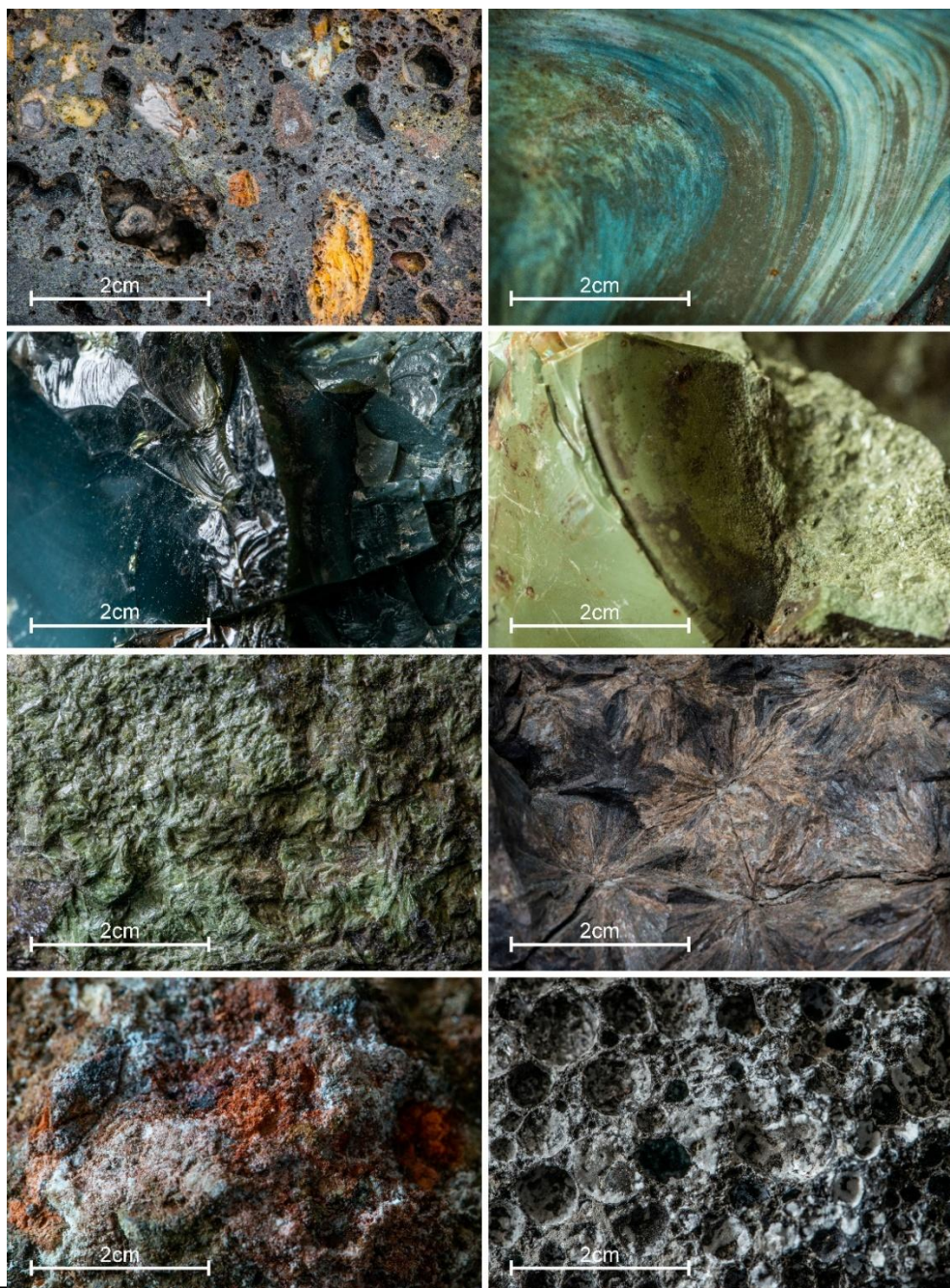




PODPIS ZAUFANY

Rafał
WARCHULSKI
05.09.2026 10:55:12 GMT+0200
Dokument podpisany elektronicznie
podpisem zaufanym

Antropogeniczna petrogeneza: produkty pirometalurgiczne jako archiwum technologii, analog unikatowych środowisk krystalizacji i wyzwanie środowiskowe



*Makrofotografie różnych typów żużla ze składowiska w Rudzie Śląskiej
(Warchulski et al., 2019, zmodyfikowano)*

Rafał Warchulski
Uniwersytet Śląski w Katowicach
2026

*„Proces ewolucyjny zyskał ponadto
szczególne znaczenie geologiczne dzięki
temu, że stworzył nową siłę geologiczną –
myśl naukową społecznej ludzkości.”*

- Władimir I. Wiernadski, *Myśl naukowa
jako zjawisko planetarne*

Autoreferat

1. Imię i nazwisko: Rafał Warchulski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- Doktor nauk o Ziemi – 2017 (praca wyróżniona)
Stopień naukowy doktora nauk o Ziemi w dyscyplinie Geologii nadany uchwałą Rady Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach z dnia 21.11.2017 roku za rozprawę pt. *Studium geochemiczno-mineralogiczne szlak hutniczych Zn-Pb Górnego Śląska*. Promotor: dr hab. Aleksandra Gawęda; recenzenci: prof. dr hab. inż. Marian Niesler i dr hab. Jakub Kierczak.
- Magister geologii - 2012
Dyplom magistra w zakresie geochemii i mineralogii za pracę *Pierwotne i wtórne fazy krystaliczne w odpadach hutniczych z ZGH „Orzeł Biały” w Piekarach Śląskich* wykonaną na Wydziale Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach pod kierunkiem dr hab. Aleksandry Gawędy.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

- 01.12.2022 – obecnie – profesor uczelni – Instytut Nauk o Ziemi, Wydział Nauk Przyrodniczych Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec
- 01.10.2019 – 30.11.2022 – adiunkt – Instytut Nauk o Ziemi, Wydział Nauk Przyrodniczych Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec
- 01.10.2018 – 30.09.2019 – adiunkt – Katedra Geochemii, Mineralogii i Petrografii, Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec
- 01.04.2017 - 31.03.2018 – starszy referent (broker technologii) - Biuro Współpracy z Gospodarką, Pion Zastępcy Kanclerza ds. Rozwoju i Współpracy z Gospodarką, Administracja Ogólnouczelniana w Katowicach, ul. Bankowa 12, 40-007 Katowice

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

4.1. Tytuł dzieła naukowego

Antropogeniczna petrogeneza: produkty pirometalurgiczne jako archiwum technologii, analog unikatowych środowisk krystalizacji i wyzwanie środowiskowe

4.2. Spis prac prezentujących osiągnięcie naukowe

- [A1] Warchulski, R.*, Szczuka, M., & Kupczak, K. (2020). Reconstruction of 16th–17th Century Lead Smelting Processes on the Basis of Slag Properties: A Case Study from Sławków, Poland. *Minerals*, 10(11), 1039. <https://doi.org/10.3390/min10111039>

Impact Factor (2020): 2,644; punkty MNiSW (2019/2020): 100 pkt; liczba cytowań: 20 (Google Scholar), 18 (WoS), 17 (Scopus)

Mój wkład obejmował: opracowanie koncepcji artykułu i wymaganych prac badawczych, współrealizację prac terenowych, przygotowanie prób do analiz, współrealizację prac eksperymentalnych, współrealizację prac laboratoryjnych i interpretacji wyników analiz, przygotowanie większości figur (1, 2, 4, 5, 6, 7) i tabel (1, 2, 3) oraz napisanie pierwszej wersji manuskryptu z wyłączeniem opisu metodyki, makroskopowego opisu próbek oraz precyzyjnych detali konstrukcji pieca, komunikację z wydawcą i korektę artykułu jako autor korespondencyjny.

- [A2] Warchulski, R., Kałaska, M.*, Rizzuto, B. C., Sierpień, P., Pisarek, M., Kaproń, G., Marciniak-Maliszewska, B., Jokubauskas, P., Kotowski, J., Środek, D., Przadka-Giersz, P., & Giersz, M. (2025). In-depth study of a speiss/matte sample from Castillo de Huarmey, North Coast of Peru, and its implications for the pre-Columbian production of arsenic bronze in the Central Andes. *Archaeometry*, 67, 112–131. <https://doi.org/10.1111/arcm.13000>

Impact Factor (2024): 1,5; punkty MNiSW (2024): 200 pkt; liczba cytowań: 2 (Google Scholar), 2 (WoS), 2 (Scopus)

Mój wkład obejmował: udział w opracowaniu koncepcji artykułu i wymaganych prac badawczych, współrealizację analiz SEM-EDS i interpretację całości wyników mineralogiczno-geochemicznych, przygotowanie tabeli 1 oraz napisanie pierwszej wersji manuskryptu w zakresie związanym z wynikami analiz mineralogicznych i ich dyskusji w kontekście petrogenезы badanego materiału, oraz udział w korekcie artykułu.

- **[A3] Warchulski, R.***, Kupczak, K., Gawęda, A., Sitko, R. (2022). Complete reconstruction of the process and conditions during gold smelting in the 15th–17th centuries in Złoty Stok based on metallurgical slags. *Archaeometry*, 64(4), 916–934. <https://doi.org/10.1111/arcm.12752>

Impact Factor (2022): 1,6; punkty MNiSW (2021): 200 pkt; liczba cytowań: 8 (Google Scholar), 8 (WoS), 8 (Scopus)

Mój wkład obejmował: opracowanie koncepcji artykułu i wymaganych prac badawczych, współrealizację prac terenowych, studium literaturowe, współrealizację prac laboratoryjnych, analizę i interpretację wyników, większościowe przygotowanie figur (1, 2) i tabel (1, 2) oraz napisanie pierwszej wersji manuskryptu, komunikację z wydawcą i korektę artykułu jako autor korespondencyjny.

- **[A4] Warchulski, R.***, Gawęda, A., Kupczak, K., Banasik, K., & Krzykawski, T. (2020). Slags from Ruda Śląska, Poland as a large-scale laboratory for the crystallization of rare natural rocks: melilitolites and paralavas. *Lithos*, 372–373, 105666. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105666>

Impact Factor (2020): 4,004; punkty MNiSW (2019/2020): 140 pkt; liczba cytowań: 9 (Google Scholar), 6 (WoS), 7 (Scopus)

Mój wkład obejmował: opracowanie koncepcji artykułu i wymaganych prac badawczych, realizację prac terenowych, studium literaturowe, przygotowanie prób do analiz, realizację analiz SEM-EDS, uczestnictwo w analizach XRD i spektroskopii Ramana, interpretację całości wyników mineralogiczno-geochemicznych, przygotowanie wszystkich figur i tabel oraz napisanie całości manuskryptu, komunikację z wydawcą i korektę artykułu jako autor korespondencyjny.

- **[A5] Kupczak, K., Warchulski, R.***, Dulski, M., & Środek, D. (2020). Chemical and Phase Reactions on the Contact between Refractory Materials and Slags, a Case from the 19th Century Zn-Pb Smelter in Ruda Śląska, Poland. *Minerals*, 10(11), 1006. <https://doi.org/10.3390/min10111006>

Impact Factor (2020): 2,644; punkty MNiSW (2019/2020): 100 pkt; liczba cytowań: 11 (Google Scholar), 9 (WoS), 10 (Scopus)

Mój wkład obejmował: opracowanie koncepcji artykułu i wymaganych prac badawczych, współrealizację prac terenowych, współrealizację analiz EPMA i XRD i interpretacji wyników analiz, mniejszościowy udział w przygotowaniu tekstu publikacji, figur (2, 4) i tabel (2, 5), nadzór nad całością opracowania, komunikację z wydawcą i korektę artykułu jako autor korespondencyjny.

- **[A6] Warchulski, R.***, Mendecki, M., Gawęda, A., Sołtysiak, M., & Gadowski, M. (2019). Rainwater-induced migration of potentially toxic elements from a Zn-Pb slag dump in Ruda Śląska in light of mineralogical, geochemical and geophysical investigations. *Applied Geochemistry*, 109, 104396. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104396>

Impact Factor (2019): 2,903; Punkty MNiSW (2019): 100 pkt; liczba cytowań: 31 (Google Scholar), 22 (WoS), 24 (Scopus)

Mój wkład obejmował: opracowanie koncepcji artykułu i wymaganych prac badawczych, współrealizację prac terenowych, studium literaturowe, przygotowanie prób do analiz, realizację analiz SEM-EDS, XRD, uczestnictwo w analizach geofizycznych, interpretację całości wyników mineralogiczno-geochemicznych i ich integrację z wynikami geofizycznymi, przygotowanie figur (1-7) i tabel (1-4) oraz napisanie pierwszej wersji manuskryptu (z wyłączeniem aspektów geofizycznych), komunikację z wydawcą i korektę artykułu jako autor korespondencyjny.

*- autor korespondencyjny

Publikacje A1, A3 oraz A5 stanowią część mojego osiągnięcia habilitacyjnego, jednakże ze względu na ich multidyscyplinarny charakter i obszerność materiału, weszły one również w skład rozprawy doktorskiej mojego ówczesnego doktoranta, dr. inż. Krzysztofa Kupczaka zatytułowanej „Rekonstrukcja historycznych (V wiek p.n.e. – XIX wiek n.e.) metod wytopu metali na terenie Polski”. Pragnę podkreślić, że publikacje te były chronologicznie pierwszymi w przewodzie badawczym dr. inż. Kupczaka. W ramach nakreślonej przeze mnie koncepcji badań miał on możliwość rozwijania swojego warsztatu analitycznego. Warsztat ten realizował następnie z powodzeniem w kolejnych czterech publikacjach, które stanowiły główny trzon jego rozprawy i bazowały już na jego autorskich koncepcjach.

W celu zachowania standardów przejrzystości ewaluacyjnej pragnę szczegółowo nakreślić zakres zadań dr. inż. Kupczaka, które stały się podstawą części jego dysertacji:

W publikacji A1 wkład dr. inż. Kupczaka obejmował analizy XRD i ich interpretację oraz opis i rekonstrukcję pieca hutniczego w programie AutoCAD na bazie danych z opracowania oraz informacji literaturowych.

W publikacji A3 wkład dr. inż. Kupczaka obejmował obok prac terenowych interpretację danych EPMA oraz dyskusję w zakresie konstrukcji pieca i procesu hutniczego wraz z figurą 3.

W publikacji A5 wkład dr. inż. Kupczaka obejmował współrealizację i interpretację wyników analiz (EPMA, XRD, ICP-MS, XRF), przygotowanie części figur i tabel (z wyłączeniem tych stanowiących mój bezpośredni wkład) oraz przygotowanie pierwszej wersji większości tekstu manuskryptu, pod moim ścisłym merytorycznym nadzorem.

4.3. Omówienie celu naukowego wyżej wymienionych prac i osiągniętych wyników

4.3.1. Wprowadzenie do tematu badań

W dobie antropocenu zaciera się ostra dotąd granica między tym, co powstało naturalnie, a procesami czysto technologicznymi. Decyzja IUGS-ICS (International Union of Geological Sciences - International Commission on Stratigraphy; <https://www.iugs.org/>) z marca 2024 roku, odrzucająca formalizację antropocenu jako nowej epoki geologicznej, przy równoczesnym istnieniu silnego nurtu literatury ujmującej antropocen jako trwające

wydarzenie geologiczne (np. Gibbard et al., 2022), pokazuje, jak dużym wyzwaniem dla współczesnych nauk o Ziemi pozostaje klasyfikacja wpływu człowieka na planetę. Problem ten dotyczy nawet klasycznej nomenklatury mineralogicznej. Zgodnie z wytycznymi Międzynarodowej Asocjacji Mineralogicznej (IMA), minerał musi być substancją powstałą w wyniku naturalnych procesów geologicznych. Tworzy to jednak szarą strefę pojęciową. Granica „naturalności” staje się wysoce nieostra w sytuacji, gdy np. wtórne fazy krystaliczne wytrącają się naturalnie, ale na podłożu sztucznego zwałowiska i pod wpływem czynników, które mogą, ale nie muszą być antropogeniczne np. zapłonów. Choć w rygorystycznym ujęciu taksonomicznym pierwotne produkty hutnicze to jedynie syntetyczne fazy krystaliczne, w światowej praktyce badawczej i literaturze przedmiotu powszechnie i skutecznie aplikuje się do nich aparat pojęciowy mineralogii oraz petrologii. Dlatego też, badacze coraz częściej dają wyraz konieczności uznania działalności ludzkiej jako procesu geologicznego. Przykładowo w publikacji *On the mineralogy of the “Anthropocene Epoch”* medalisty IMA dr Roberta Hazena (Hazen et al., 2017) dowodzi on, że 208 (spośród ponad 6000) gatunków minerałów zatwierdzonych przez IMA, występuje głównie lub wyłącznie w wyniku procesów antropogenicznych, a sama baza struktur nieorganicznych związków krystalicznych ICSD (Inorganic Crystal Structure Database) zawierała 180 000 wpisów (Hazen et al., 2017).

Moje dzieło habilitacyjne stanowi otwarty głos w tej właśnie dyskusji. Prezentowany cykl publikacji opiera się na tezie, że procesy pirometalurgiczne to odmiana procesów skałotwórczych, które można określać mianem antropogenicznej petrogenety. Zaproponowanie tej koncepcji ma na celu wykazanie, że procesy technologiczne i naturalne przenikają się dziś tak dalece, że do zrozumienia ewolucji współczesnego środowiska konieczne jest poszerzenie klasycznych, geologicznych ram interpretacyjnych.

Same produkty pirometalurgii, będące efektem ekstrakcji metali z rud, wykazują znaczący, a wciąż marginalizowany przez nauki o Ziemi potencjał badawczy. Choć utarło się postrzegać je jako zwykły odpad przemysłowy bądź jedynie poboczny ślad dawnej produkcji, w rzeczywistości stanowią one często klucz do rozszyfrowania technologicznej ewolucji cywilizacji. Produkty pirometalurgii pełnią funkcję chemicznych archiwów, w których trwale zapisano parametry historycznego procesu: temperaturę, lotność tlenu, lepkość stopu czy pierwotny skład wsadu.

Ponadto ich unikalny skład chemiczny, zazwyczaj zubożony w SiO_2 , lecz silnie wzbogacony w Ca, Fe i szerokie spektrum innych metali oraz metaloidów, czyni z nich idealny odpowiednik rzadkich w przyrodzie skał wulkanicznych i pirometamorficznych (takich jak paralawy czy melilitolity). Otwiera to drogę do modelowania zjawisk petrogenetycznych, które w naturze zachodzą nadzwyczaj rzadko lub są bardzo trudne do bezpośredniej obserwacji.

Szczególnie istotnym aspektem badanych produktów pozostaje ich aspekt środowiskowy. Jako rezerwuar pierwiastków potencjalnie toksycznych (PTEs – Potentially Toxic Elements), materiały te ulegają w strefie hipergenicznej intensywnym procesom wietrzenia. Reakcje te można porównać do diagenety czy niskotemperaturowej transformacji skał wulkanicznych, zachodzą one jednak przy udziale rzadkich faz mineralnych. Gruntowne poznanie stabilności fazowej tych materiałów, mechanizmów uwalniania z nich metali i metaloidów oraz interakcji z otoczeniem (np. z glebą, wodami czy materiałami ogniotrwałymi dawnych pieców) jest niezbędne do rzetelnej oceny ryzyka ekologicznego oraz planowania skutecznych strategii remediacji.



Rys.1 – uproszczony schemat procesowy dla realizacji założonych celów

Przedmiot badań W przedłożonym cyklu badawczym zintegrowałem omówione perspektywy: archeometryczną, petrologiczną i sozologiczną, opierając się na spójnej bazie metodologicznej. Analiza obiektów pochodzących z drastycznie odmiennych kontekstów - prekolumbijskiego Peru (Kultura Wari), nowożytnego Złotego Stoku (metalurgia złota), Sławkowa (metalurgia ołowiu) czy XIX-wiecznej Rudy Śląskiej (metalurgia cynku), dowiodła uniwersalności zjawisk fizykochemicznych determinujących powstawanie i transformacje fazowe w systemach antropogenicznych. Wprowadzenie koncepcji antropogenicznej petrogenety ułatwia zarazem systematyczne badanie tych materiałów z wykorzystaniem aparatu pojęciowego nowoczesnej mineralogii i petrologii.

Metodyka

Cel nadrzędny

Cele podrzędne

4.3.2. Cele badawcze

Nadrzędnym celem zaprezentowanego cyklu prac naukowych (Rys.1) było odtworzenie kompletnej ścieżki petrogenetycznej, jakiej podlegają produkty procesów pirometalurgicznych. Ponadto unikatowy kontekst poszczególnych produktów pozwolił na określenie i zrealizowanie celów podrzędnych, często o znaczeniu szerszym niż to związane tylko z petrogenetą antropogeniczną. Założenie to udało się zrealizować dzięki analizie trzech komplementarnych etapów:

1. Etap anateksis – produkty procesów pirometalurgicznych jako archiwum dawnych technologii [A1, A2, A3].
2. Etap krystalizacji – produkty procesów pirometalurgicznych jako analog unikatowych środowisk krystalizacji [A4, A5].
3. Etap hipergeniczny – produkty procesów pirometalurgicznych jako wyzwanie środowiskowe [A6].

Zważywszy na kontekst archeologiczny, prace badawcze dotyczące etapu anateksis zorientowałem na inżynierię wsteczną. Nadrzędny cel tego etapu obejmował wyznaczenie temperatur likwidusu i solidusu, lepkości formującego się stopu, lotności tlenu, a także wyjściowego składu chemicznego wsadu i stosowanych topników. Zadanie to zrealizowałem dla obiektów dotąd bardzo słabo rozpoznanych w światowej literaturze archeometrycznej do których zaliczyć można metalurgię andyjskiego Środkowego Horyzontu oraz historyczne,

polskie ośrodki hutnicze w Złotym Stoku i Sławkowie. Tym samym pozwoliło to na realizację celu podrzędnego jakim była skuteczna rekonstrukcja historycznych procesów technologicznych.

Moje badania w ramach etapu krystalizacji koncentrowały się na możliwości wykorzystania żużli jako naturalnego laboratorium. Pozwala ono precyzyjnie śledzić zjawiska krystalizacji zachodzące w układach silnie nierównowagowych. Nadrzędny cel polegał na zbadaniu kinetyki tych procesów w warunkach, których interpretacje oparte jedynie o symulowanie w ramach standardowych eksperymentów natrafia na bariery w postaci różnicy skali i specyfiki składu chemicznego. W toku prac skupiłem się na analizie wpływu ekstremalnych gradientów termicznych oraz subtelnych fluktuacji w składzie chemicznym stopu na ostateczną morfologię kryształów (m.in. powstawanie form szkieletowych w opozycji do euhedralnych). Badałem też zjawisko segregacji pierwiastków śladowych oraz proces kształtowania się asocjacji mineralnych charakterystycznych dla rzadkich skał naturalnych takich jak melilitolity i paralawy. Ważnym kierunkiem badawczym była ponadto ocena interakcji zachodzących pomiędzy agresywnymi stopami metalurgicznymi a materiałami ogniotrwałymi dawnych pieców. Reakcje te prowadzą bezpośrednio do powstawania unikatowych faz wzbogaconych w PTE, co generuje dodatkowe zagrożenie dla środowiska naturalnego.

Przechodząc do etapu hipergenicznego, nadrzędny cel badawczy obejmował identyfikację konkretnych mechanizmów mobilizacji, a następnie wtórnej immobilizacji pierwiastków potencjalnie toksycznych. Procesy te analizowałem w systemie obejmującym żużel, wodę i glebę. Kwestią o fundamentalnym znaczeniu było wskazanie, które z faz pierwotnych (szkliwo, siarczki czy krzemiany) ulegają najłatwiejszemu rozpadowi i jakie fazy wtórne (węglany, siarczany, tlenki) przejmują po nich funkcję geochemicznych pułapek. Podrzędnie, badanie to objęło wykorzystanie nowatorskiej metodyki badawczej, łączącej mikroskalowe analizy mineralogiczne z wielkoskalowym mapowaniem geofizycznym (metody elektromagnetyczne), która pozwoliła mi na przestrzenne śledzenie migracji zanieczyszczeń w obrębie składowiska i jego otoczenia.

4.3.3. Etap anateksis - produkty procesów pirometalurgicznych jako archiwum dawnych technologii [A1-3]

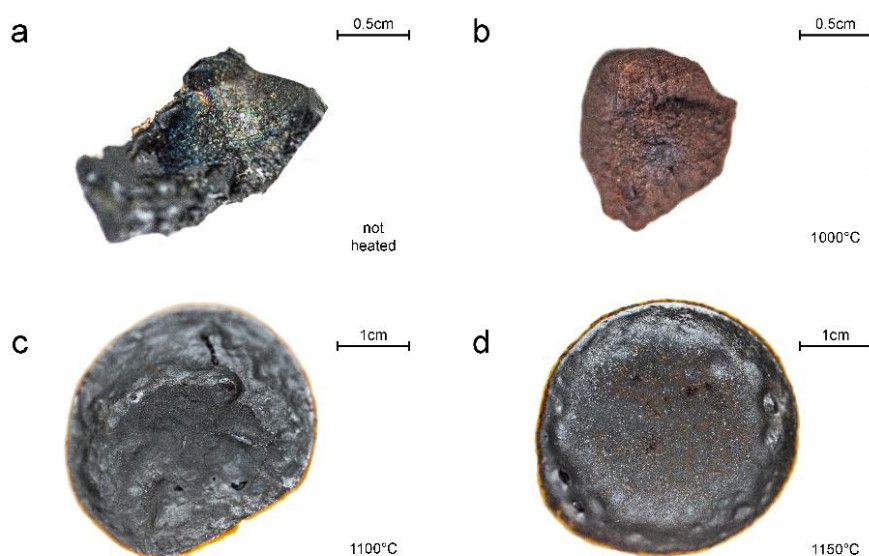
Proces wytopu ołowiu w Sławkowie: studium kontrolowanej anateksis oraz rekonstrukcja pieca hutniczego [A1]

Moim celem w tym opracowaniu była weryfikacja warunków podczas wytopu (kontrolowanej anateksis) rudy ołowiu w Sławkowie. Praca stanowiła podwalinę pod dalszy rozwój realizowanych przez zespół (moja osoba, dr inż. Krzysztof Kupeczak, oraz prof. dr hab. Aleksandra Gawęda) opracowań skupiających się na parametrach podczas procesów hutniczych. Jednocześnie przedstawia ona dane z zakresu efektywnego wykorzystania topników, niestabilności warunków redoks czy erozji materiału pieca, co umożliwiło jego pełną rekonstrukcję i wypełnienie blisko 300-letniej luki w badaniach nad pozostałościami procesów hutnictwa ołowiu w niedostatecznie zbadanym okresie wczesnonowożytnym (1500–1800 r.).

Analiza zebranego materiału pozwoliła na wyodrębnienie trzech głównych typów żużli, różniących się wyglądem makroskopowym i strukturą.

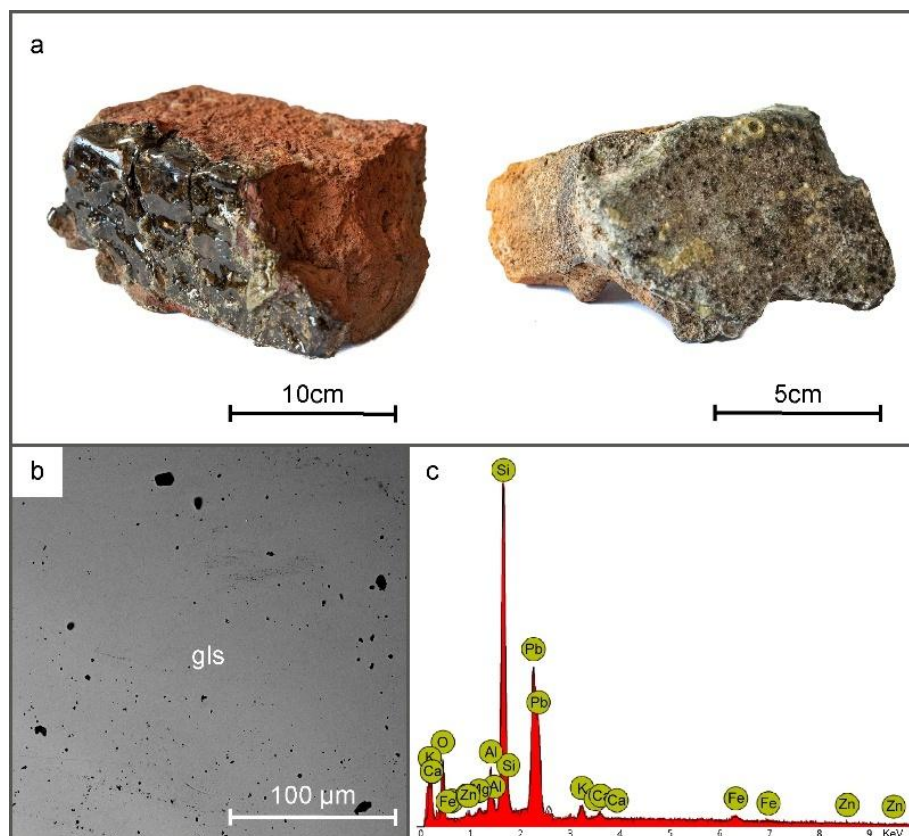
- Żużel szklisty: Najczęściej występujący typ. Miał czarno-szarą barwę i charakteryzował się widocznymi strukturami płynięcia. Często zawierał wtopione ziarna piasku oraz kryształy rozproszone w szklistej masie.
- Żużel krystaliczny: Rzadszy typ, o szarej barwie i porowatej strukturze. W jego przekroju widoczne były kryształy oraz częściowo przetopione ziarna, co świadczy o innych warunkach procesu wytopu.
- Żużel zwietrzały: Rzadko spotykany, porowaty, o barwie od żółtej do brunatnej, a jego powierzchnię pokrywały naloty minerałów wtórnych, powstałych w wyniku długotrwałego oddziaływania warunków atmosferycznych.

Dla anateksis w piecu hutniczym kluczowy był typ użytej rudy oraz topniki stosowane w procesie. W publikacji wykazuję, że huta w Sławkowie bazowała na lokalnych złożach rud siarczkowych związanych z dolomitem kruszconośnym, w skład których wchodziły głównie galena (PbS), sfaleryt (ZnS) i pirit (FeS₂). O wykorzystaniu rud siarczkowych świadczą dwa fakty: źródła historyczne wspominają o istnieniu w sąsiedztwie huty pieców prażalniczych (służących do utleniania siarczków przed wytopem), a analiza chemiczna żużli wykazała bardzo niski poziom siarki, typowy dla materiałów poddanych celowemu usuwaniu tego pierwiastka. W publikacji udowadniam, że aby proces topienia mógł zaistnieć konieczne było dodanie składnika pozwalającego na uzyskanie korzystnego eutektyku, a tym samym obniżenie likwidusu mieszaniny i ta funkcja była realizowana przez dodatek łatwo dostępnego piasku kwarcowego. W tym kontekście wykonane przeze mnie eksperymenty laboratoryjne (Rys.2) wykazały wyjątkową kontrolę hutników nad procesem topnienia – uzyskana przez nich mieszanina cechowała się temperaturą likwidusu na poziomie zaledwie 1150°C a solidusu 1000°C co świadczy o wysokiej ekonomice procesu.

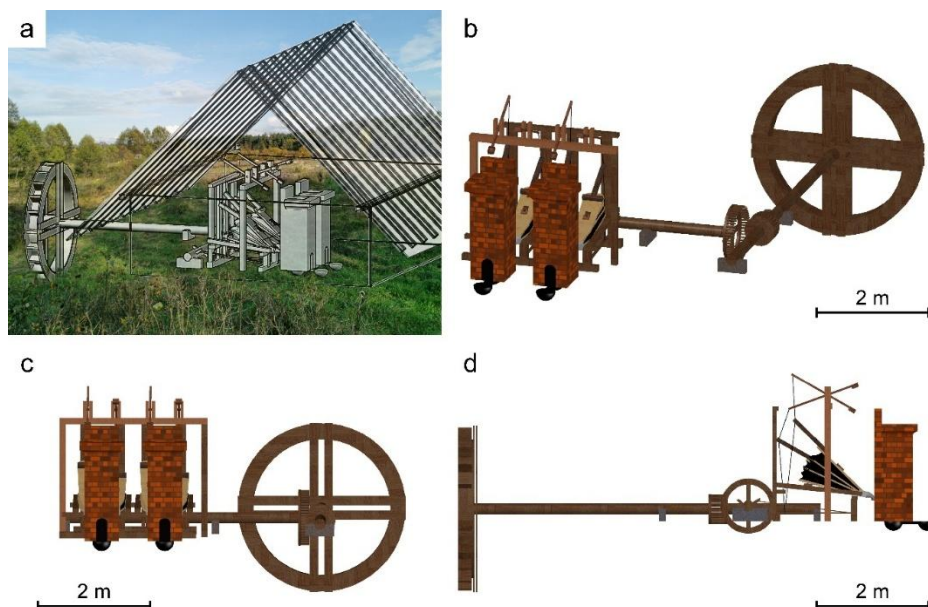


Rys.2 – makrofotografie szklistego żużla ze Sławkowa po eksperymentalnym topieniu w różnych temperaturach (Warchulski et al., 2020a)

Oprócz żużli na stanowisku zebrano również próbki cegieł (Rys.3). Co kluczowe, zawierały one szkliste pokrywy i oznaki erozji przez stop. Analiza chemiczna pokrywającego je szkliwa potwierdziła jego skład zgodny ze składem żużla, co jednoznacznie dowodzi, że cegły te pochodziły z konstrukcji pieca hutniczego. Pozwoliło to odpowiedzieć na zasadnicze pytanie o poziom zaawansowania procesu hutniczego w Sławkowie – czy wykorzystywane były proste paleniska z gliny czy konstrukcje ceglane, murowane. Uzyskane dane w połączeniu z opisami historycznymi (Agricola, 2000; Witkowski i Krajniewski, 2013) umożliwiły dr. inż. Kupczakowi pełne odtworzenie konstrukcji pieca hutniczego (Rys.4). Piece w Sławkowie były konstrukcjami szybowymi, murowanymi z cegły, z powietrzem dostarczonym dmuchawami i procesem wytopu o charakterze ciągłym. Piec wypełniano warstwami węgla drzewnego i uprażonej rudy. W wysokiej temperaturze wytapiał się metaliczny ołów oraz żużel, które spływały na dno pieca do specjalnego odstojnika. Tam, dzięki znacznej różnicy gęstości, cięższy ołów gromadził się na dnie, a lżejszy żużel unosił się na jego powierzchni, skąd był na bieżąco usuwany. Wykorzystanie dmuchaw w konstrukcji pieca wyjaśnia stwierdzoną na bazie analiz składu fazowego żużla (współwystępowanie wüstytu, hematytu i spinelu) zróżnicowaną lotność tlenu od $-12 \log f \text{ O}_2$ dla bufora WM do $-5,5 \log f \text{ O}_2$ dla MH przy temperaturze 1150°C . Co do zasady w piecu panowały warunki redukcyjne niezbędne dla uzyskania metalicznego Pb ale lokalnie w sąsiedztwie dmuchaw lotność tlenu była wyższa, ograniczając redukcję Pb i skutkując jego koncentracją w żużlu. Aby w pełni ocenić efektywność procesu, wyrażoną jako łatwość dyferencjacji grawitacyjnej metalicznego ołowiu od stopu krzemianowego, przeprowadziłem modelowanie lepkości. Jednocześnie odszedłem od ograniczenia się do powszechnie stosowanej metody zaproponowanej dla żużli przez Bachmanna (1982) która bazuje na prostym stosunku składników depolimeryzujących do polimeryzujących. Metoda ta nie uwzględnia kluczowego czynnika wpływającego na lepkość jakim jest temperatura, a uzyskany indeks lepkości (v.i. – viscosity index) jest wielkością nieporównywalną. Z tego względu wykorzystałem model zaprojektowany przez Giordano et al., (2006) dla skał naturalnych ale w spektrum których mieściły się badane żużle. Uzyskana dla temperatury 1150°C wartość $\log \eta = 1,34$ Pa s wskazywała na wyjątkowo niską lepkość stopu żużlowego, a więc efektywną separację gęstościową stopów. Uzyskanie tak niskich wartości lepkości oraz likwidusu stopu wskazuje na dobre zrozumienie przez hutników w Sławkowie czynników kontrolujących anateksis i różnicowanie się tych antropogenicznych stopów.



Rys.3 - (a) makroskopowe zdjęcia cegieł pokrytych szklivem, (b) obraz BSE szkła pokrywającego cegły, (c) widmo EDS szkła pokrywającego cegłę (Warchulski et al., 2020a). Skróót: gls — szkło.



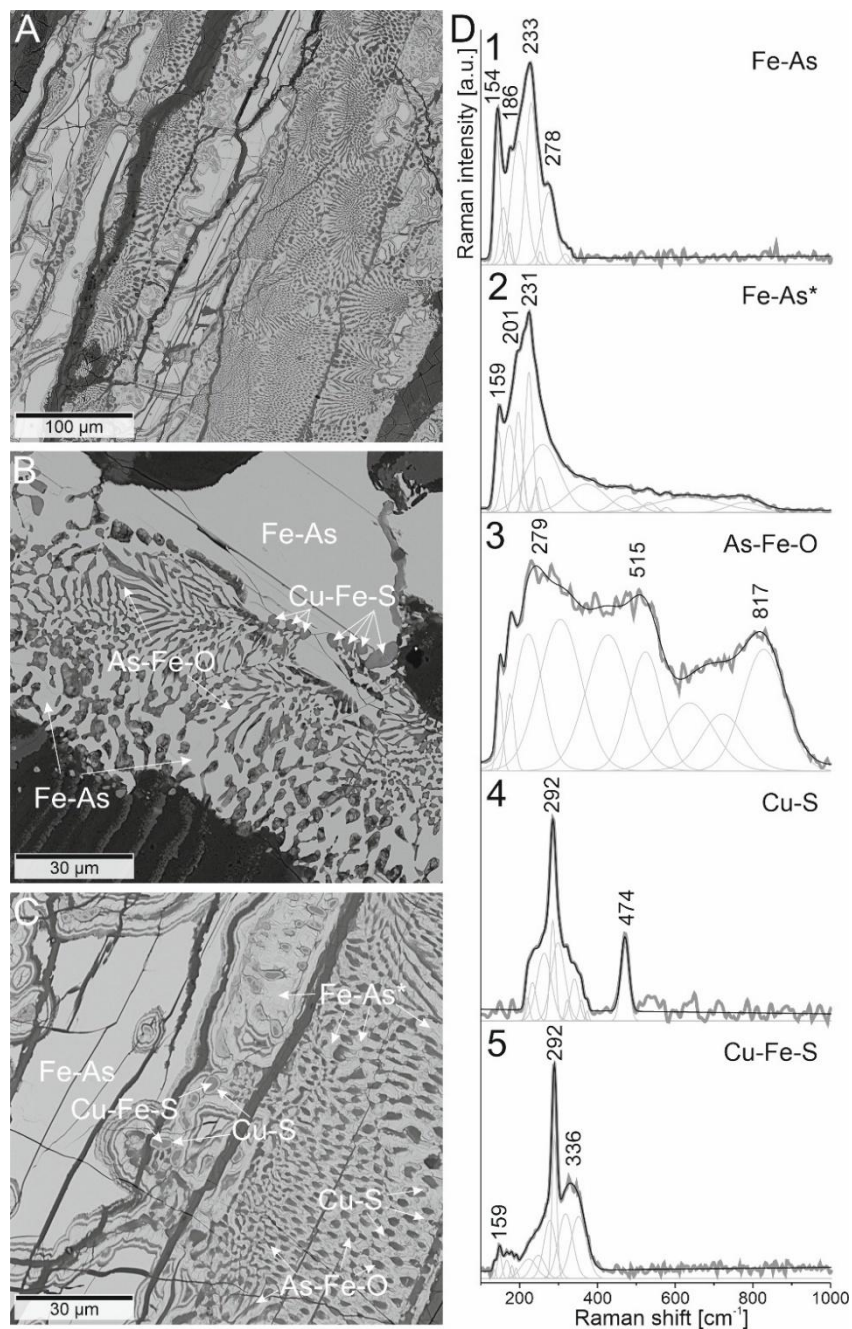
Rys.4 - (a) rekonstrukcja huty w jej pierwotnej lokalizacji w Sławkowie; (b–d) projekty pieca w Sławkowie z różnych perspektyw (Warchulski et al., 2020a).

Speiss/matte z Castillo de Huarmey – studium niemieszalności stopów i wgląd w kulturę Wari [A2]

Metalurgia kultury Wari (ok. 650–1050 n.e.) od dawna pozostaje w cieniu lepiej zbadanych tradycji rzemieślniczych kultur np. Sicán (Killick & Hayashida, 2022; Shimada & Craig, 2013; Shugar et al., 2014), stanowiąc istotną lukę w naszym rozumieniu prekolumbijskich technologii andyjskich. Nowe odkrycia na stanowisku Castillo de Huarmey (Giersz, 2014, 2017; Prządka-Giersz, 2019) na północnym wybrzeżu Peru stworzyły możliwość wypełnienia tej luki. Kluczowym znaleziskiem, które stało się przedmiotem analizy opisanej w publikacji, jest fragment półproduktu metalurgicznego (określanego jako *speiss/matte*), odkryty w kompleksie grobowym nazwanym „Grobowcem Metalurga”. Castillo de Huarmey było ważnym ośrodkiem administracyjnym i ceremonialnym Wari, a znalezisko to jest wyjątkowe na skalę globalną. Jego szczegółowa analiza stanowi bowiem nie tylko pierwsze tego typu badanie materiału z bezpiecznego kontekstu kultury Wari, ale także pierwszą w historii szczegółową analizę naukową archeologicznej próbki typu *speiss/matte* z całego regionu andyjskiego. Wprowadza to dane do dyskusji, która dotychczas opierała się głównie na hipotezach.

Analizowana próbka posiadała dwoistą budowę, składającą się z zewnętrznej, silnie zwietrzalej warstwy, bogatej w minerały wtórne, oraz wewnętrznego, niezmiennego rdzenia, w którym zachowały się pierwotne fazy powstałe w trakcie procesu metalurgicznego. Na podstawie obrazów BSE, mapowania pierwiastkowego (FE-EPMA) oraz spektroskopii Ramana (Rys.5) w rdzeniu próbki zidentyfikowaliśmy cztery główne fazy pierwotne :

- Arsenek żelaza (faza dominująca): faza o składzie chemicznym zbliżonym do wzoru stechiometrycznego Fe_2As . Została ona wzbogacona w Cu, Co i S. Spektroskopia Ramana potwierdziła jej krystaliczną strukturę.
- Arsenian żelaza (ziarna eksolucyjne): skład tej fazy odpowiadał wzorowi $\text{Fe}_3(\text{AsO}_4)_2$. Podobnie jak arsenek żelaza, była ona wzbogacona w Cu i Co. Dane ramanowskie sugerowały jednak nieuporządkowaną strukturę, co sugeruje jej częściowe, wtórne zwietrzenie.
- Siarczki: występowały jako drobne, zaokrąglone kryształy o zróżnicowanym składzie chemicznym. Należały one głównie do szeregu roztworu stałego bornit (Cu_5FeS_4) – digenit (Cu_9S_5).
- Szkliwo rezydualne: faza ta chemicznie była podobna do arsenianu żelaza, jednak cechowała się znacznie wyższą zawartością arsenu i niższą tlenu. Widma ramanowskie potwierdziły jej częściowe utlenienie.



Rys.5 – mikrofotografie (BSE) i widma Ramana badanych faz; Warchulski et al., 2025

Zinterpretowanie petrogenety próbki z Castillo de Huarney, w której kluczową rolę odgrywała rosnąca wraz ze spadkiem temperatury niemieszalność stopów, pozwoliło mi na sformułowanie kluczowych ustaleń dotyczących charakterystyki anateksis prowadzącej do powstania badanego speiss/matte:

- Użyte surowce: skład chemiczny próbki, charakteryzujący się wysoką zawartością siarki i arsenu, jednoznacznie wskazywał, że do wytopu użyto rud siarczkowych. Odkrycie to ma zasadnicze znaczenie, ponieważ dotychczasowe badania i eksperymenty nad andyjską metalurgią często zakładały lub koncentrowały się na wykorzystaniu łatwiej dostępnych i prostszych w przetwarzaniu rud tlenkowych lub mieszanin tlenkowo-siarczkowych. Ze względu na toczącą się dyskusję odnośnie

celowego vs przypadkowego dozowania As w celu otrzymania brązu arsenowego o lepszych parametrach technologicznych kluczową kwestią było wskazanie źródła tego pierwiastka (Lechtman & Klein, 1999). Na bazie analiz próbki wykazałem, że najbardziej prawdopodobnym surowcem wyjściowym wydawał się być arsenopiryt (FeAsS) który, poddany działaniu wysokiej temperatury, ulegał rozkładowi, w wyniku którego tworzy się tymczasowo löllingit (FeAs_2 ; Kretschmar & Scott, 1976). To właśnie dalsze reakcje löllingitu (Seitkan et al., 2020) prowadziły do finalnej krystalizacji fazy arsenku żelaza (Fe_2As), która jest dominującym składnikiem badanej próbki.

- Temperatura procesu: w oparciu o analizę faz mineralnych w połączeniu z diagramami fazowymi (Bale et al., 2016; Gasanova et al., 2012; Goldbeck, 1982; Shishin et al., 2015; Zhang et al., 2018) wykazałem, że podczas wytopu osiągnięto temperaturę powyżej 1200°C . Już w tych warunkach próbka składała się z dwóch niemieszalnych stopów Fe-As-Cu oraz Fe-As-Cu-S-O. Poniżej 1200°C ze stopu oksysiarczkowego jako pierwszy odmieszał się arsenian żelaza; poniżej 1140°C nastąpiła krystalizacja siarczków miedzi i żelaza; poniżej 930°C wykrystalizował arsenek żelaza z oryginalnego, niezmiennego stopu Fe-As-Cu oraz nastąpiło zestalenie rezydualnego stopu pierwotnie oksysiarczkowego (Rys.5).
- Czas trwania wytopu: struktura próbki (Rys.5), w której fazy bogate w arsenki (*speiss*) i siarczki (*matte*) nie uległy pełnemu rozdzieleniu grawitacyjnemu, sugeruje, że proces wytopu był stosunkowo krótki. W przypadku dłuższego utrzymywania wysokiej temperatury gęstsza faza *speiss* opadłaby na dno, tworząc wyraźne warstwy.

Uzyskane dane petrogenetyczne pozwoliły dodatkowo na scharakteryzowanie technologii Wari jako zaawansowanej i opartej na świadomym wykorzystaniu specyficznych surowców. Potwierdzeniem zaawansowania technologii kultury Wari, porównywalnym z udokumentowanymi osiągnięciami kultury Sicán, jest osiągnięcie i utrzymanie temperatury powyżej 1200°C . Jednocześnie uzyskane dane wskazują na możliwe różnice w stosunku do praktyk metalurgicznych stosowanych przez inne współczesne im kultury andyjskie. Należy podkreślić, że analiza pojedynczej próbki nie może być reprezentatywna dla całej metalurgii Wari. Otwiera ona jednak nowe, kluczowe kierunki badań. Konieczne jest dalsze poszukiwanie i analiza podobnych materiałów z innych stanowisk, aby w pełni zrozumieć skalę, organizację i zróżnicowanie technologiczne, które cechowały prekolumbijskie rzemiosło metalurgiczne w Andach. Dane z tej pracy uzupełnione o badania izotopowe stanowiły podstawę kolejnej publikacji *Where did the ore come from? Pb isotope provenance of a Pre-Columbian speiss/matte fragment from the Metallurgist's Burial at Castillo de Huarmey (Peru)* (Kałaska et al., 2026).

Wytop złota w Złotym Stoku: studium dyferencjacji i reologii stopów oraz rewizja procesu hutniczego [A3]

Publikacja obejmuje pierwszą kompletną rekonstrukcję procesu wytopu złota w Złotym Stoku. W pracy tej nadrzędnym celem było wykazanie zaawansowania technologicznego dawnych hutników, koncentrującego się na obniżaniu lepkości stopu w celu zwiększenia efektywności procesu grawitacyjnej dyferencjacji stopów.

W oparciu o analizy chemiczne żużla oraz dostępne informacje o chemizmie skał występujących w okolicy Złotego Stoku zidentyfikowałem użytą w procesie rudę oraz topniki:

- Ruda złota: pozyskiwano ją z lokalnych skał, takich jak skały wapienno-krzemianowe, amfibolity, piroksenity oraz zserpentyinizowane marmury dolomityczne (Mikulski, 2011).
- Topniki: ponieważ wykorzystywane rudy były zubożone w SiO_2 , Al_2O_3 oraz K_2O względem żużla (Péterdi et al., 2014; Mikulski i Speczik, 2008), dodatki do procesu musiały zawierać ich podniesione koncentracje. Idealnie w kontekście dopasowania chemicznego wpisują się powszechnie występujące w okolicy skały – łupki blastomylonityczne i gnejsy (Kozłowska-Koch, 1973). Krzemionka jest niezbędna dla wytworzenia stopu będącego prekursorem żużla, a razem z Al_2O_3 oraz K_2O mogła pełnić funkcję topników dla obniżenia temperatury topnienia całej mieszaniny i zapewnienia pożądanej, bardzo niskiej lepkości żużla.

Dla efektywności tego procesu hutniczego kluczowym elementem była dyferencjacja grawitacyjna stopu bogatego w Au. Z tego względu zadaniem hutników było uzyskanie jak najniższej lepkości stopu w temperaturze rzeczywistej pracy pieców hutniczych, a przy tym zachowanie warunków redukcyjnych, gdyż nawet częściowe utlenienie speiss/matte mogło prowadzić do zaburzenia tego procesu czy powstawania odmieszkań (zbliżonych do opisanych w publikacji A2) utrudniających dalsze procesowanie. Mając to na uwadze, moim zadaniem było oszacowanie warunków temperaturowych i redoks podczas wytopu oraz lepkości stopu. Warunki temperaturowe odtworzyłem w oparciu o cztery niezależne metody dla zapewnienia maksymalnej wiarygodności wyników:

- eksperymenty w piecu laboratoryjnym,
- geotermometry,
- diagramy fazowe,
- oprogramowanie do modelowania termodynamicznego (MELTS)

W oparciu o uzyskane wyniki stwierdziłem, że:

- Temperatura minimalna wytopu wynosiła 1300–1350°C. Taki poziom był niezbędny do całkowitego stopienia wsadu (likwidus).
- Proces krystalizacji minerałów w żużlu kończył się dopiero po schłodzeniu materiału do temperatury w zakresie 1100–1200°C (solidus).

Bazując na składzie fazowym (współwystępowanie siarczków i arsenków żelaza oraz oliwinu) oceniłem, że warunki odpowiadają buforowi mineralnemu QIF (quartz – iron – fayalite; kwarc – żelazo – fajalit) co w zakresie temperatur likwidusu przekładało się na wyjątkowo niską (w porównaniu do innych historycznych żużli z tego okresu charakteryzowanych przez obecność spineli) lotność tlenu w zakresie $\log f\text{O}_2$ od –10,5 do –11,5.

Finalnie, bazując na modelu Giordano et al. (2006), obliczyłem lepkość stopu będącego prekursorem żużla w temperaturach z zakresu likwidusu – solidusu, otrzymując wyjątkowo

niski zakres wynoszący $\log \eta = 0,26 - 0,90 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Niska lepkość, będąca wynikiem świadomie dobranego składu chemicznego wsadu oraz wysokiej temperatury, gwarantowała bardzo wysoką wydajność separacji złota. Najlepszym dowodem na to jest fakt braku mierzalnych ilości złota w wykonanych analizach chemicznych (przy limicie detekcji ok. 10 ppm). Oznacza to, że proces pozwalał na niemal całkowite odzyskanie cennego kruszcu z rudy.

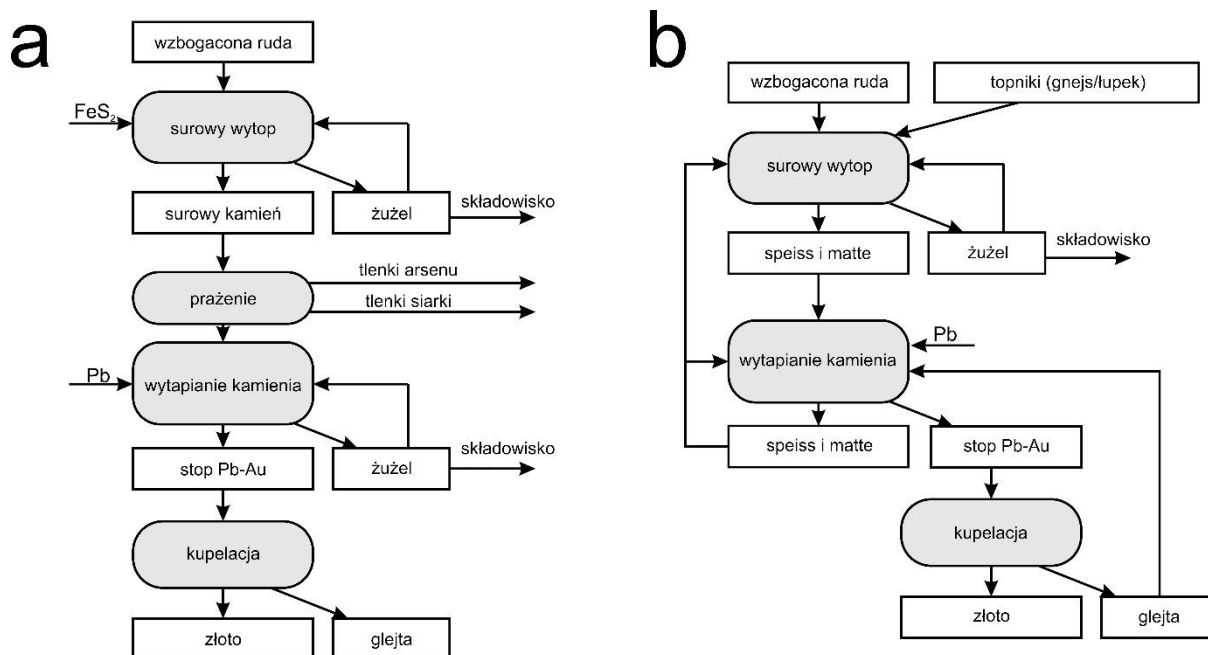
W drugiej kolejności, opierając się na powyższej analizie petrogenetycznej, skorygowałem dotychczasowe opisy tej technologii. Wcześniejszy model (Rys.6), oparty głównie na interpretacji źródeł historycznych (Dziekoński, 1972), zakładał złożony, wieloetapowy proces. Jego kluczowe fazy obejmowały:

1. Wytop surowy: wzbogacona ruda była wytapiana z dodatkiem pirytu (FeS_2) w celu wstępnego oddzielenia złota.
2. Prażenie: uzyskany w pierwszym etapie półprodukt, tzw. kamień surowy, poddawano prażeniu, aby usunąć z niego siarkę i arsen w postaci tlenków.
3. Wytop kamienia: wyprażony materiał ponownie wytapiano, tym razem z dodatkiem ołowiu, który miał związać cząstki złota.
4. Kupelacja: ostatnim etapem było oddzielenie czystego złota od ołowiu w specjalnym piecu kupelacyjnym.

Przeprowadzone przeze mnie badania wykazały niezgodność starego modelu z rzeczywistością chemiczną, wprowadzając dwie kluczowe zmiany sugerujące proces bardziej zintegrowany i ciągły (Rys.6):

- Usunięcie etapu prażenia: wykazałem, że etap ten nie mógł mieć miejsca w opisywanej formie. Dowodem na to jest obecność znaczących ilości siarki, arsenu oraz ołowiu w półprodukcie określanym jako *speiss/matte* (Garbacz-Klempka et al., 2014). Gdyby przeprowadzono prażenie, siarka i arsen uległyby utlenieniu i odparowaniu, a ołów zgodnie z wcześniejszym opisem był dodawany dopiero w kolejnej fazie.
- Rola *speiss* i *matte*: Zidentyfikowany w badaniach *speiss* i *matte* (Garbacz-Klempka et al., 2014) nie był odpadem, lecz kluczowym nośnikiem koncentrującym złoto. Zamiast być wyrzucany, był on zawracany do ponownego przetopu, prawdopodobnie z dodatkiem ołowiu. Tłumaczy to, dlaczego *speiss/matte* jest niezwykle rzadko znajdowany na hałdach – był zbyt cenny, by go porzucać.

Nowy model znacznie lepiej tłumaczy archeologiczną rzeczywistość: brak znalezisk dwóch odrębnych typów żużli (z „wytopu surowego” i „wytopu kamienia”) oraz rzadkość występowania *speiss/matte*.



Rys.6 - schemat procesu produkcji złota w Żłotym Stoku: (a) na podstawie danych literaturowych (Dziekoński, 1972); (b) w wersji zmodyfikowanej; Warchulski et al., 2022 (zmodyfikowano).

4.3.4. Etap krystalizacji - produkty procesów pirometalurgicznych jako analog unikatowych środowisk krystalizacji [A4-5]

Żużle z Rudy Śląskiej jako model rzadkich skał wulkanicznych (paralaw i melilitolitów) [A4]

Celem stojącym za realizacją tego opracowania była rekonstrukcja warunków i przebiegu krystalizacji żużli z Rudy Śląskiej za pomocą kontrolowanych eksperymentów wysokotemperaturowych. Hałda pozostała po hucie Hugo stanowi idealny obiekt do tego typu badań ze względu na specyficzny skład fazowy występujących tam żużli, składających się z melilitu ± pseudowollastonitu ± wollastonitu ± plagioklazu, osadzonych w otoczeniu szklawa krzemianowego. Taki skład fazowy i chemiczny jest rzadko spotykany w odpadach przemysłowych, ale wykazuje silne analogie do rzadkich skał naturalnych – paralaw i melilitolitów (Sokol et al., 2008; Stoppa i Sharygin, 2009; Melluso et al., 2003). Jednocześnie dostęp do hałdy w całej jej objętości wraz z przekrojem przez jej środek (ze względu na jej częściową eksploatację), pozwalał na weryfikację stwierdzonych eksperymentalnie procesów krystalizacji w skali znacznie bliższej rzeczywistym procesom wulkanicznym czy pirometamorficznym.

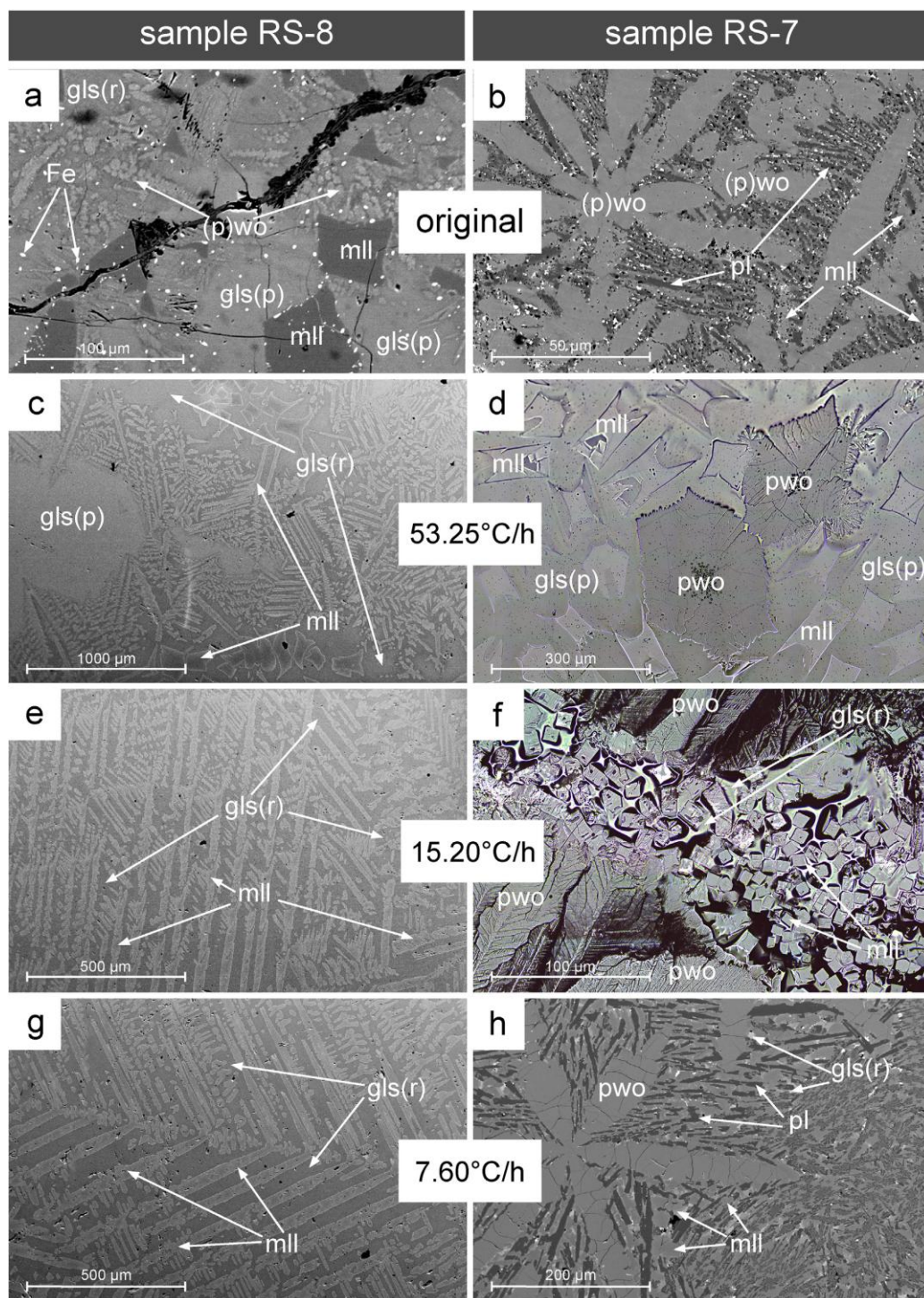
Badania wykazały, że materiał zdeponowany na hałdzie w Rudzie Śląskiej jest niejednorodny. Zidentyfikowałem trzy jego główne typy różniące się składem fazowym i, co kluczowe, zawartością potencjalnie toksycznych pierwiastków:

- Typ I: Żużel związany z materiałem muflowym i okładzinowym pieców hutniczych. Charakteryzował się skomplikowanym składem fazowym, zawierającym m.in. oliwiny, pirokseny, skalenie, tlenki żelaza i szkliwo.
- Typ II: Żużel zdominowany przez szkliwo, w którym nieregularnie rozproszone były rzadkie, anhedralne krystality melilitu oraz igiełkowe agregaty pseudowollastonitu i wollastonitu. Zawartość fazy amorficznej w tym typie sięgała 89%.
- Typ III: Żużel niemal w całości skrzystalizowany i zbudowany z poprzerastanych, igiełkowych kryształów wollastonitu, melilitu oraz plagioklazu. Ilość szkliwa rezydualnego w tym typie wynosiła zaledwie 15%.

Tabela 1 – skład chemiczny żużli z Rudy Śląskiej (Warchulski et al., 2020b zmodyfikowany)

	RS-3	RS-4	RS-5	RS-6	RS-7	RS-8
SiO₂	39,17	36,23	37,84	42,28	42,39	43,28
TiO₂	0,52	0,49	0,49	0,53	0,50	0,55
Al₂O₃	13,20	11,70	12,57	11,37	12,68	11,76
Fe₂O₃T	0,63	7,25	0,40	0,60	0,52	0,66
Mn₂O₃calc	-	-	-	-	1,89	3,59
MnOcalc	-	-	-	-	0,85	1,61
MnOtot	2,08	3,40	3,77	4,68	-	-
MgO	1,70	1,50	1,05	1,52	1,17	1,56
CaO	39,68	36,18	40,67	36,66	36,52	37,12
Na₂O	0,08	0,10	0,08	0,11	0,03	0,12
K₂O	0,77	0,86	0,59	1,14	0,20	1,27
P₂O₅	<0,01	0,08	<0,01	<0,01	<0,01	0,02
TOT/S	0,76	0,82	0,74	0,96	0,69	1,20
LOI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,38	-1,50

W dalszych pracach skupiłem się na żużlach typu II i III jako analogach melilitolitów i parafaw, a ostatecznie do analiz wytypowałem próbki żużla, które jednocześnie należą do innych grup wg stopnia krystaliczności (RS-8 szklisty oraz RS-7 krystaliczny) oraz cechują się maksymalnie zbliżonym składem chemicznym (Tabela 1). Zastosowana przeze mnie metodyka eksperymentalna polegała na określeniu temperatury likwidusu tych próbek, a następnie całkowitym ich stopieniu w temperaturze od 1250 do 1300°C w piecu komorowym. W dalszym kroku uzyskane stopy krzemianowe poddawałem kontrolowanemu, liniowemu chłodzeniu w trzech różnych reżimach termicznych, symulujących zróżnicowane tempo stygnięcia w warunkach naturalnych. Zastosowałem następujące gradienty chłodzenia: 53,25 °C/h (cykl 24-godzinny), 15,20 °C/h (cykl 3,5-dniowy) oraz 7,60 °C/h (cykl 7-dniowy).



Rys.7 - Obrazy SEM (a, b, c, e, g, h) oraz konoskopowe (d, f) badanych żużli: (a) wyjściowy żużel szklisty zawierający nieliczne krystalizacje (próbka RS-8); (b) wyjściowy żużel krystaliczny złożony z kryształów igiełkowych (próbka RS-7); (c) eksperymentalny żużel RS-8 chłodzony z gradientem 53,25 °C/h; (d) eksperymentalny żużel RS-7 chłodzony z gradientem 53,25 °C/h; (e) eksperymentalny żużel RS-8 chłodzony z gradientem 15,20 °C/h; (f) eksperymentalny żużel RS-7 chłodzony z gradientem 15,20 °C/h; (g) eksperymentalny żużel RS-8 chłodzony z gradientem 7,60 °C/h; (h) eksperymentalny żużel RS-7 chłodzony z gradientem 7,60 °C/h. Warchulski et al., 2020b. Oznaczenia: gls(p) – szkliwo pierwotne; gls(r) – szkliwo resztkowe; Fe – żelazo metaliczne; mll – melilit; pl – plagioklaz; pwo – pseudowollastonit; (p)wo – pseudowollastonit lub wollastonit.

Wyniki eksperymentów (Rys.7) w zakresie krystalizacji umożliwiły mi precyzyjne określenie wpływu trzech fundamentalnych czynników: temperatury, szybkości chłodzenia i składu chemicznego stopu, na finalny obraz petrograficzny oraz skład fazowy produktów krystalizacji:

- Eksperymenty wykazały, że krystalizacja badanych żużli rozpoczynała się w zakresie temperatur 1250–1300 °C. Zaobserwowałem przy tym, że próbka szklista (RS-8) ulega całkowitemu stopieniu w temperaturze o około 50°C niższej niż próbka krystaliczna (RS-7), co wskazuje na wpływ niewielkich różnic w składzie chemicznym na temperaturę likwidusu.
- Zasadniczym odkryciem eksperymentów było stwierdzenie, że gradient termiczny nie determinował sekwencji krystalizacji ani finalnego zespołu mineralnego. Jego rola ograniczała się do kinetyki procesu, kontrolując wyłącznie ilościowy postęp krystalizacji.
- Eksperymenty wykazały, że nawet niewielkie różnice w koncentracji poszczególnych pierwiastków (Tabela 1) prowadzą do całkowicie odmiennych ścieżek krystalizacji i finalnych zespołów mineralnych. Ten efekt był znacznie silniejszy niż wpływ gradientu termicznego.

Wyniki te jednoznacznie wskazały, że skład chemiczny stopu był głównym czynnikiem determinującym sekwencję krystalizacji minerałów i stopień krystaliczności próbek. Ustaliłem, że głównym mechanizmem petrologicznym odpowiedzialnym za tak drastyczne różnice w przebiegu krystalizacji była ewolucja składu chemicznego kryształów melilitu, które tworzą roztwór stały w szeregu åkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) – gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$). W próbce RS-8, krystalizacja rozpoczęła się od wydzielenia jąder melilitu bogatych w magnezowy człon åkermanitowy, co powoduje zubożenie stopu resztkowego w Mg i jego względne wzbogacenie w Al. W konsekwencji kolejne strefy przyrostu kryształów muszą być bogatsze w glinowy człon gehlenitowy. Ponieważ gehlenit charakteryzuje się znacznie wyższą temperaturą solidusu niż åkermanit, ta ewolucja składu melilitu powoduje również systematyczne podnoszenie się temperatury solidusu całego układu. W rezultacie, jak wykazałem, w warunkach kontynuowanego chłodzenia, stop ten osiąga warunki subsolidusowe zanim zdąży w pełni skryształizować. Proces ten efektywnie zatrzymuje dalszą krystalizację, prowadząc do solidyfikacji stopu jako szkliva, co bezpośrednio wyjaśnia dominację fazy amorficznej w żużlach z Rudy Śląskiej. Eksperymentalna ścieżka krystalizacji próbki RS-7 nie została „zamrożona”, a jej ewolucja postępowała wzdłuż linii kotektycznej pseudowollastonit-melilit aż do osiągnięcia punktu eutektycznego z krystalizacją anortytu. Mając to na uwadze, wyniki eksperymentów dla próbek RS-7 i RS-8 stanowią doskonały model dla procesu powstawania skał melilitolitowych z Colle Fabbri (Melluso et al., 2003; Stoppa i Sharygin 2009), jednocześnie wyjaśniając możliwe pojawianie się naturalnych skał bogatych w fazę amorficzną tylko na skutek specyfiki roztworu stałego melilitów.

Żużle z Rudy Śląskiej: studium asymilacji i krystalizacji faz koncentrujących PTE [A5]

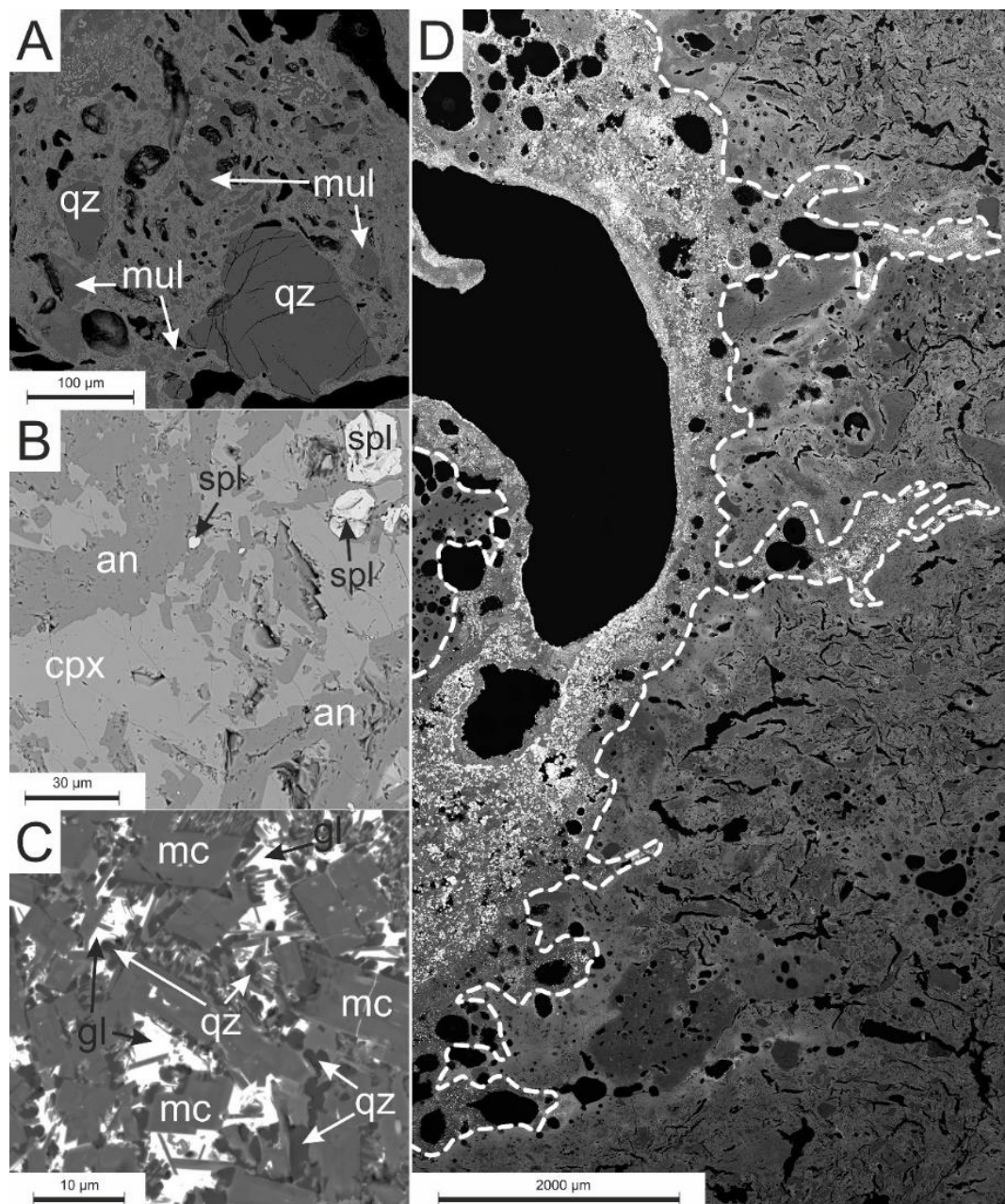
Celem naszego zespołu dla tego opracowania było opisanie mechanizmu powstawania faz koncentrujących wyjątkowo wysokie ilości PTE (głównie szkło arsenowo – ołowiowe i skalenie Pb) które zostały opisane w żużlach w wielu niezależnych lokalizacjach na terenie Górnego Śląska (np. Warchulski et al., 2015; Puziewicz et al., 2007; publikacja A6]. Ich cechą charakterystyczną jest związek z materiałem zawierającym fragmenty materiałów okładzinowych pieców / mufl hutniczych (opisany wcześniej Typ I). Z tego względu konieczne było zrozumienie reakcji zachodzących na styku materiałów ogniotrwałych z wsadem hutniczym. Próbkki do badań zostały pobrane ze wspomnianego już składowiska w Rudzie Śląskiej.

Dla realizacji założonego celu w pierwszym kroku wykonaliśmy analizy składu chemicznego materiału ogniotrwałego i żużla niezmienionych przez reakcje występujące na ich kontakcie (Tabela 2).

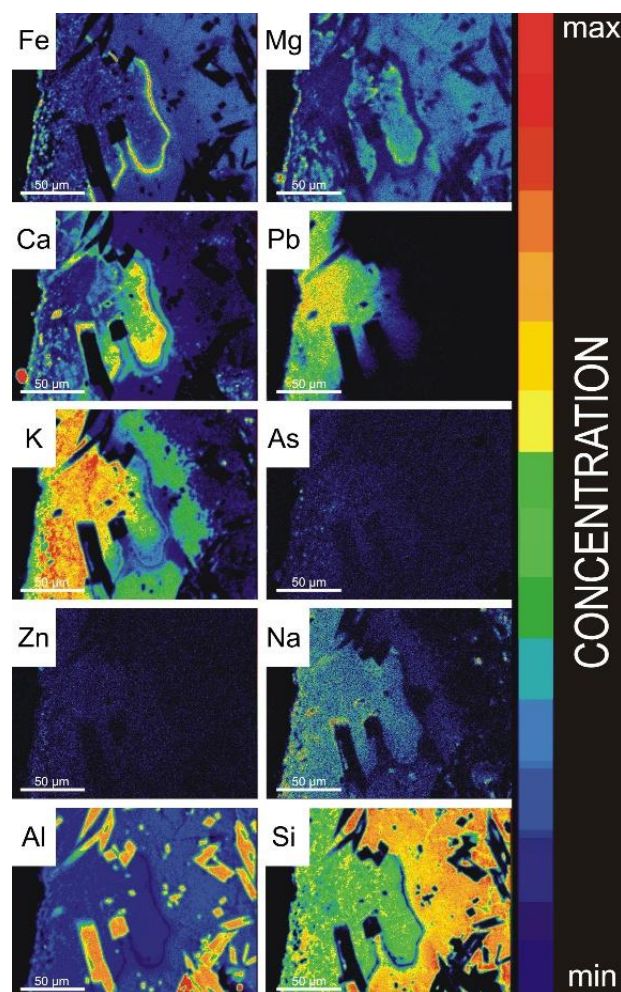
Tabela 2 – skład chemiczny badanego żużla i materiałów ogniotrwałych; Kupczak et al., 2020 zmodyfikowano

		Żużel	Materiał ogniotrwały
SiO ₂	%	38,17	65,70
TiO ₂	%	0,69	0,73
Al ₂ O ₃	%	15,81	29,08
Fe ₂ O ₃	%	22,71	2,38
Cr ₂ O ₃	%	0,02	0,03
MnO	%	0,41	0,02
BaO	%	0,71	0,02
MgO	%	5,73	0,30
CaO	%	10,56	0,41
K ₂ O	%	1,58	0,59
Na ₂ O	%	0,27	0,06
P ₂ O ₅	%	0,25	0,08
TOT/C	%	0,05	0,02
TOT/S	%	0,13	0,03
LOI	%	-0,3	0,0
Zn	mg/kg	>10000	223
As	mg/kg	2155	23
Pb	mg/kg	3775	145

Wysoka zawartość SiO₂ i Al₂O₃ w materiale ogniotrwałym jest cechą projektową, zapewniającą odporność termiczną i chemiczną. Kluczowe z perspektywy środowiskowej były koncentracje PTE które jednoznacznie wskazywały, że żużel hutniczy jest ich głównym nośnikiem, a materiały ogniotrwałe, poza strefą kontaktową, zawierają ich niewielkie ilości (Tabela 2). Zrealizowane analizy EPMA, zarówno punktowe (Rys.8), jak i mapowanie (Rys.9), umożliwiły nam odtworzenie dwóch głównych procesów odpowiedzialnych za powstawanie faz koncentrujących PTE na kontakcie żużla z materiałem ogniotrwałym.



Rys.8 - Obraz BSE przedstawiający: A — materiał ogniotrwały, B — żużel, C — strefę kontaktu żużla z materiałem ogniotrwałym, D — wnikanie stopu żużlowego (po lewej stronie linii przerywanej) w materiał ogniotrwały (po prawej stronie). Oznaczenia: an — anortyt, cpx — klinopiroksen, gl — szkliwo, mc — mikroklin, mul — mullit, spl — spinel, qz — kwarc.



Rys.9 - Mapowanie EPMA przedstawiające stężenia wybranych pierwiastków w pobliżu pęknięcia w materiale ogniotrwałym.

Pierwszy z mechanizmów polegał na interakcji fazy gazowej z materiałem ogniotrwałym. Jak wykazaliśmy, w wysokiej temperaturze (1063–1261 °C) pierwiastki o niskiej temperaturze wrzenia, takie jak cynk, ołów, potas, sód i arsen, przechodziły w formę gazową. W warunkach podwyższonego ciśnienia, panującego wewnątrz retort hutniczych, ten agresywny chemicznie fluid bogaty w lotne pierwiastki przenikał w głąb porowatej struktury materiału ogniotrwałego, prowadząc do jego wzbogacenia w te składniki (Rys.8-9). Drugi, kluczowy mechanizm obejmował bezpośrednią interakcję płynnego, stopionego wsadu hutniczego z muflami. Proces ten składał się z dwóch powiązanych zjawisk:

- Dyferencjacja grawitacyjna: związki o wysokiej gęstości i bardzo niskiej temperaturze topnienia, przede wszystkim tlenki ołowiu i arsenu, topiły się znacznie wcześniej niż reszta wsadu. Płynny stop tych tlenków migrował grawitacyjnie w kierunku dna mufl, tworząc tam strefę ekstremalnie wzbogaconą w te pierwiastki jeszcze przed całkowitym upłynięciem głównej masy krzemianowej.
- Asymilacja: gorący, agresywny chemicznie stop wsadu hutniczego wchodził w bezpośredni kontakt z materiałem mufl, powodując jego częściowe rozpuszczanie. W wyniku tej korozji stop wzbogacał się w składniki budujące materiał ogniotrwały, głównie SiO_2 i Al_2O_3 (Tabela 2).

Te procesy doprowadziły do powstania w strefie kontaktowej unikalnego chemicznie stopu, z którego następnie krystalizowały specyficzne fazy mineralne, będące głównym nośnikiem PTE (Rys.8)

Najważniejszym wynikiem badania z perspektywy środowiskowej obok wyjaśnienia mechanizmu powstawania było zidentyfikowanie przez nas konkretnych faz krystalicznych i amorficznych, które działały jak geochemiczne pułapki dla ołowiu i arsenu. To właśnie forma ich związania decyduje o stabilności PTEs i ich potencjale do migracji w późniejszych warunkach wietrzeniowych. W strefie kontaktu żużła z materiałem ogniotrwałym zidentyfikowaliśmy następujące, nowo powstałe fazy, które koncentrują PTEs:

- Skalenie potasowe wzbogacone w ołów: w strukturze tych minerałów ołów podstawiał potas, prowadząc do powstania faz o ekstremalnie wysokiej zawartości tlenku ołowiu, sięgającej aż 29,48% wag.
- Pirokseny (augit): w odróżnieniu od piroksenów diopsydowych z głównej masy żużła, te ze strefy kontaktowej miały skład augitu i były znacząco wzbogacone w żelazo oraz cynk. Stężenie tlenku cynku w ich strukturze dochodziło do 5,67% wag.
- Faza amorficzna: zidentyfikowano dwa typy szkliwa, z czego kluczowe znaczenie ma typ ołowiowo-arsenowy. Ta amorficzna faza, powstała z resztkowego stopu, który zastygła w ostatnich etapach chłodzenia, charakteryzowała się ekstremalnie wysokimi stężeniami toksycznych składników: tlenku ołowiu do 69,40% wag. oraz tlenku arsenu do 15,52% wag.

4.3.5. Etap hipergeniczny - produkty procesów pirometalurgicznych jako wyzwanie środowiskowe

Migracja Potencjalnie Toksycznych Pierwiastków z hałdy żużła w Rudzie Śląskiej [A6]

Celem tej publikacji była weryfikacja jak historyczne żużle hutnicze zawierające PTE zachowują się w warunkach hipergenicnych i jaki jest mechanizm uwalniania PTE. Badania przeprowadziłem na wspomnianej już hałdzie w Rudzie Śląskiej ze względu na możliwość jej opróbowania nie tylko powierzchniowo, ale również w pełnym przekroju pionowym w związku z jej częściową eksploatacją.

Jak już wspomniałem, największe zagrożenie środowiskowe stanowi żużel typu I. To właśnie w nim stwierdziłem najwyższe stężenia PTE, takich jak arsen, cynk, ołów i kadm (Tabela 3). Kluczowe znaczenie ma fakt, że pierwiastki te są skoncentrowane w fazach mineralnych podatnych na wietrzenie, takich jak szkliwo ołowiowo-arsenowe oraz Pb-skaleń, co znacząco zwiększa ich potencjał do uwalniania się do środowiska (fazy te opisane są szczegółowo w publikacji A5). Należy przy tym zaznaczyć, że choć żużel typu I stanowi główne ryzyko ze względu na niestabilność faz, najwyższe stężenia bezwzględne niektórych PTE, głównie manganu, zidentyfikowano w żużlu typu III (Tabela 3).

Tabela 3 - Maksymalne koncentracje PTE zidentyfikowane na badanym składowisku (na podstawie Warchulski et al., 2019)

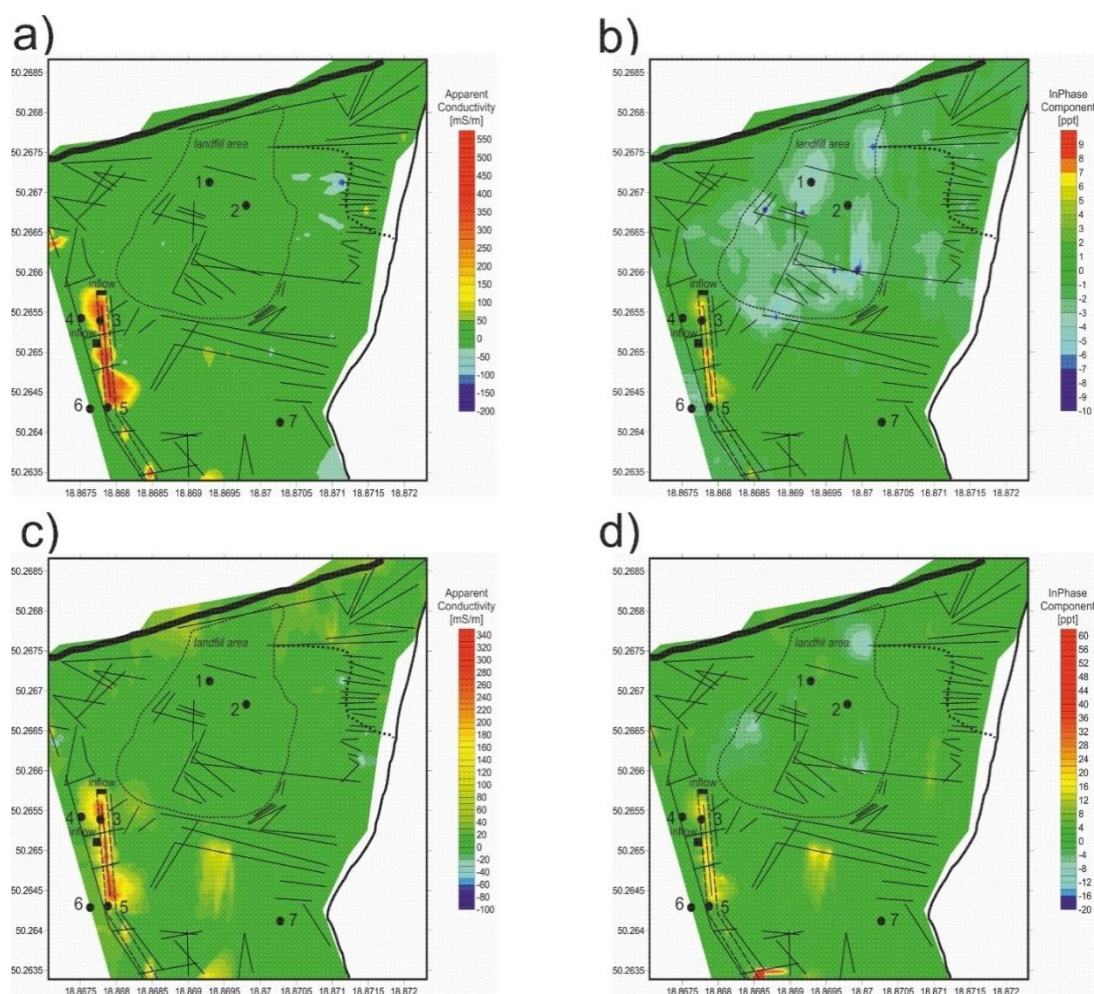
Pierwiastek	Maksymalna zawartość [mg/kg]	Oznaczenie próbki	Typ materiału
Ołów	21 679	RS-1	Żużel typu I
Cynk	53 576	RS-1	Żużel typu I
Mangan	36 289	RS-6	Żużel typu III
Arsen	6 134	RS-1	Żużel typu I
Kadm	105	RS-2	Żużel typu I

Wykonane przeze mnie analizy wskazały, że głównym mechanizmem uwalniania PTE z hałdy były procesy wietrzenia indukowane przez opady deszczu. Woda opadowa, przenikając przez porowatą strukturę żużla, wchodziła w reakcje z jego składnikami mineralnymi. W rezultacie pierwiastki, dotychczas uwięzione w pierwotnych fazach krzemianowych, przechodziły do roztworu, a następnie wytrącały się w postaci faz wtórnych – głównie węglanów, siarczanów, tlenków i wodorotlenków.

Wyniki przeprowadzonych testów wymywania (procedura SPLP - Synthetic Precipitation Leaching Procedure; Procedura Ługowania Symulowanymi Opadami), potwierdziły ten proces. Na ich bazie wykazałem, że zwietrzały materiał żużlowy uwalniał zanieczyszczenia znacznie łatwiej niż świeży, ponieważ wtórne minerały, takie jak siarczany i węglany, były w warunkach testowych łatwiej rozpuszczalne niż pierwotne fazy krzemianowe. Szczególnie podatny na wymywanie okazał się As który w odcieku z żużla typu I osiągnął stężenie 1700 µg/l, a z materiału zwietrzałego 660 µg/l.

Bezpośrednim dowodem na realny wpływ hałdy na lokalny ekosystem wodny były wyniki analizy próbki wody pobranej z okresowego cieku wodnego odprowadzającego wody z terenu hałdy. W oparciu o te analizy stwierdziłem, że stężenie ołowiu w próbce przekracza limit dopuszczalny dla wody pitnej wg norm Światowej Organizacji Zdrowia (WHO, 2017) ponad 5-krotnie, a stężenie arsenu przekracza normę 2-krotnie. To potwierdza, że procesy wietrzenia aktywnie przenoszą PTE z hałdy do lokalnych wód powierzchniowych.

Jednym z najważniejszych osiągnięć w ramach tego studium było precyzyjne, przestrzenne zmapowanie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń (Rys.10). Było to możliwe dzięki kooperacji z dr hab. Maciejem Mendeckim, prof. UŚ i zintegrowaniu metod geofizycznych (pomiarów elektromagnetycznych – EM) z klasyczną analizą mineralogiczną (XRD i SEM-EDS) próbek gleby i osadów. Takie podejście pozwoliło mi nie tylko zlokalizować skażenie, ale również zrozumieć jego charakter.



Rys.10 - Mapy składowych pola elektromagnetycznego (EM) dla różnych głębokości penetracji: a) przewodność na głębokości 0,75 m; b) składowa in-phase na głębokości 0,75 m; c) przewodność na głębokości 1,5 m oraz d) składowa in-phase na głębokości 1,5 m. Pozostałe oznaczenia: czarne punkty to miejsca poboru próbek gleby/osadów dennych (1–7); czarne linie to trasy pomiarowe; Warchulski et al., 2019.

Kluczowe odkrycie dokonane na podstawie pomiarów EM było następujące:

- Sama hałda żużla charakteryzuje się niską przewodnością elektryczną i ujemnymi wartościami tzw. parametru in-phase (parametru związanego z podatnością magnetyczną materiału). Jest to typowa sygnatura dla materiałów krzemianowych i glinokrzemianowych, z których zbudowany jest żużel.
- Wyraźna anomalia o bardzo wysokiej przewodności (> 300 mS/m) oraz wysokich wartościach parametru in-phase (> 6 ppt) została zidentyfikowana wyłącznie w jednym miejscu – w korycie okresowego ciek wodny (suchego w momencie pomiarów), który odprowadza wody z terenu hałdy po opadach.

Analiza mineralogiczna osadów pobranych z tego ciek potwierdziła, że wysoka przewodność jest spowodowana obecnością wtórnych siarczków (np. wurcyt/sfaleryt bogaty w kadm) oraz tlenków i wodorotlenków, w których skoncentrowane są mobilne formy PTE (głównie Cd, Zn i Pb). Oznacza to, że ciek wodny działa jak kanał, którym zanieczyszczenia są transportowane z hałdy, a następnie wytrącają się i kumulują w osadach dennych.

4.3.6. Podsumowanie cyklu

Przedstawiony cykl publikacji wpisuje się w koncepcję „antropogenicznej petrogenety”, stanowiąc odpowiedź na wyzwania badawcze epoki antropocenu. Zgodnie z przewidywaniami Władimira Wiernadskiego, technologiczna działalność człowieka stała się potężną siłą geologiczną. Badania te dowodzą, że w kontekście antropocenu, rozumianego jako trwające, transformacyjne wydarzenie geologiczne, ostra granica między zjawiskami sztucznymi a naturalnymi ulega całkowitemu zatarciu. Wykazano, że produkty procesów pirometalurgicznych stanowią pełnoprawny obiekt badań petrologicznych, rządzący się tymi samymi prawami fizykochemicznymi, co naturalne środowiska skałotwórcze. Zastosowanie tego podejścia pozwoliło zrealizować komplementarne cele: zrekonstruować historyczne procesy technologiczne jako celową anateksis, wykorzystać żużle jako model krystalizacji rzadkich skał oraz zidentyfikować związane z tymi materiałami ryzyka środowiskowe.

4.4. Literatura użyta w omówieniu celu naukowego prac wchodzących w skład dzieła habilitacyjnego

- Agricola, G. (2000). *De re metallica*. Muzeum Karkonoskie w Jeleniej Górze.
- Bale, C. W., Bélisle, E., Chartrand, P., Decterov, S. A., Eriksson, G., Gheribi, A. E., Hack, K., Jung, I. H., Kang, Y. B., Melançon, J., Pelton, A. D., Petersen, S., Robelin, C., Sangster, J., Spencer, P., & Van Ende, M. A. (2016). FactSage thermochemical software and databases, 2010–2016. *Calphad*, 54, 35–53. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2016.05.002>
- Bachmann, H. G. (1982). The identification of slags from archaeological sites. *Institute of Archaeology*.
- Dziekoński, T. (1972). *Wydobywanie rud i metalurgia złota i arsenu w Złotym Stoku*. Zakład Narodowy im. Ossolińskich.
- Garbacz-Klempka, A., Wardas-Lasoń, M., & Rządowski, S. (2014). Odpady hutnicze z rejonu Złotego Stoku. *Archives of Foundry Engineering*, 14(2), 23–28. <https://doi.org/10.7494/mafe.2013.39.2.23>
- Gasanova, Z. T., Aliev, Z. S., Yusibov, Y. A., & Babanly, M. B. (2012). Phase equilibria in the Cu–Cu₂S–As system. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 57(8), 1158–1162. <https://doi.org/10.1134/S0036023612050075>
- Gibbard, P., Walker, M., Bauer, A., Edgeworth, M., Edwards, L., Ellis, E., Finney, S., Gill, J. L., Maslin, M., Merriitts, D., & Ruddiman, W. (2022). The Anthropocene as an event, not an epoch. *Journal of Quaternary Science*, 37, 395–399. <https://doi.org/10.1002/jqs.3416>
- Giersz, M. (2014). The discovery of the Imperial Mausoleum. W M. Giersz & C. Pardo (Red.), *Castillo de Huarmey: El mausoleo imperial Wari* (s. 295–301). Museum of Art of Lima.
- Giersz, M. (2017). *Castillo de Huarmey: Un centro del imperio Wari en la costa norte del Perú*. Ediciones del Hipocampo.
- Goldbeck, O. (1982). *Iron—Binary phase diagrams*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-08024-5>.

- Hazen, R. M., Grew, E. S., Origlieri, M. J. i Downs, R. T. (2017). On the mineralogy of the “Anthropocene Epoch”. *American Mineralogist*, 102(3), 595–611. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5875>
- Kałaska, M., Warchulski, R., Tetfejer, K., Karasiński, J., Sierpień, P., Kamenov, G. D., Mathur, R., Prządka-Giersz, P., Chyla, J. M., & Giersz, M. (2026). Where did the ore come from? Pb isotope provenance of a Pre-Columbian speiss/matte fragment from the Metallurgist’s Burial at Castillo de Huarmey (Peru). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 74, 105893. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2026.105893>
- Killick, D., & Hayashida, F. (2022). Copper smelting and refining in the Pampa de Chaparrí, Lambayeque, Peru, ca. 1030–1180 cal AD. *Journal of Archaeological Science*, 148, 105687. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2022.105687>
- Kozłowska-Koch, M. (1973). Polimetamorfity strefy tektonicznej Złoty Stok-Skrzynka w Sudetach. *Geologia Sudetica*, 8, 121–158.
- Kretschmar, U., & Scott, S. D. (1976). Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S. *The Canadian Mineralogist*, 14(3), 364–386.
- Kupczak, K., Warchulski, R.*, Dulski, M., & Środek, D. (2020). Chemical and Phase Reactions on the Contact between Refractory Materials and Slags, a Case from the 19th Century Zn-Pb Smelter in Ruda Śląska, Poland. *Minerals*, 10(11), 1006. <https://doi.org/10.3390/min10111006>
- Lechtman, H., & Klein, S. (1999). The production of copper–arsenic alloys (arsenic bronze) by cosmelting: Modern experiment, ancient practice. *Journal of Archaeological Science*, 26(5), 497–526. <https://doi.org/10.1006/jasc.1998.0324>
- Melluso, L., Conticelli, S., D'Antonio, M., Mirco, N. P., & Saccani, E. (2003). Petrology and mineralogy of wollastonite- and melilite-bearing paralavas from the Central Apennines, Italy. *American Mineralogist*, 88(8–9), 1287–1299. <https://doi.org/10.2138/am-2003-8-912>
- Mendecki, M. J., Warchulski, R., Szczuka, M., Środek, D., & Pierwoła, J. (2020). Geophysical and petrological studies of the former lead smelting waste dump in Sławków, Poland. *Journal of Applied Geophysics*, 179, 104080. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104080>
- Mikulski, S. Z. (2011). Gold mineralization of the Kłodzko-Złoty Stok intrusion contact zone, Sudetes, SW Poland. W A. Kozłowski & S. Z. Mikulski (Red.), *Gold in Poland* (s. 27–43). AM Monograph.
- Mikulski, S. Z., & Speczik, S. (2008). Organic and inorganic geochemistry of gold mineralisation at the Złoty Stok, Southwest Poland. *Applied Earth Science*, 117(4), 149–159. <https://doi.org/10.1179/174327508X387474>
- Péterdi, B., Szakmány, G., Judik, K., Dobosi, G., Kasztovszky, Z., Szilágyi, V., Maróti, B., Bendő, Z., & Gil, G. (2014). Petrographic and geochemical investigation of a stone adze made of nephrite from the site Balatonőszöd—Temetői dűlő (Hungary). *Geological Quarterly*, 58(1), 181–192. <https://doi.org/10.7306/gq.1146>
- Prządka-Giersz, P. (2019). *Mujer, poder y riqueza: La tumba de elite femenina Wari del Castillo de Huarmey*. Ediciones del Hipocampo.
- Puziewicz, J., Zainoun, K., & Bril, H. (2007). Primary phases in pyrometallurgical slags from a zinc-smelting waste dump, Świętochłowice, Upper Silesia, Poland. *The Canadian Mineralogist*, 45(5), 1189–1200. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.45.5.1189>

- Seitkan, A., Lampronti, G. I., Widmer, R. N., Casati, N. P. M., & Redfern, S. A. T. (2020). Thermal behavior of iron arsenides under non-oxidizing conditions. *ACS Omega*, 5(12), 6423–6428. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03928>
- Shimada, I., & Craig, A. K. (2013). The style, technology and organization of Sicán mining and metallurgy, northern Peru: Insights from holistic study. *Chungara (Arica)*, 45(1), 3–31. <https://doi.org/10.4067/S0717-73562013000100001>
- Shishin, D., Jak, E., & Decterov, S. A. (2015). Thermodynamic assessment and database for the Cu–Fe–O–S system. *Calphad*, 50, 144–160. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2015.06.004>
- Shugar, A., Notis, M., Newbury, D., & Ritchie, N. (2014). Investigating a Moche cast copper artifact for its manufacturing technology. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 1656, 95–109. <https://doi.org/10.1557/opl.2014.822>
- Sokol, E. V., Novikov, I. S., Zateeva, S. N., Sharygin, V. V., & Vapnik, Y. (2008). Pyrometamorphic rocks of the spurrite–merwinite facies as indicators of discharge zones of hydrocarbons (the Hatrurim Formation, Israel). *Doklady Earth Sciences*, 420, 608–614.
- Stoppa, F., & Sharygin, V. V. (2009). Melilitolite intrusion and pelite digestion by high temperature kamafugitic magma at Colle Fabbri, Spoleto, Italy. *Lithos*, 112(3–4), 306–320. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.03.010>
- Warchulski, R., Mendecki, M., Gawęda, A., Sołtysiak, M., & Gadowski, M. (2019). Rainwater-induced migration of potentially toxic elements from a Zn-Pb slag dump in Ruda Śląska in light of mineralogical, geochemical and geophysical investigations. *Applied Geochemistry*, 109, 104396. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104396>
- Warchulski, R., Szczuka, M., & Kupczak, K. (2020a). Reconstruction of 16th–17th Century Lead Smelting Processes on the Basis of Slag Properties: A Case Study from Sławków, Poland. *Minerals*, 10(11), 1039. <https://doi.org/10.3390/min10111039>
- Warchulski, R., Gawęda, A., Kupczak, K., Banasik, K., & Krzykowski, T. (2020b). Slags from Ruda Śląska, Poland as a large-scale laboratory for the crystallization of rare natural rocks: melilitolites and paralavas. *Lithos*, 372–373, 105666. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105666>
- Warchulski, R., Kupczak, K., Gawęda, A., & Sitko, R. (2022). Complete reconstruction of the process and conditions during gold smelting in the 15th–17th centuries in Złoty Stok based on metallurgical slags. *Archaeometry*, 64(4), 916–934. <https://doi.org/10.1111/arcm.12752>
- Warchulski, R., Kałaska, M., Rizzuto, B. C., Sierpień, P., Pisarek, M., Kaproń, G., Marciniak-Maliszewska, B., Jokubauskas, P., Kotowski, J., Środek, D., Prządka-Giersz, P., & Giersz, M. (2025). In-depth study of a speiss/matte sample from Castillo de Huarmey, North Coast of Peru, and its implications for the pre-Columbian production of arsenic bronze in the Central Andes. *Archaeometry*, 67, 112–131. <https://doi.org/10.1111/arcm.13000>
- Witkowski, S., & Krajniewski, J. (2013). Inwentarz i lustracje kłucza sławkowskiego z XVII i XVIII wieku. Muzeum Miejskie „Sztygarka”.
- World Health Organization. (2017). Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum.

- Zhang, J., Cui, X., & Wang, Y. (2018). Liquid phase separation in immiscible Cu–Fe alloys. *International Journal of Cast Metals Research*, 31(2), 87–92. <https://doi.org/10.1080/13640461.2017.1367527>

4.5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

4.5.1. Rozwój nowych narzędzi i metod badawczych dla odtwarzania historycznych procesów hutniczych

Omawiany nurt badawczy był rozwijany przez mojego i prof. dr hab. Aleksandry Gawędy ówczesnego doktoranta, a obecnie doktora, Krzysztofa Kupeczaka. Prace te toczyły się pod moim kierownictwem jako promotora pomocniczego, bazując w dużej mierze na moich wcześniejszych doświadczeniach w tym obszarze. Zagadnienia te stanowiły zarazem merytoryczne jądro jego dysertacji. W ramach wspólnych działań skoncentrowaliśmy się na zintegrowaniu klasycznych obserwacji mineralogiczno-geochemicznych z zaawansowanym aparatem modelowania termodynamicznego. Istotnym rezultatem tych prac okazało się zaprojektowanie i wdrożenie autorskiego oprogramowania o nazwie SLAG. Narzędzie to ułatwia obliczanie lepkości stopów oraz temperatur likwidusu dla zróżnicowanych pod względem chemicznym żużli historycznych. Zastosowanie tego rozwiązania pozwala na uzupełnienie istotnej luki analitycznej w obrębie współczesnej metodyki archeometalurgicznej.

Aplikacyjną wartość nowych narzędzi zweryfikowano w serii publikacji poświęconych obiektom ze Staropolskiego Okręgu Przemysłowego oraz Gór Świętokrzyskich. W badaniach skupionych na nowożytnym hutnictwie miedzi w Polichnie (opublikowanych na łamach *Heritage Science*) wprowadzono do analizy materiału historycznego wykresy trwałości faz (PAD – Predominance Area Diagrams). Zastosowanie tego narzędzia umożliwiło miarodajną rekonstrukcję lotności tlenu i siarki, co bezpośrednio przełożyło się na precyzyjne wyznaczenie warunków redoks panujących w dawnych piecach.

Zaproponowane podejście analityczne wdrożono następnie w badaniach nad dymarskim hutnictwem żelaza z okresu rzymskiego oraz przetwórstwem miedzi w Miedzianej Górze (Góry Świętokrzyskie). Umożliwiło ono wykazanie technologicznej unifikacji procesów realizowanych na odrębnych stanowiskach, a zarazem identyfikację specyficznych parametrów fizykochemicznych konkretnych wytopów. Warsztat badawczy, wypracowany przez dr. inż. Kupeczaka przy moim merytorycznym udziale, zwiększa rozdzielczość w odtwarzaniu dawnych archeotechnologii. Co więcej, architektura oprogramowania SLAG została zaprojektowana w taki sposób, aby z jego zaimplementowanych funkcji mogły swobodnie korzystać również osoby nieposiadające specjalistycznego doświadczenia w zaawansowanym modelowaniu termodynamicznym.

*Kupeczak, K. *, Warchulski, R., & Gawęda, A. (2023). Reconstruction of smelting conditions during 16th- to 18th-century copper ore processing in the Kielce region (Old Polish Industrial District) based on slags from Miedziana Góra, Poland. Archaeometry, 65(3), 547–569. <https://doi.org/10.1111/arcm.12837>*

*Kupeczak, K. *, & Warchulski, R. (2024). SLAG–software for reconstruction of historical smelting processes based on slag properties. Archaeometry, 66(4), 803–823. <https://doi.org/10.1111/arcm.12940>*

Kupczak, K.*, Warchulski, R., Gawęda, A., Ślęzak, M., & Migas, P. (2024). The use of predominance area diagrams (PAD) to determine the oxygen and sulfur fugacities prevailing during historical metallurgical processes: the case of fifteenth to seventeenth century copper slags from Polichno (Old Polish industrial district). *Heritage Science*, 12(1), Artykuł 49. <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01171-y>

Kupczak, K.*, Warchulski, R., Gawęda, A., & Janiec, J. (2024). Bloomery iron production in the Holy Cross Mountains (Poland) area during the Roman period: conditions during the metallurgical process and their uniformity between locations. *Heritage Science*, 12(1), Artykuł 147. <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01266-6>

* - autor korespondencyjny

4.5.2. Długotrwała stabilność środowiskowa odpadów kopalnianych i hutniczych oraz ich wpływ na środowisko glebowe

W ramach tego nurtu badawczego, dzięki współpracy krajowej i międzynarodowej, miałem możliwość rozszerzenia dotychczasowych analiz na kwestię mobilności pierwiastków potencjalnie toksycznych w odpadach metalurgicznych i górniczych, które poddawane są procesom wietrzenia w skali stuleci. Przedmiotem badań zespołów, których byłem członkiem lub liderem, były średniowieczne żużle ołowiowo-srebrne z rejonu śląsko-krakowskiego, nowożytnie żużle miedziowe pochodzące z Gór Świętokrzyskich, stuletnie szlamy z kopalni Bibiela na Górnym Śląsku oraz odpady popłuczkowe z Tarnowskich Gór objęte ochroną w ramach programu UNESCO.

Kluczowy aspekt stanowiło tu zintegrowanie zaawansowanej charakterystyki mineralogicznej (przy użyciu technik XRD, SEM-EDS oraz EPMA), w której specjalizuje się nasz zespół (wraz ze mną tworzą go dr inż. Krzysztof Kupczak, prof. dr hab. Aleksandra Gawęda oraz dr hab. Jerzy Cabała), z wielowariantowymi testami ługowania. Niezbędne w tym zakresie doświadczenie zbieraliśmy na Uniwersytecie Karola w Pradze, pod okiem zespołu prof. Vojtěcha Ettlera. W toku prowadzonych prac wykazaliśmy, że pomimo wysokich całkowitych stężeń metali (Pb, Zn, Cu, As, Cd) w analizowanych odpadach ich faktyczna mobilność w środowisku naturalnym ulega często silnemu ograniczeniu. Udowodniliśmy, że mechanizm ten opiera się na stabilności faz pierwotnych oraz na wyjątkowo efektywnej immobilizacji zanieczyszczeń w strukturach minerałów wtórnych takich jak cerusyt, piromorfit, smitsonit czy tlenki żelaza i manganu.

Powyższe badania pozwoliły zarazem zdefiniować strefy krytyczne dla transferu zanieczyszczeń. Wskazują one wyraźnie na fundamentalną rolę kontaktu odpadów z kwaśnymi glebami technogenicznymi (Technosolami) w inicjowaniu mobilizacji metali. Traktując historyczne składowiska jako naturalne laboratoria, zweryfikowaliśmy hipotezę, iż długofalowa stabilność środowiskowa tych materiałów zależy przede wszystkim od lokalnych uwarunkowań pH oraz barier geochemicznych. Ma to kluczowe znaczenie przy projektowaniu strategii remediacji obszarów przemysłowych.

Cabała, J*., Warchulski, R., Rozmus, D., Śródek, D., & Szeleg, E. (2020). Pb-rich slags, minerals, and pollution resulted from a medieval Ag-Pb smelting and mining operation in the

Silesian-Cracovian region (southern Poland). *Minerals*, 10(1), 28. <https://doi.org/10.3390/min10010028>

Kupczak, K. *, **Warchulski, R.**, Ettler, V., & Mihaljevič, M. (2025). The impact of buried historical copper slags on contemporary soil contamination. *Journal of Geochemical Exploration*, 273, 107743. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2025.107743>

Warchulski, R. *, Kupczak, K., Ettler, V., Mihaljevič, M., Krzykowski, T., & Sitko, R. (2025). Environmental stability of untreated neutral metalliferous mine drainage sludge after 100 years of weathering. *Environmental Geochemistry and Health*, 47, 555. <https://doi.org/10.1007/s10653-025-02865-3>

Cabała, J., **Warchulski, R. ***, Kupczak, K., Kubica, W., & Krztała, A. (2026). Geochemical constraints and heritage conflicts during cadmium stabilization of Zn-Pb-Ag tailings at a UNESCO World Heritage site. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-48819-2>

Kupczak, K. *, **Warchulski, R.**, Ettler, V., & Mihaljevič, M. (2026). Mobility and environmental availability of metal(loid)s at a historically recultivated Cu/Pb smelter site in Polichno, Holy Cross Mountains, Poland. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-61748-4>

* - autor korespondencyjny

4.5.3. Synergia geofizyki i petrologii dla badań archeometrycznych

W obrębie tego nurtu, pracując pod kierownictwem dr. hab. Macieja Mendeckiego, prof. UŚ, rozwijaliśmy metodykę skutecznej integracji badań geofizycznych z analizą petrologiczną na potrzeby zastosowań archeometrycznych. Badania te skoncentrowano na historycznym ośrodku górniczo-hutniczym w Sławkowie. Właśnie tam w pełni wykorzystaliśmy komplementarny charakter tomografii elektrooporowej (ERT) i metod elektromagnetycznych (EMI). W publikacji poświęconej nowożytnemu zwałowisku po hutnictwie ołowiu połączyliśmy klasyczną prospekcję geofizyczną ze szczegółową charakterystyką mineralogiczną (XRD, SEM-EDS). Zabieg ten umożliwił bezpośrednie skorelowanie zarejestrowanych anomalii geofizycznych z konkretnymi fazami mineralnymi, w tym z diamagnetycznym szkliwem krzemianowym, a w efekcie pozwolił na precyzyjne wyznaczenie rzeczywistej miąższości zwałowiska.

Zastosowane podejście rozszerzyliśmy następnie podczas badań na terenie średniowiecznego zamku biskupów krakowskich. Kluczowym wyzwaniem było tam zdefiniowanie tła petrograficznego dla utworów naturalnych. Ten krok umożliwił udaną separację sygnałów generowanych przez relikty dawnych murów i fosy w złożonym środowisku zurbanizowanym. Synergia wykazana w obu tych pracach opiera się na traktowaniu petrologii jako precyzyjnego narzędzia kalibracyjnego dla interpretacji geofizycznych. Dogłębna znajomość składu fazowego badanych materiałów antropogenicznych otwiera drogę do bezinwazyjnego, a jednocześnie dokładnego rekonstruowania obiektów archeologicznych oraz ułatwia ocenę ich oddziaływania na środowisko, optymalizując cały proces badawczy na terenach charakteryzujących się skomplikowaną historią użytkowania.

Mendecki, M. J.*, Warchulski, R., Szczuka, M., Środek, D., & Pierwoła, J. (2020). *Geophysical and petrological studies of the former lead smelting waste dump in Sławków, Poland. Journal of Applied Geophysics*, 179, 104080. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104080>

Mendecki, M. J.*, Warchulski, R., & Kicza, M. (2026). *Geophysical survey of the medieval Castle in Sławków, Poland: Insights from ERT and EM. Journal of Applied Geophysics*, 246, 106118. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2026.106118>

* - autor korespondencyjny

4.5.4. Rozszerzenie badań nad metalurgią kultury Wari (Peru)

Realizując ten nurt badawczy, uczestniczyłem w pracach pod kierownictwem dr. Macieja Kałaski. Ich cel nadrzędny stanowiło precyzyjne ustalenie pochodzenia surowców wykorzystywanych w procesach hutniczych na stanowisku Castillo de Huarmey, które opisano w publikacji A2. Kluczowe osiągnięcie w tym obszarze polegało na przeprowadzeniu analiz izotopowych ołowiu dla fragmentu speiss/matte, odnalezionej w tzw. Pochówku Metalurga. Pomyślnie wyznaczenie sygnatury izotopowej tego prekolumbijskiego półproduktu ułatwiło osadzenie go w znacznie szerszym kontekście geologicznym oraz archeologicznym całych Andów Środkowych.

Uzyskane wyniki dowiodły, że sygnatura analizowanej próbki koresponduje ściśle z III prowincją izotopową, która swym zasięgiem obejmuje terytoria południowego Peru oraz Boliwii. Korelując uzyskane dane z historycznymi wynikami mineralogicznymi i chemicznymi, zespół zidentyfikował złożę Pulacayo w Boliwii jako najbardziej prawdopodobne pierwotne źródło rudy. Odkrycie to stanowi dowód na dalekosiężny transport zasobów metalurgicznych w okresie Middle Horizon (ok. 650–1050 n.e.). Powyższa praca nie tylko z powodzeniem wypełnia lukę w badaniach nad proveniencją metali w strefie wpływów Wari. Wskazuje również na niezwykle intensywne interakcje technologiczne z kręgiem kultury Tiwanaku. Dziś osiągnięcie to jest ważnym głosem w dyskusji nad mobilnością starożytnych rzemieślników i surowców, skutecznie podważając obowiązujące wcześniej modele zakładające w regionie Huarmey istnienie wyłącznie produkcji o charakterze lokalnym.

Kałaska, M.*, Warchulski, R., Tetfejer, K., Karasiński, J., Sierpień, P., Kamenov, G. D., Mathur, R., Prządka-Giersz, P., Chyla, J. M., & Giersz, M. (2026). *Where did the ore come from? Pb isotope provenance of a Pre-Columbian speiss/matte fragment from the Metallurgist's Burial at Castillo de Huarmey (Peru). Journal of Archaeological Science: Reports*, 74, 105893. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2026.105893>

* - autor korespondencyjny

4.5.5. Badania nad efektywnością redukcji żelaza za pomocą wodoru

Dzięki współpracy podjętej z dr. hab. inż. Piotrem Migasem (AGH), miałem również możliwość uczestnictwa w nowatorskich badaniach dotyczących efektywności redukcji tlenków żelaza z żużla przy wykorzystaniu wodoru. Badania te stanowią bezpośrednią odpowiedź na najpilniejsze wyzwania transformacji technologicznej współczesnego sektora

stalowego. Wiążą się one z koniecznością drastycznego cięcia emisji CO₂ oraz racjonalnego zagospodarowania odpadów w duchu gospodarki o obiegu zamkniętym.

Przedmiotem moich analiz stały się układy ciekłych żużli. Podczas serii eksperymentów systematycznie weryfikowano skuteczność wprowadzania wodoru w roli głównego czynnika redukującego. Wykorzystując narzędzia petrologiczne, w tym dyfrakcję rentgenowską i skaningową mikroskopię elektronową, wykonywałem szczegółowe charakterystyki zachodzących w materiale zmian morfologicznych oraz fazowych. Przeprowadzone prace jednoznacznie wykazały, że chociaż proces redukcji w układzie ciekłym faktycznie zachodzi, to w narzuconych warunkach eksperymentalnych nie udało się uzyskać pożądanej pełnej konwersji do czystego żelaza metalicznego. Z punktu widzenia rozwoju metalurgii wodorowej wyniki te mają istotne znaczenie poznawcze, pozwalając zidentyfikować bariery kinetyczne i wytyczając tym samym ramy dla dalszej optymalizacji procesów odzysku żelaza z odpadów hutniczych.

Migas, P.*, Bernasowski, M., Ślęzak, M., **Warchulski, R.**, & Kupczak, K. (2024). *Iron oxide reduction by hydrogen from liquid slag. Proceedings*, 108(1), 20. <https://doi.org/10.3390/proceedings2024108020>

* - autor korespondencyjny

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Współpraca krajowa:

Uniwersytet Warszawski, współpraca z zespołem dr Macieja Kałaski, 2020 – obecnie. Współpraca oparta jest na wizytach studyjnych i realizacji badań z zakresu geochemii i petrologii próbek speiss/matte z Castillo de Huarney oraz innych lokalizacji historycznego hutnictwa. W rezultacie wizyt i prac badawczych opublikowano dwa artykuły, w tym jeden wchodzący w skład dzieła habilitacyjnego (A2) (szczegóły w podrozdziale dotyczącym pozostałej aktywności badawczej). Dodatkowo uczestniczyłem w przygotowaniu wniosku grantowego ERC Starting Grant 2025 pt. *Fe and Os isotopes and geochemical analyses in the study of ancient iron sources* którego kierownikiem był dr Kałaska, a ja w projekcie wskazany byłem jako wykonawca.

Akademia Górniczo – Hutnicza, współpraca z zespołem dr hab. inż. Piotra Migasa oraz dr inż. Marty Ślęzak, 2022 – obecnie. Współpraca oparta jest na wizytach studyjnych i badawczych ze względu na komplementarne zasoby infrastrukturalne i kompetencyjne. Do chwili obecnej w ramach współpracy powstały dwie publikacje (opisane szerzej w podrozdziale dotyczącym pozostałej aktywności badawczej), a także zostałem wskazany do pełnienia funkcji głównego wykonawcy zadania obejmującego zbadanie procesów i parametrów fizykochemicznych w układach reakcji redukcji wodorem ciekłych tlenkowych układów wieloskładnikowych w projekcie LIDER XIV pt. *Opracowanie wytycznych technologicznych dla procesu redukcji tlenków żelaza wodorem w ciekłych układach wieloskładnikowych*, o który aplikowała dr inż. Marta Ślęzak.

Współpraca międzynarodowa

Uniwersytet Karola w Pradze, współpraca z zespołem prof. Vojtěcha Ettlera, 2022 – obecnie. Współpraca ta ma charakter długofalowej, zadaniowej kooperacji badawczej opartej na wzajemnych wizytach studyjnych i szkoleniowych. Kluczowym efektem jest transfer zaawansowanej metodyki badań stabilności fazowej (szerokie spektrum testów wymywalności) do mojego macierzystego ośrodka oraz realizacja wspólnego programu badawczego z zakresu długotrwałej stabilności środowiskowej odpadów kopalnianych i hutniczych oraz ich wpływu na środowisko glebowe. Na moment złożenia wniosku w rezultacie współpracy opublikowane zostały trzy wspólne artykuły, a kolejne 2 są w trakcie opracowywania. Stała współpraca zaowocowała również wspólnym przygotowaniem wniosku grantowego w ramach konkursu Weave-UNISONO pt. *Los pozostałości po przeróbce rud w systemach glebowych* w którym pełniłem funkcję PI (Principal Investigator) projektu części polskiej (NCN), a prof. Vojtěch Ettler części czeskiej (GACR).

Uniwersytet Tarbiat Modares, Tehran, Iran, zespół Mohammadreza Afshoona, 2025 – obecnie (zawieszona). W roku 2025 zainicjowałem współpracę badawczą dotyczącą charakterystyki mineralogicznej i geochemicznej unikatowych żużli z historycznych ośrodków hutnictwa miedzi w Iranie. Współpraca ta obejmowała wymianę próbek, ich analizę oraz prace nad wspólną publikacją. Obecnie realizacja projektu została zawieszona z przyczyn geopolitycznych niezależnych od zespołów badawczych, jednak zgromadzony materiał i uzyskane wyniki stanowią potencjał do przyszłych opracowań.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

6.1. Działalność dydaktyczna i innowacje w kształceniu

W okresie od uzyskania stopnia doktora:

- Prowadziłem przedmioty w języku polskim (1550 godzin): Mineralogia stosowana, Mineralogia techniczna, Petrologia skał magmowych i metamorficznych, Geneza geomateriałów, Mineralogia i petrografia, Petrologia 1, Petrologia 2, Geomateriały, Petrologia B, Tutoring Ekspercki, Praca dyplomowa, Ćwiczenia terenowe specjalizacyjne, Pracownia magisterska, Fotografia i retusz zdjęć, Fotografia cyfrowa i retusz zdjęć w nauce
- Prowadziłem przedmioty w języku angielskim (195 godzin): Applied mineralogy, Geomaterials, Petrology 1, Petrology 2
- Koordynowałem przedmioty: Applied mineralogy, Petrology 1, Petrology 2, Mineralogia stosowana, Mineralogia techniczna, Petrologia skał magmowych i metamorficznych, Praca dyplomowa, Pracownia magisterska, Ćwiczenia terenowe specjalizacyjne, Fotografia i retusz zdjęć, Fotografia cyfrowa i retusz zdjęć w nauce
- Opracowałem autorskie programy dla przedmiotów: Mineralogia stosowana, Mineralogia techniczna, Applied mineralogy, oraz zajęć dla Szkoły Doktorskiej - Fotografia i retusz zdjęć, a także w ramach Otwartych Modułów

Uniwersyteckich i Ogólnoakademickiej Oferty Dydaktycznej - Fotografia cyfrowa i retusz zdjęć w nauce

- Ewaluacja: moja praca jest systematycznie oceniana przez studentów w systemie USOS na poziomie 4,70–5,00, co potwierdza skuteczność stosowanych metod kształcenia nawet w przypadku trudnych merytorycznie przedmiotów petrologicznych i mineralogicznych.

6.2. Kształcenie młodej kadry naukowej i mentoring

Moja aktywność mentorska koncentruje się na promowaniu interdyscyplinarnego podejścia do nauki. Sprawowałem opiekę nad 4 pracami magisterskimi i 1 pracą licencjacką, a także 3-krotnie prowadziłem zajęcia z zakresu indywidualnego tutoringu eksperckiego dla doktorantów. Szczególnym sukcesem jest pełnienie funkcji promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim dr inż. Krzysztofa Kupczaka realizowanym w ramach projektu NCN PRELUDIUM BIS 1 (2020–2024), tytuł rozprawy: *Rekonstrukcja historycznych (V wiek p.n.e. - XIX wiek n.e.) metod wytopu metali na terenie Polski*. Za pełnienie tej funkcji otrzymałem List gratulacyjny Polskiego Towarzystwa Mineralogicznego dla promotora najlepszej rozprawy doktorskiej w 2025 roku.

6.3. Aktywność organizacyjna i zarządzanie infrastrukturą

Moje zaangażowanie organizacyjne obejmuje zarówno zarządzanie infrastrukturą badawczą, jak i pracę w zespołach organizacyjnych:

- Zarządzanie infrastrukturą: Od marca 2020 r. pełnię funkcję Kierownika Laboratorium Eksperymentów Wysokotemperaturowych. Zarządzanie tą jednostką bezpośrednio wspiera realizację moich badań nad antropogeniczną petrogenezą, umożliwiając prowadzenie zaawansowanych eksperymentów krystalizacji.
- Praca w strukturach uczelni: Od 2020 r. jestem członkiem Komisji Dyscyplinowej ds. oceny Zespołów Badawczych w Instytucie Nauk o Ziemi, a od 2021 r. czynnie wspieram rozwój jednostki jako członek Zespołu ds. promocji i rozwoju Wydziału Nauk Przyrodniczych.
- Funkcje w towarzystwach naukowych: W latach 2016–2022 pełniłem funkcję Wiceprezesa Polskiego Towarzystwa Lizymetrycznego.
- Kompetencje zarządcze: Posiadam międzynarodowe certyfikaty Project Managera: PRINCE2® Foundation oraz AgilePM® (Agile Project Management).

Za moją aktywność organizacyjną zostałem dwukrotnie wyróżniony Zespołową Nagrodą Rektora Uniwersytetu Śląskiego (w 2022 oraz 2024 roku).

6.4. Popularyzacja nauki i misja społeczna

Organizacja i koordynacja cyklicznych inicjatyw edukacyjnych

Kluczowym elementem mojej działalności jest inicjowanie i koordynowanie wydarzeń o zasięgu regionalnym, budujących markę Wydziału oraz promujących nauki o Ziemi:

- Wieloletnia koordynacja wydarzenia „Geopiknik na Żylecie” (Wydział Nauk Przyrodniczych, Sosnowiec).
 - Jestem koordynatorem tej otwartej inicjatywy popularnonaukowej nieprzerwanie od 2022 roku (edycje: 2022, 2023, 2024, 2025, 2026). Wydarzenie to stało się stałym punktem w kalendarzu imprez wydziałowych, przyciągając szerokie grono odbiorców spoza uczelni.
- Organizacja wydarzeń w dobie pandemii:
 - Organizacja w pełni zdalnego wydarzenia „Spotkania z Geologią” (25.06.2021), co pozwoliło na podtrzymanie ciągłości edukacji nieformalnej w okresie ograniczeń sanitarnych.

Nauka w służbie społeczności lokalnej i ochrona dziedzictwa

Aktywnie współpracuję z samorządami i stowarzyszeniami, transferując wyniki specjalistycznych badań geochemicznych i petrologicznych do sfery publicznej i historycznej:

- Współpraca z Towarzystwem Miłośników Sławkowa oraz Wojewódzkim Konserwatorem Zabytków:
 - Prelekcja: *„Życie w cieniu metali i metaloidów. Historia toksycznego dziedzictwa Sławkowa zapisana w kościach”* (05.03.2025) – prezentacja wyników interdyscyplinarnych badań archeologicznych i antropologicznych.
 - Prelekcja: *„Odtworzenie przebiegu procesu wytopu ołowiu w Starej Hucie w Sławkowie”* (11.12.2019) – podsumowanie badań nieinwazyjnych, mających kluczowe znaczenie dla zrozumienia historii przemysłowej regionu.

Działalność dydaktyczna i warsztatowa

Przez wiele lat angażowałem się w bezpośrednią pracę z młodzieżą szkolną, promując nauki przyrodnicze poprzez aktywne formy nauczania:

- Wieloletnia współpraca z Muzeum Nauk o Ziemi (Wydział Nauk Przyrodniczych UŚ) w latach 2015–2022:
 - Cykliczna realizacja warsztatów edukacyjnych dla uczniów szkół podstawowych (klasy 6-8) oraz szkół ponadpodstawowych. Prowadzenie zajęć w blokach tematycznych: *„Chemia kolorowa”*, *„Właściwości skał”* oraz *„Rozpoznawanie minerałów”*. Celem zajęć było rozwijanie kompetencji przyrodniczych poprzez praktyczny kontakt z okazami geologicznymi i eksperymenty chemiczne.
- Śląski Festiwal Nauki (2020):
 - Współprowadzenie interaktywnego stanowiska pokazowego *„Świat (bio)minerałów”*, popularyzującego wiedzę o procesach biomineralizacji.

- Projekt „Geohazard Silesia” (2019):
 - Prowadzenie specjalistycznych warsztatów terenowych w Chęcinach dla studentów, promujących wykorzystanie eksperymentów w odtwarzaniu petrogenyzy.

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

7.1. Współpraca z otoczeniem gospodarczym i komercjalizacja wiedzy

Moja aktywność ekspercka obejmuje transfer specjalistycznej wiedzy z zakresu mineralogii i geochemii do sektora przemysłowego, m.in. poprzez realizację prac badawczo-rozwojowych (B+R) koncentrujących się na analizie odpadów poprodukcyjnych oraz materiałów budowlanych. Występując w roli kierownika prac badawczych i eksperta dla podmiotów gospodarczych, zrealizowałem m.in. następujące projekty:

- Nicromet Sp. z o.o. Sp. k. (2025): Kierownik cyklu badań pt. „*Usługa analizy zgarów solnych po produkcji aluminium*” (Etapy 1–3).
- PIRS Polska Sp. z o.o. (2023): Główny wykonawca ekspertyzy „*Analiza składu fazowego z wykorzystaniem XRD i SEM-EDS*”.
- GEODEV Patryk Karolczyk (2023): Główny wykonawca ekspertyzy „*Badanie mineralogiczne i petrologiczne próbek zmienionego cementu*”.

7.2. Udział w grantach

- Kierownik projektu NCN PRELUDIUM 11 (2017–2020): *Modelowanie przemian fazowych i segregacji pierwiastków w żużlach hutniczych o zróżnicowanym chemizmie w warunkach ciśnienia atmosferycznego i temperaturach z zakresu 800-1500 st. C* (kwota: 149 788 zł).
- Wykonawca w projekcie NCN OPUS 7 (2015–2018): *Szlaki hutnicze cynku i ołowiu - poligon doświadczalny dla badań zachowania pierwiastków potencjalnie toksycznych w strukturach faz krystalicznych i ich interakcji ze środowiskiem* (kwota: 627 350 zł). Kierownik projektu: prof. dr hab. Aleksandra Gawęda.

7.3. Aktywność konferencyjna

Wyniki badań prezentowałem na kluczowych konferencjach o zasięgu globalnym i europejskim, najważniejsze spośród nich od uzyskania tytułu doktora:

- USA: *The Geological Society of America meeting 2019* (Phoenix, Arizona).
- Australia: *International Mineralogical Association meeting 2018* (Melbourne).
- Europa: *28th Meeting of the Petrology group of the Mineralogical Society of Poland* (Bielawa 2023), *3rd European Mineralogical Conference EMC2020* (Kraków, 2021), *10th International Symposium Mineral Diversity* (Sofia, Bułgaria, 2019)

7.4. Nagrody i wyróżnienia:

- 2024, 2022: Zespołowe Nagrody Rektora Uniwersytetu Śląskiego za aktywność organizacyjną.
- 2021, 2019: Nagrody Rektora Uniwersytetu Śląskiego (za osiągnięcia naukowo-badawcze oraz za rozprawę doktorską).
- 2017: Nagroda Główna w konkursie GEOLOGIA Ministerstwa Środowiska (kategoria: Młodzi).

7.5. Działalność recenzencka:

Recenzent dla czasopism: Acta Geophysica, Applied Geochemistry, Archaeological and Anthropological Sciences, Environmental Science and Pollution Research International, Geologos, Journal of Archaeological Science: Reports, Journal of Geochemical Exploration, Mineralogia, Minerals, Processes.

