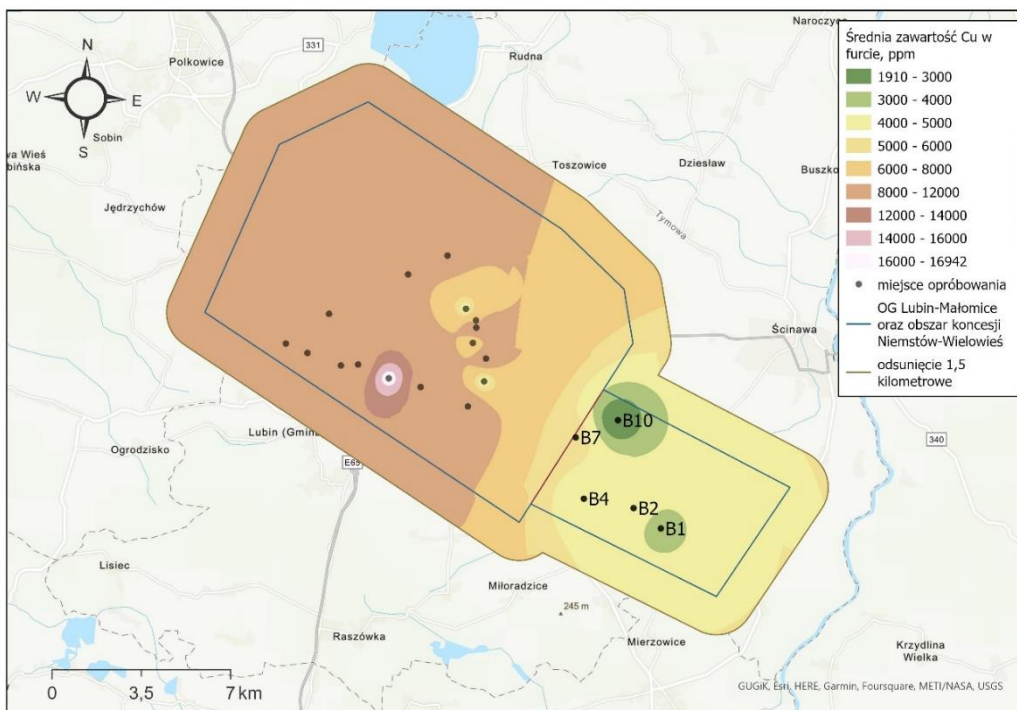
Rys. 9. Profil geochemiczny otworu B10



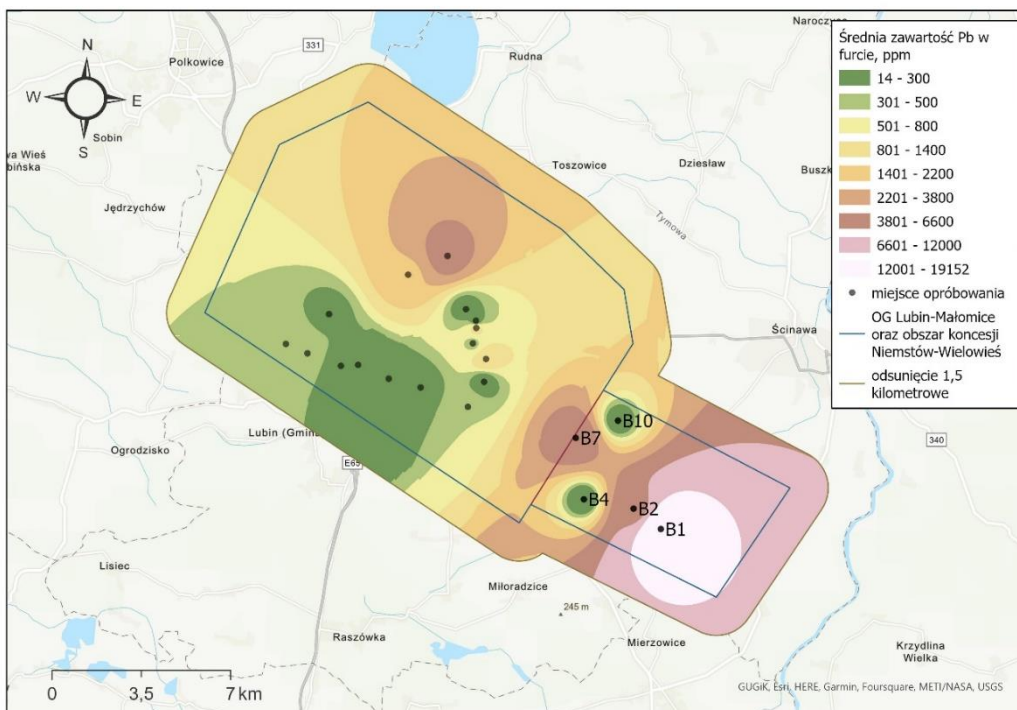
Rys. 10. Profil geochemiczny oraz uproszczony profil litologiczny dobranej furty w otworze B10



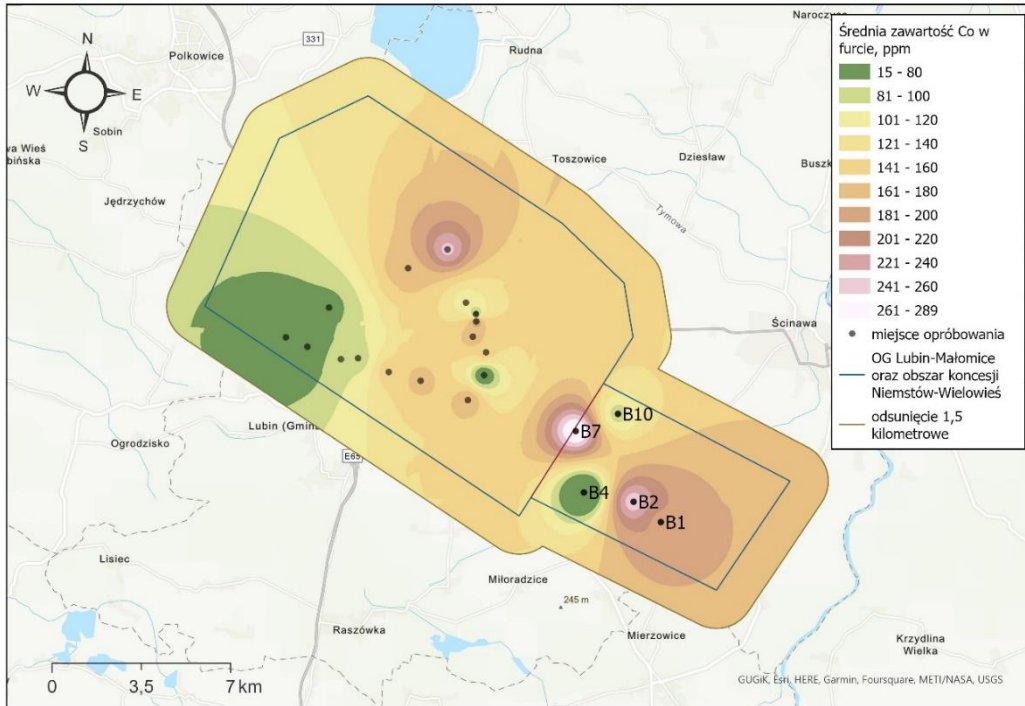
Załącznik 5. Mapy interpolacji metalu ekwiwalentnego na obszarze ZG Lubin i Niemstów-Wielowieś



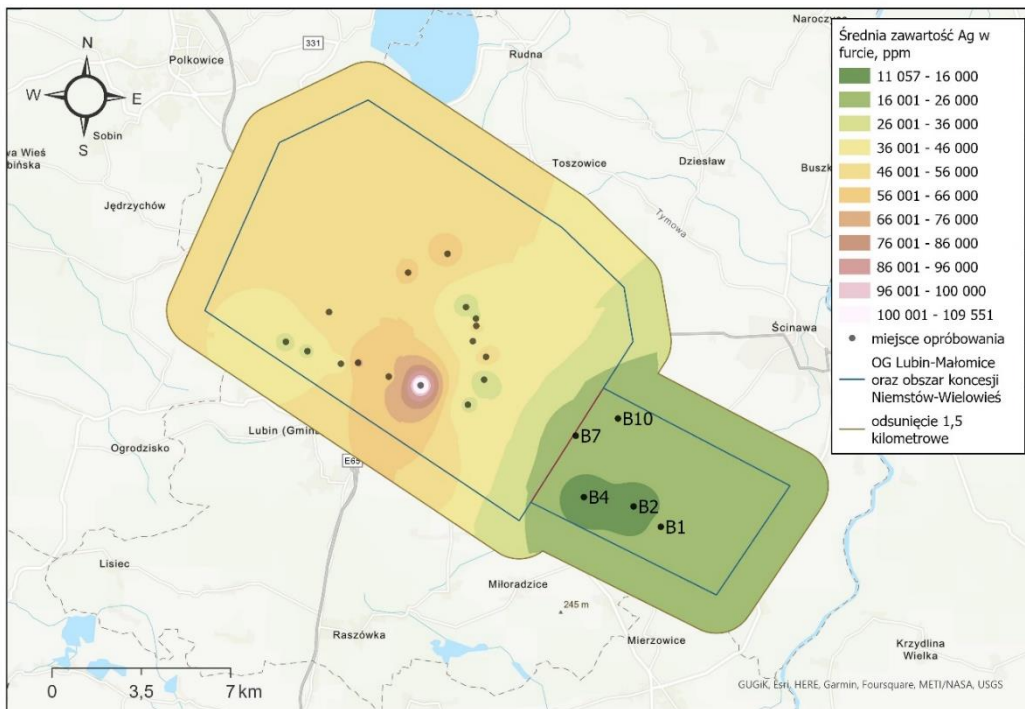
Rys. 1. Przestrzenny rozkład Cu w furcie dla obszaru górniczego Lubin-Małomice oraz obszaru Niemstów-Wielowieś (wschód).



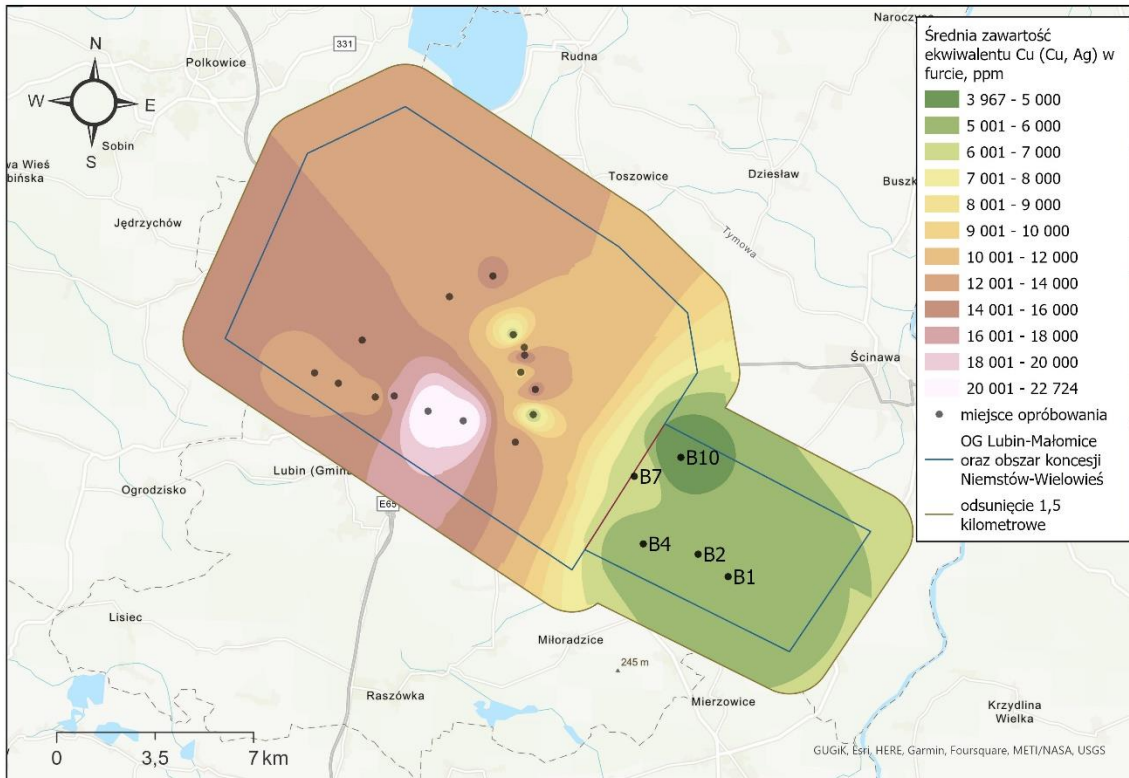
Rys. 2. Przestrzenny rozkład Pb w furcie dla obszaru górniczego Lubin-Małomice oraz obszaru Niemstów-Wielowieś (wschód).



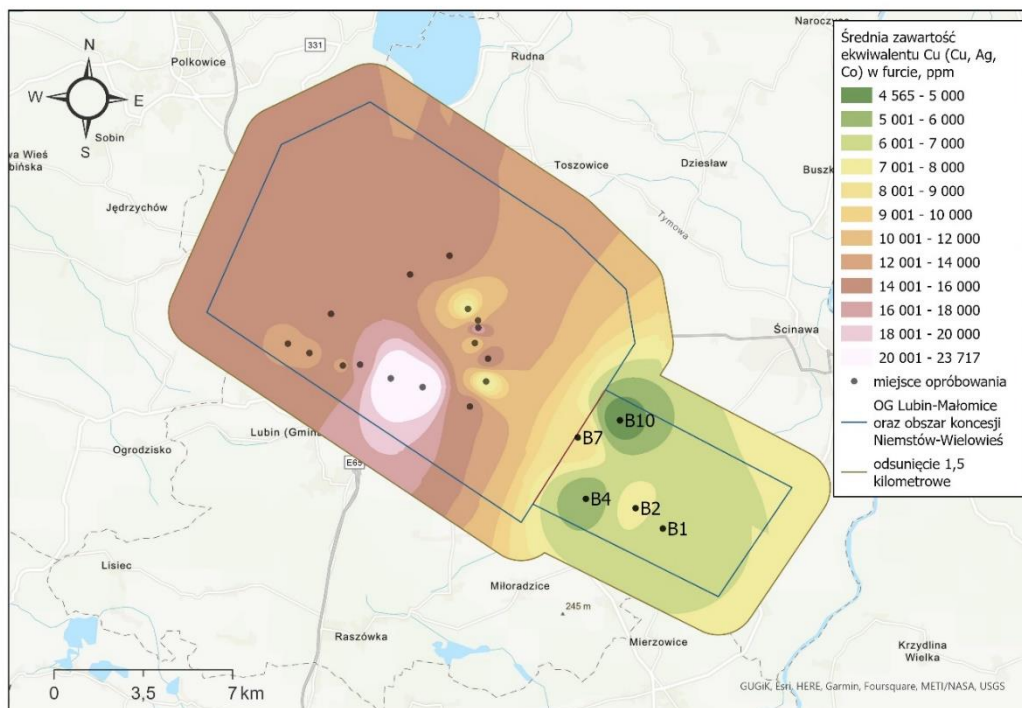
Rys. 3. Przestrzenny rozkład Co w furcie dla obszaru górniczego Lubin-Małowice oraz obszaru Niemstów-Wielowieś (wschód).



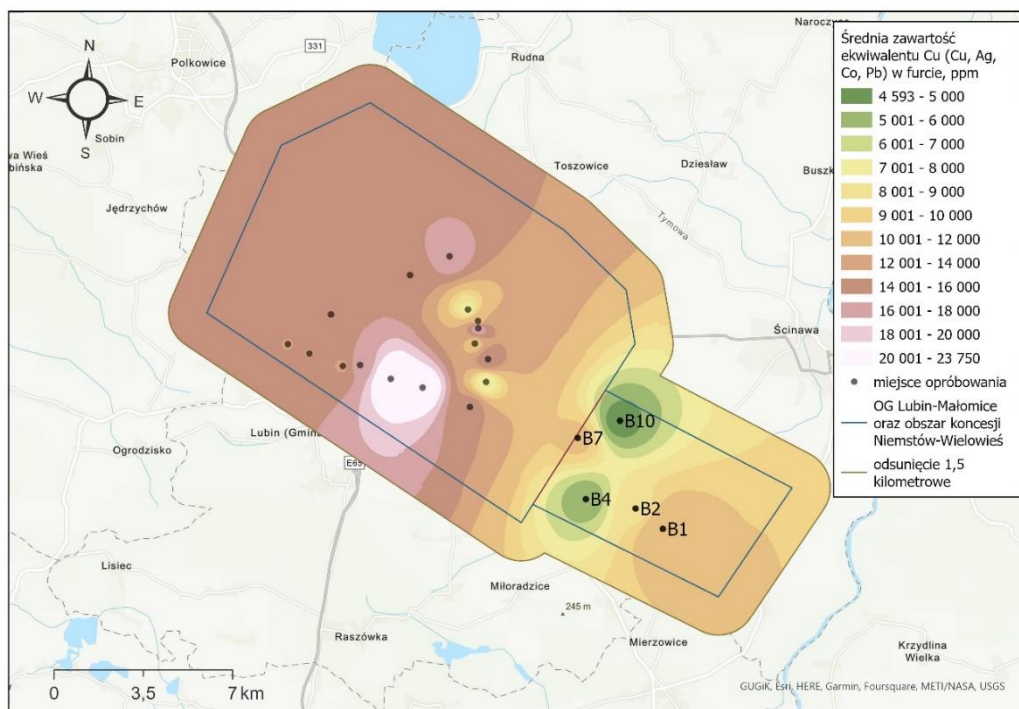
Rys. 4. Przestrzenny rozkład Ag w furcie dla obszaru górniczego Lubin-Małowice oraz obszaru Niemstów-Wielowieś (wschód).



Rys. 5. Przestrzenny rozkład metalu ekwiwalentnego (Cu, Ag) w furcie dla obszaru górniczego Lubin-Małomice oraz obszaru Niemstów-Wielowieś (wschód).



Rys. 6. Przestrzenny rozkład metalu ekwiwalentnego (Cu, Ag, Co) w furcie dla obszaru górniczego Lubin-Małomice oraz obszaru Niemstów-Wielowieś (wschód).



Rys. 7. Przestrzenny rozkład metalu ekwiwalentnego (Cu, Ag, Co, Pb) w furcie dla obszaru górniczego Lubin-Małomice oraz obszaru Niemstów-Wielowieś (wschód).

Załącznik 6. Baza obiektów antropogenicznych Iwiny

Tab. 1. Baza obiektów antropogenicznych w okolicach Iwin i Warty Bolesławieckiej (na podstawie Geobazy Hałdy – uzupełnionej)

Lp	Historia	Litologia	Granulacja	Typ obiektu	Typ kopaliny	Powierzchnia [m <sup>2</sup> ]	Objętość [m <sup>3</sup> ]
1	hałda kopalni rud miedzi "Mühlberg-Grube bei Alzenau" (1938-1944) oraz kopalni rud miedzi "Konrad" (1955-1989)	piaskowce, mułowce, łupki osadowe	gruz do 5 cm, dużo bocz-ków do 20 cm, zwietrzelina	hałda kopalniana	rudy miedzi	14427	73866.36
2	osadnik poflotacyjny rud miedzi kopalni "Konrad" w Iwinach (1953-1971)			osadnik przemysłowy	rudy miedzi	1256514	13031513.34
3	osadnik poflotacyjny rud miedzi kopalni "Konrad" w Iwinach (1967-1968)			osadnik przemysłowy	rudy miedzi	149307	179882.53
4	hałda kopalni rud miedzi "Mittlau-Grube" (1938-1945) oraz kopalni rud miedzi "Konrad" (1951-1989)	gruz do 5 cm, dużo bocz-ków do 20 cm, zwietrzelina	gruz do 5 cm, dużo bocz-ków do 20 cm, zwietrzelina	hałda kopalniana	rudy miedzi	68571	932631.12
5	osadnik poflotacyjny rud miedzi kopalni "Konrad" w Iwinach (1971-1989)			osadnik przemysłowy	rudy miedzi	2022840	14671733.83
6	hałda kopalni rud miedzi i anhydrytu "Liebichau-Grube" (1943-1944) oraz kopalni rud miedzi "Lubichów" (1953-1976)	piaskowce czerwone, zlepieńce, mułowce, zwietrzelina ziemista barwy czerwonej, arkozy	gruz do 5 cm, dużo bocz-ków do 20 cm, zwietrzelina	hałda kopalniana	rudy miedzi	18122	56945.87

## Załącznik 7. Baza obiektów antropogenicznych Krobica-Gierczyn-Przecznica

Tab. 1. Baza obiektów antropogenicznych w okolicach Krobicy, Gierczyna i Przecznic (na podstawie Geobazy Hałdy – uzupełnionej)

Lp	Historia	Litologia	Granulacja	Typ obiektu	Typ kopaliny	Powierzchnia [m <sup>2</sup> ]	Objętość [m <sup>3</sup> ]	Weryfikacja terenowa
1	Hałda sztolni/kopalni (?) rud cyny, kobaltu, miedzi (?)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z porfiroblastycznym biotytem, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm, nieliczne "tabliczki" do 50 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	151.902	94.52	brak
2	Hałda sztolni/kopalni (?) rud cyny, kobaltu, miedzi (?)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z porfiroblastycznym biotytem, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm, nieliczne "tabliczki" do 50 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	114.727	35.47	brak
3	Hałda sztolni/kopalni (?) rud cyny, kobaltu, miedzi (?)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z porfiroblastycznym biotytem, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm, nieliczne "tabliczki" do 50 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	113.483	55.94	brak
4	Hałda sztolni/kopalni (?) rud cyny, kobaltu, miedzi (?)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z porfiroblastycznym biotytem, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm, nieliczne "tabliczki" do 50 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	142.377	87.97	brak
5	Hałda sztolni/kopalni (?) rud cyny, kobaltu, miedzi (?)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z porfiroblastycznym biotytem, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm, nieliczne "tabliczki" do 50 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	203.364	109.19	brak
6	Hałda kopalni rud polimetalicznych	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z porfiroblastycznym biotytem, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm, max. 30 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	195.119	8.22	brak
7	Hałda kopalni rud cyny (1590) i kobaltu (1667-1700 i 1776 r.) "St. Bartholomäus" oraz robót poszukiwawczo-rozpoznawczych za	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 20-30 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	1534.80 1	687.92	brak

	uranem (1939-1944 i po II wojnie świat.)							
8	Hałda kopalni rud cyny i kobaltu	łupki tyszczkowe, łupki tyszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	89.986	33.41	brak
9	Hałda robót poszukiwawczych rud cyny	łupki tyszczkowe, łupki tyszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	155.115	55.61	brak
10	Hałda kopalni odkrywkowej rud cyny (?) "Alter Johannes" i kopalni "Johann Sigmund" (k. XVI w., i około 1640 r.)	łupki tyszczkowe, łupki tyszczkowe z granatami, łupki tyszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	88.221	11.87	brak
11	Hałda kopalni odkrywkowej rud cyny (?) "Alter Johannes" i kopalni "Johann Sigmund" (k. XVI w., i około 1640 r.)	łupki tyszczkowe, łupki tyszczkowe z granatami, łupki tyszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	56.889	16.59	brak
12	Hałda robót poszukiwawczych rud polimetalicznych, a być może poszukiwawczych za uranem (?)	leukognejsy	gleba, gruz, bloczki do 20-30 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	375.493	199.24	PIG-PIB
13	Hałda robót poszukiwawczych rud polimetalicznych, a być może poszukiwawczych za uranem (?)	leukognejsy, leukogranity, leukogranity ze skupieniami biotyту, amfibolity	gleba, gruz, bloczki do 20-30 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	650.632	420.86	PIG-PIB
14	Hałda sztolni/kopalni (?) rud cyny, kobaltu, miedzi (?)	łupki tyszczkowe, łupki tyszczkowe z porfiroblastycznym biotytem, łupki tyszczkowe z budinami kwarcu	gruz, bloczki do 10-20 cm, max. do 50 cm, miejscami gleba	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	694.498	549.88	PIG-PIB
15	Hałda sztolni/kopalni (?) rud cyny, kobaltu, miedzi (?)	łupki tyszczkowe, łupki tyszczkowe z porfiroblastycznym biotytem, łupki tyszczkowe z budinami kwarcu	gruz, bloczki do 10-20 cm, max. do 50 cm, miejscami gleba	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	504.373	514.78	PIG-PIB
16	hałda kopalni rud miedzi	łupki tyszczkowe, łupki tyszczkowe z granatami	gruz, bloczki do 20-30 cm, bloki do 40 cm	hałda kopalniana	rudy miedzi	877.653	376.28	PIG-PIB
17	Hałda kopalni rud cyny i rud miedzi	łupki tyszczkowe, łupki tyszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	1079.4	406.72	PIG-PIB

18	hałda kopalni rud miedzi	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z granatami, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gruz, bloczki do 20-30 cm	hałda kopalniana	rudy miedzi	987.26	537.30	PIG-PIB
19	Hałda sztolni/kopalni (?) rud cyny, kobaltu, miedzi (?)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z porfiroblastycznym biotytem, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	bloczki 20-30 cm - 50%, są większe bloki (ok. 20%), mniejsze i zwietrzelina	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	742.718	312.44	PIG-PIB
20	Hałda sztolni/kopalni (?) rud cyny, kobaltu, miedzi (?)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z porfiroblastycznym biotytem, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm, nieliczne "tabliczki" do 50 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	219.25	153.37	PIG-PIB
21	hałda kopalni rud cyny i rud miedzi	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z granatami	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	365.425	181.28	PIG-PIB
22	Hałda sztolni/kopalni (?) rud cyny, kobaltu, miedzi (?)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z porfiroblastycznym biotytem, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 20-30 cm, nieliczne "tabliczki" do 50 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	253.638	161.26	PIG-PIB
23	Hałda kopalni rud cyny i rud miedzi	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 20-30 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	599.026	189.82	PIG-PIB
24	Hałda kopalni rud cyny i rud miedzi	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10 cm, max. do 30-40 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	1621.76 5	650.46	PIG-PIB
25	Hałda robót poszukiwawczych rud polimetalicznych, a być może poszukiwawczych za uranem (?)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z porfiroblastycznym biotytem	gleba, gruz, bloczki do 20-30 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	262.261	206.99	PIG-PIB
26	Hałda kopalni rud cyny i rud miedzi	łupki łuszczkowe	gleba, gruz, bloczki do 20-30 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	693.818	180.38	PIG-PIB
27	Hałda robót poszukiwawczych rud polimetalicznych, a być może poszukiwawczych za uranem (?)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z porfiroblastycznym biotytem, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	140.816	61.27	PIG-PIB
28	Hałda kopalni rud polimetalicznych	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z porfiroblastycznym biotytem, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm, max. 30 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	332.411	191.66	PIG-PIB
29	Hałda robót poszukiwawczych rud polimetalicznych,	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z porfiroblastycznym biotytem	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	167.605	60.06	PIG-PIB



	a być może poszukiwawczych za uranem (?)							
30	Hałda kopalni rud polimetalicznych	łupki łuszczyste, łupki łuszczyste z porfiroblastycznym biotytem, łupki łuszczyste z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm, max. 30 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	581.023	259.31	PIG-PIB
31	Hałda kopalni rud polimetalicznych	łupki łuszczyste, łupki łuszczyste z granatami, łupki łuszczyste z porfiroblastycznym biotytem, łupki łuszczyste z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm, max. 30 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	299.705	121.25	PIG-PIB
32	Hałda robót poszukiwawczych rud polimetalicznych, a być może poszukiwawczych za uranem (?)	łupki łuszczyste, łupki łuszczyste z porfiroblastycznym biotytem, łupki łuszczyste z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	234.656	90.11	PIG-PIB
33	Hałda sztolni/kopalni (?) rud cyny, kobaltu, miedzi (?)	łupki łuszczyste, łupki łuszczyste z budinami kwarcu, gnejsy cienkolaminowane, leukognejsy	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm, max. do 50 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	191.104	97.85	PIG-PIB
34	Hałda kopalni rud cyny	łupki łuszczyste, łupki łuszczyste z granatami, łupki łuszczyste z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	372.167	192.09	PIG-PIB
35	Hałda kopalni rud cyny	łupki łuszczyste	gleba, gruz, bloczki do 30-40 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	319.174	124.14	PIG-PIB
36	hałda kopalni rud miedzi (?) "Kupfer Zache" (1616-1618, 1659-1665) i kopalni rud cyny "Gierczyn" (1952-1957)	gnejsy cienkolaminowane drobnooczkowe, łupki łuszczyste, kwarc żyłowy	gruz 3-5 cm, bloczki 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	814.284	601.90	PIG-PIB
37	Hałda robót poszukiwawczych rud polimetalicznych, a być może poszukiwawczych za uranem (?)	łupki łuszczyste, łupki łuszczyste z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 40 cm	hałda kopalniana	rudy polimetaliczne	309.918	243.59	PIG-PIB
38	Hałda kopalni rud cyny	łupki łuszczyste	gruz, bloczki do 20-30 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	1481.29	673.62	PIG-PIB
39	Hałda robót poszukiwawczych rud polimetalicznych, a być może poszukiwawczych za uranem (?)	łupki łuszczyste, łupki łuszczyste z budinami kwarcu, gnejsy cienkolaminowane drobnooczkowe	gleba, gruz, bloczki do 40 cm	hałda kopalniana	rudy uranu	338.971	120.07	PIG-PIB

40	Hałda kopalni rud cyny (1590) i kobaltu (1667-1700 i 1776 r.) "St. Bartholomäus" oraz robót poszukiwawczo-rozpoznawczych za uranem (1939-1944 i po II wojnie świat.)	łupki łuszczyste, łupki łuszczyste z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 20-30 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	828.788	692.76	PIG-PIB
41	Hałda kopalni rud cyny i kobaltu	łupki łuszczyste, łupki łuszczyste z granatami, łupki łuszczyste z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	464.662	432.76	PIG-PIB
42	Hałda kopalni rud cyny i kobaltu	łupki łuszczyste, łupki łuszczyste z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	164.898	109.88	PIG-PIB
43	hałda kopalni rud miedzi (?) "Kupfer Zache" (1616-1618, 1659-1665) i kopalni rud cyny "Gierczyn" (1952-1957)	łupki łuszczyste, łupki łuszczyste z budinami kwarcu, łupki chlorytowo-kwarcowo-serycytowe z granatami	zwir, gruz 3-5 cm, bloczki 10-30 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	1793.50 8	2435.18	PIG-PIB
44	Hałda kopalni rud cyny	łupki łuszczyste, łupki łuszczyste z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	424.722	156.12	PIG-PIB
45	Hałda kopalni rud kobaltu „Friedrich Wilhelm" (1793-1804)	łupki łuszczyste, łupki łuszczyste z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm, max. 30 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	171.601	71.30	PIG-PIB
46	Hałda kopalni rud cyny i kobaltu "Görlitzer Zache" (około 1612 r.) i kopalni cyny "Morgenröthe" (1772-1778), być może poszukiwać za uranem (po II wojnie świat.)	łupki łuszczyste, łupki łuszczyste z granatami, łupki łuszczyste z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	461.783	240.42	PIG-PIB
47	Hałda kopalni rud cyny (1590) i kobaltu (1778-1784) "Drei Brüder" oraz robót poszukiwawczo-rozpoznawczych za uranem (1939-1944 i po II wojnie świat.)	łupki łuszczyste, łupki łuszczyste z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	374.39	380.05	PIG-PIB

48	Hałda kopalni rud kobaltu "Carl Schacht" (1774-1783) oraz sztolni poszukiwawczej rud cyny (może uranu) (1939-1944 i po II wojnie świat.?)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 20-30 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	155.62	86.18	PIG-PIB
49	Hałda robót poszukiwawczych rud cyny	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	132.135	65.22	PIG-PIB
50	Hałda robót poszukiwawczych rud cyny	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	309.423	182.77	PIG-PIB
51	hałda kopalni rud kobaltu "St. Carl" (1774-1783)	łupki łuszczkowe	zwir, gruz 3-5 cm, bloczki 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	829.52	935.06	PIG-PIB
52	Hałda kopalni "Hans Reichelt" (około 1640 r.)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 40 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	344.136	140.96	PIG-PIB
53	hałda kopalni rud cyny "Reicher Trost" (1680-1816, 1941-1945) i "Gierczyn" (1952-1957)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu, łupki chlorytowo-kwarcowo-serycytowe z granatami, gnejsy	zwir, gruz 3-5 cm, bloczki 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	2066.08 7	1719.61	PIG-PIB
54	Hałda kopalni rud cyny "Hundsrücken" (od 1590 r. Do 1789 z przerwami), robót poszukiwawczo-rozpoznawczych za uranem (1939-1944 i po II wojnie świat.) oraz kopalni "Gierczyn" (1952-1957)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm, nieliczne większe bloki	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	2813.36 4	2265.10	PIG-PIB
55	hałda kopalni rud cyny "Hundsrücken" (XVIII w., 1939-1945) i "Gierczyn" (1952-1957)	łupki łuszczkowe	zwir, gruz 3-5 cm, bloczki 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	3359.13 9	3083.61	PIG-PIB
56	Hałda kopalni odkrywkowej rud cyny (?) (k. XVI w.) i kopalni "Hans Reichelt" (około 1640 r.)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	3040.43 5	1667.46	PIG-PIB
57	Hałda kopalni odkrywkowej rud cyny (?) "Alter	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 20-30 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	2098.05 2	847.55	PIG-PIB

	Johannes" i kopalni "Johanneser Zug" (k. XVI w., i około 1640 r.)							
58	Hałda kopalni odkrywkowej rud cyny (?) "Alter Johannes" i kopalni "Johanneser Zug" (k. XVI w., i około 1640 r.)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	2044.96	1717.49	PIG-PIB
59	Hałda kopalni odkrywkowej rud cyny (?) "Alter Johannes" i kopalni "Johann Sigismund" (k. XVI w., i około 1640 r.)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z granatami, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	288.799	94.06	PIG-PIB
60	Hałda kopalni odkrywkowej rud cyny (?) "Alter Johannes" i kopalni "Johann Sigismund" (k. XVI w., i około 1640 r.)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z granatami, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	116.462	34.22	PIG-PIB
61	Hałda kopalni odkrywkowej rud cyny (?) "Alter Johannes" i kopalni "Johann Sigismund" (k. XVI w., i około 1640 r.)	łupki łuszczkowe, łupki łuszczkowe z granatami, łupki łuszczkowe z budinami kwarcu	gleba, gruz, bloczki do 10-20 cm	hałda kopalniana	rudy cyny i kobaltu	147.439	39.44	PIG-PIB
62	składowisko zakładu przemiału (przerobu) łupków kwarcowo-serycytowych w Krobicy (ok.. 1950 - 1994)	skruszone okruchy skalne, łupki łuszczkowe	piasek, pojedyncze bloczki 5-20 cm	składowisko przemysłowe	kopaliny chemiczne w ogólności	54082.9 88	416996. 82	PIG-PIB
63	hałda sztolni poszukiwawczej rud uranu (tzw. obszar poszukiwań OP-11 Pobiedna) z 1952 r.	gnejsy, łupki chlorytowe, amfibolity	gruz do 5 cm, dużo bloczków do 20 cm, zwietrzelina	hałda kopalniana	rudy uranu	1593.04	1868.17	PIG-PIB
64	hałda szybika poszukiwawczego rud uranu (tzw. obszar poszukiwań OP-11 Pobiedna) z 1954 r.	gnejsy, łupki chlorytowe, amfibolity	gruz do 5 cm, dużo bloczków do 20 cm, zwietrzelina	hałda kopalniana	rudy uranu	711.969	500.18	PIG-PIB

Załącznik 8. Baza obiektów antropogenicznych Szklary

Tab. 1. Baza obiektów antropogenicznych w okolicach Szklar

Lp	Historia	Litologia	Typ obiektu	Typ kopaliny	Powierzchnia [m <sup>2</sup> ]	Objętość [m <sup>3</sup> ]	Weryfikacja terenowa
1	hałda huty rud niklu w Szklarach	żużle hutnicze	hałda żużla	rudy niklu	17436.934	189377.99	tak
2	hałda huty rud niklu w Szklarach	żużle hutnicze	hałda żużla	rudy niklu	23734.401	238599.21	tak
3	hałda huty rud niklu w Szklarach	żużle hutnicze	hałda żużla	rudy niklu	118693.696	1346292.09	tak
4	hałda nadkładu z kopalni w Szklarach	skały nadkładowe i płonne, głównie serpentynit o różnym stopniu zwietrzenia	hałda kopalniana	rudy niklu	108707.163	342869.39	nie
5	hałda nadkładu z kopalni w Szklarach	skały nadkładowe i płonne, głównie serpentynit o różnym stopniu zwietrzenia	hałda kopalniana	rudy niklu	3404.561	8981.43	nie
6	hałda nadkładu z kopalni w Szklarach	skały nadkładowe i płonne, głównie serpentynit o różnym stopniu zwietrzenia	hałda kopalniana	rudy niklu	911.424	1130.89	nie
7	hałda nadkładu z kopalni w Szklarach	skały nadkładowe i płonne, głównie serpentynit o różnym stopniu zwietrzenia	hałda kopalniana	rudy niklu	1876.34	2994	nie
8	hałda nadkładu z kopalni w Szklarach	skały nadkładowe i płonne, głównie serpentynit o różnym stopniu zwietrzenia	hałda kopalniana	rudy niklu	18460.011	39271.34	nie
9	hałda nadkładu z kopalni w Szklarach	skały nadkładowe i płonne, głównie serpentynit o różnym stopniu zwietrzenia	hałda kopalniana	rudy niklu	4604.294	5174.62	nie
10	hałda nadkładu z kopalni w Szklarach	skały nadkładowe i płonne, głównie serpentynit o różnym stopniu zwietrzenia	hałda kopalniana	rudy niklu	214896.005	877287.63	nie

1	hałda nadkładu z kopalni w	skały nadkładowe i płonne, głównie	hałda kopal-	rudy niklu	16836.035	48289.86	nie
1	Szklarach	serpentynit o różnym stopniu zwie-	niana				
		trzenia					
1	hałda nadkładu z kopalni w	skały nadkładowe i płonne, głównie	hałda kopal-	rudy niklu	15703.961	32216.28	nie
2	Szklarach	serpentynit o różnym stopniu zwie-	niana				
		trzenia					
1	hałda nadkładu z kopalni w	skały nadkładowe i płonne, głównie	hałda kopal-	rudy niklu	611.049	420.06	nie
3	Szklarach	serpentynit o różnym stopniu zwie-	niana				
		trzenia					