

## CHARAKTERYSTYKA MINERALIZACJI KRUSZCOWEJ CECHSZTYNU NA OBSZARZE WEISSWASSER W NIEMCZECH

### THE CHARACTERISTICS OF ORE MINERALIZATION IN THE WEISSWASSER COPPER DISTRICT, GERMANY

HENRYK KUCHA<sup>1</sup>, BARTŁOMIEJ W. BIL<sup>2</sup>

**Abstrakt.** Przedmiotem badań są próbki rdzeni wiertniczych pozyskanych podczas prac poszukiwawczych rud miedzi na obszarze Weisswasser w Saksonii. Obszar stanowi północno-zachodnią część niecki północnosudeckiej, której profil litostratygraficzny wykazuje podobieństwo do typowego wykształcenia znanego ze złoże Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM). Materiał badawczy poddano szczegółowym obserwacjom mikroskopowym w świetle odbitym i analizom składu chemicznego w mikroobszarze przy użyciu mikroskopu skaningowego. W wyniku przeprowadzonych badań zidentyfikowano minerały kruszcowe: chalkopiryt, chalkozyn, bornit, digenit, galenę, sfaleryt, srebro rodzime, amalgamaty-Ag, mckinstyryt, stromeyeryt, anilit i betechtinit. Przedstawiono szczegółową charakterystykę występowania mineralizacji siarczkowej, określając jej formę, zrosty i paragenezy, relację w stosunku do uwarunkowań mikrotektonicznych, a także implikacje zmian morfologicznych dna zbiornika cechsztyńskiego. Stwierdzono 3 formy mineralizacji: śródwarstwowe soczewki siarczków miedzi powstałe poprzez hydrauliczne odpajanie wzdłuż płaszczyzn laminacji osadu wywołane przez zmineralizowane roztwory pod wysokim ciśnieniem; siarczki miedzi zastępujące wcześniejsze soczewki pirytu framboidalnego oraz zastępowanie bioklastów. Siarczki miedzi nagromadziły się kosztem siarki zgromadzonej podczas sedimentacji i wczesnej diagenety w postaci bakteryjnego pirytu. Mineralizacja rudna występuje w cienkim horyzoncie o rozbudowanej sieci mikrospekąń. W łupku miedzionośnym obserwuje się także pojedyncze ziarna ostrokrawędzistego chalkopiryty zaburzającego laminacje poniżej i powyżej, co świadczy o przemieszczeniu ziarna z pokruszonego konglomeratu i ponownej sedimentacji razem z łupkiem oraz dalszy wzrost w plastycznym osadzie. Zaobserwowane formy mineralne wiążą się z przynajmniej dwoma systemami spekąń powstałymi w wyniku pompowania sejsmicznego roztworów mineralizujących oraz spekaniem w obrębie wzrastających kryształów.

**Słowa kluczowe:** mikrotektonika, łupki miedzionośny, pompowanie sejsmiczne, Weisswasser, niecka północnosudecka.

**Abstract.** The research deals with drill core samples collected during exploration of copper in the Weisswasser area in Saxony. The area is the north-western part of the North-Sudetic Basin, the lithostratigraphic section of which is similar to the typical one known from the Lubin district. As a result of mineralogical observations using reflected light microscopy and scanning electron microscopy, the following minerals were identified: chalcopyrite, chalcocite, bornite, digenite, galena, sphalerite, native silver, Ag-amalgams, mckinstyryte, anilite and betechtinite. Detailed characteristics of the occurrence of sulphide mineralization is presented, describing its form, mutual inclusions and paragenesis, relationship to microtectonic conditions, as well as implications of morphological changes on the bottom of the Zechstein. Three forms of mineralization were found: (1) horizontal, mid-layered copper sulphide lenses formed by hydraulic peeling along the sludge lamination surfaces caused by mineralized high-pressure solutions, (2) horizontal copper sulphide lenses replacing previous framboidal pyrite lenses, and (3) replacement of bioclasts. Copper sulphides were concentrated at the expense of sulphur deposited during sedimentation and early diagenesis as bacterial pyrite. Ore mineralization occurs in the thin horizon with an extensive microtectonic net. Two tectonic episodes can be distinguished: Mesozoic tectonic events that enabled seismic pumping of hot fluids, and microfractures that developed during ore minerals precipitation. Furthermore, single sharp-edged grains of chalcopyrite disturbing lamination of copper shale are observed. It indicates the displacement of grains from crushed conglomerate and resedimentation together with copper shale.

**Key words:** microtectonics, Kupferschiefer, seismic pumping, Weisswasser, North Sudetic Basin.

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: kucha@geol.agh.edu.pl

<sup>2</sup> KGHM Cuprum Centrum Badawczo-Rozwojowe sp. z o.o. we Wrocławiu, Zakład Geologii, ul. gen. W. Sikorskiego 2-8; e-mail: bbil@cuprum.wroc.pl

## WSTĘP

Południowe obrzeżenie basenu cechsztyńskiego od wieków stanowi obszar wzmożonej aktywności górniczej. Przez kilkaset lat złoża Korbach, Richelsdorf, Mansfeld, Konrad były głównymi źródłami metali. O wysokim potencjale złóż typu Kupferschiefer świadczą trwające do dziś kampanie eksploracyjne w rejonach Głogowa, Zielonej Góry, Spremberga, Weisswasser i Bolesławca. W licznych pracach badawczych potwierdzono ścisły związek pomiędzy przebiegiem kontaktu redox a strefowym występowaniem minerałów kruszcowych w obrębie spągu cechsztynu (Rydzewski, 1964; Konstantynowicz, 1965; Kucha, Paw-

likowski, 1986, 2010; Pieczonka, 2011; Borg i in., 2012; Chmielewski, 2014). W ramach kampanii eksploracyjnej, prowadzonej przez KGHM Polska Miedź S.A. w Zagłębiu Łużyckim, było możliwe przeanalizowanie składu mineralogicznego spągu cechsztynu i charakterystyka form mineralizacji kruszcowej. Badania przeprowadzono na próbkach z otworów 1/11, 2/11, 3/11 i 4/11 (fig.1). W wyniku analiz petrograficznych określono formy występowania minerałów rudnych oraz zależność do warunków mikrotektonicznych i geochemicznych, jakie miały miejsce podczas tworzenia się złoża.

## GEOLOGIA OBSZARU

Obszar badań znajduje się w północno-zachodniej części niecki północnosudeckiej, w obrębie północno-wschodniego skrzydła antykliny Mulkwitz. Struktura jest zbudowana z utworów staropaleozoicznych, permskich i triasowych, przecięta strefą uskokuwą Weisswasser o kierunku NE–SW, a od południa oddzielona od bloku łużyckiego głównym uskokiem łużyckim (fig.1). Struktura Mulkwitz powstała wskutek ruchów tektonicznych w Saksonie, a następnie uległa reaktywacji podczas orogenezy alpejskiej tworząc charakterystyczne struktury zrębów i rowów tektonicznych (Kopp i in., 2006).

Horyzont okruszczony na obszarze Weisswasser jest obserwowany w obrębie szarych piaskowców gruboziarnistych i konglomeratów weissliendgu (S1) stanowiących stropową część saksonu i odpowiadających białym piaskowcom czerwonego spągowca w złożu LGOM, łupka miedzionośnego (T1) oraz wapienia cechsztyńskiego (Ca1). Miąższość grubo okruszczonych osadów weissliendgu dochodzi do ponad 4 m. Profil cechsztynu rozpoczynają osady łupka miedzionośnego (T1) zbudowane z minerałów ilastych, materii organicznej, kwarcu i węglanów. Miąższość łupka miedzionośnego jest zmienna i waha się od 0 do 2 m, prze-

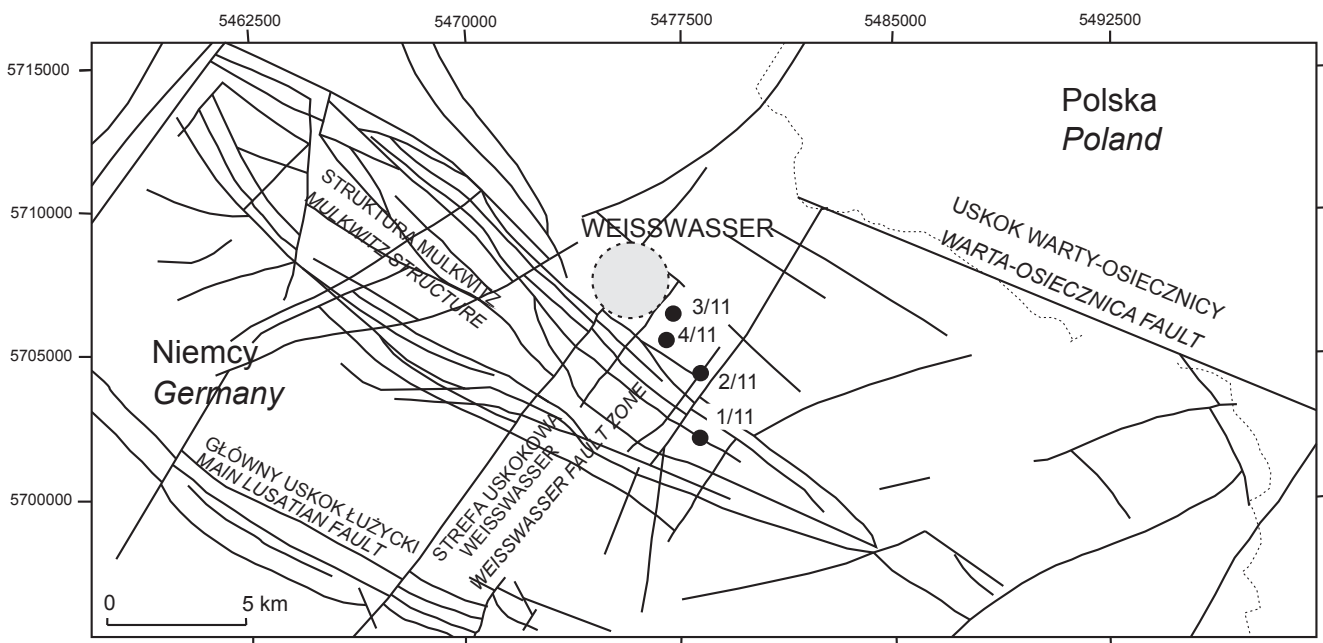


Fig. 1. Mapa tektoniczna obszaru Weisswasser z lokalizacją otworów badawczych (Hartsch, 2012)

Tectonic map of the Weisswasser copper district with drill holes location (Hartsch, 2012)

chodząc w gęsto laminowane margle stanowiące lokalnie ekwiwalent łupka miedzionośnego (Borg i in., 2012). W otworach odwierconych przez KGHM Polska Miedź S.A. w latach 2011–2012 zinterpretowano poziom czarnych margli częściowo okruszczonych Cu i Zn, o miąższości 0,5–4,5 m zalegający na cienkiej warstwie łupka, bądź bezpośrednio na białych osadach wiessliegendu, jako margiel cechsztyński Ca1m (Hartsch, 2012; Ratajczyk i in., 2012).

Margiel cechsztyński stanowi ogniwo przejściowe między łupkiem a płonnymi, szarobeżowymi wapieniami i dolomitami poziomu wapienia cechsztyńskiego Ca1, osiągając miąższości 90–110 m (fig. 2). Miąższość serii złożowej wynosi 0,3–1,9 m. Na wapieniu zalegają cyklicznie anhidryty, sól i dolomity cechsztynu, którego profil kończą łożypki brunatne poziomu T4.

## METODY BADAŃ

Bezpośrednio po wydobyciu, rdzenie wiertnicze poddano obserwacji makroskopowej i badaniom przenośnym analizatorem XRF marki NITON XLt 800. Na tej podstawie wyznaczono interwały opróbowania. Zgłady polerowane przygotowano w Pracowni Szlifierskiej AGH. Obserwacje mikroskopowe w świetle odbitym przeprowadzono przy użyciu mikroskopu polaryzacyjnego Nikon Eclipse LV wyposażonego w aparat cyfrowy Canon EOS. Na podstawie obserwacji wykonano charakterystykę minerałów kruszczowych i tła skalnego, opisano paragenety mineralne, formę

i ewolucję mikrostrukturalną w obrębie próbki. Część prób poddano trawieniu kwasem solnym w celu odsłonięcia wnętrza zrekrystalizowanych kawern i bioklastów. Wyselekcjonowane fragmenty próbek poddano analizie składu chemicznego spektrometrem dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (EDS) Noran Vantage w Laboratorium Mikroskopii Elektronowej Skaningowej z Emisją Polową i Mikroanalizy w ING Uniwersytetu Jagiellońskiego. Na podstawie otrzymanych wyników opracowano charakterystykę mineralogiczną serii złożowej obszaru Weisswasser.

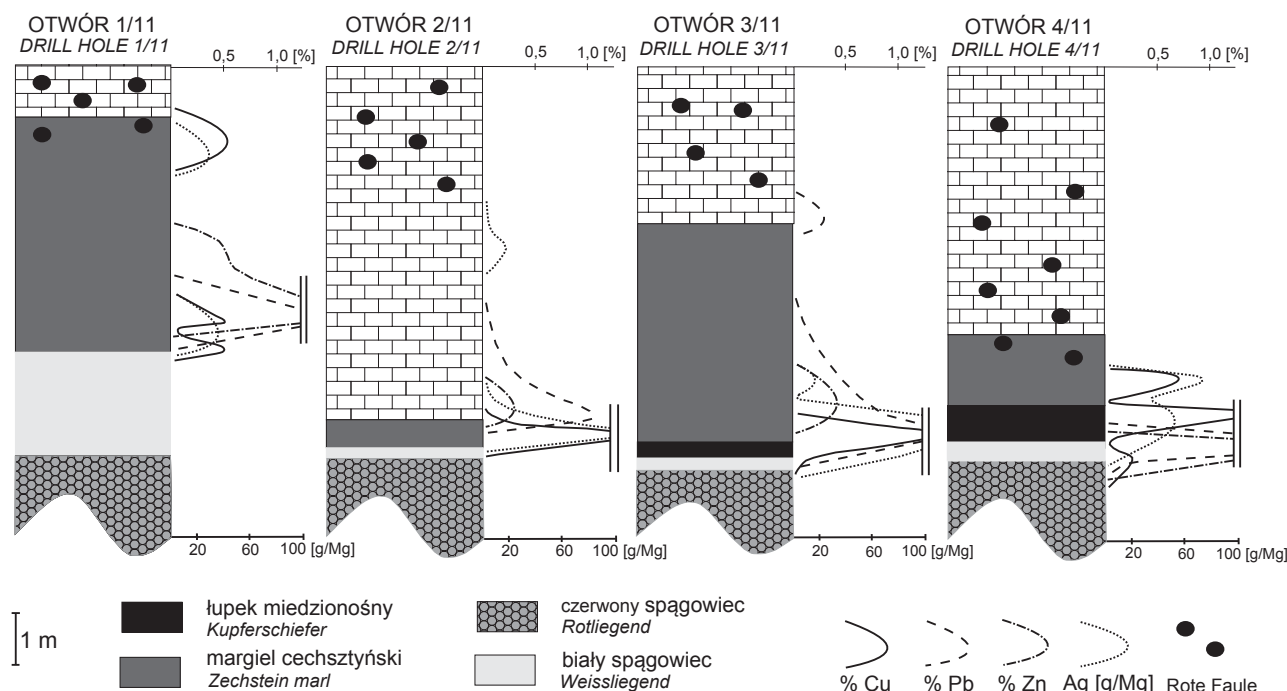


Fig. 2. Wyształcenie litologiczne spągu cechsztynu w otworach odwierconych przez KGHM Polska Miedź S.A. w latach 2011–2012

Lithology of the Zechstein base in boreholes drilled by KGHM Polska Miedź S.A. in 2011–2012

## FORMY WYSTĘPOWANIA MINERAŁÓW KRUSZCOWYCH

Seria złożowa w złożach typu Kupferschiefer charakteryzuje się obecnością mineralizacji kruszczowej znacznie wykraczającą poza łupek miedzionośny (Rydzewski, 1964), z typową strefowością geochemiczną i istnieniem stref przejściowych (Chmielewski, 2014). Strefowość jest związana z obecnością strefy redox i kolejnością precypitacji metali z roztworów (fig. 3). Roztwory zmineralizowane wchodząc w reakcję z wczesno diagenetycznym pirytem podczas procesu zastępowania, spowodowały powstanie zauważalnych stref mineralizacji poszczególnymi metalami według generalnego trendu: piryt – sfaleryt (+galena) – galena (+sfaleryt) – chalkopiryty/bornit – chalkozyn – hematyt + Au i PGM (Konstantynowicz, 1971; Harańczyk, 1972; Oszczepalski, 1989; Wodzicki, Piestrzyński, 1994; Pieczonka, 2011).

Horyzont zmineralizowany rozpoczyna się na kontakcie konglomeratów weissliedendu z mniej przepuszczalnym łupkiem miedzionośnym lub marglem cechsztyńskim. Dominującym minerałem jest piryt występujący w formie euhedralnej w cemente kalcytowym, tworzący kryształy o wielkości do 45  $\mu\text{m}$ , bez domieszek innych metali w składzie, piryt framboidalny w interstycjalnym kalcyście oraz framboidy wewnątrz okruchów margli bądź cementowanych digenitem i galeną (fig. 3A). Siarczki występują, jako rozproszone w matrycy skalanej kryształy, wzajemne zrosty i przerosty oraz zastąpienia ziaren detrytycznych w konglomeracie (fig. 4A). Digenit występuje w formie zrostów z galeną, stromeyerytem, mckinstyrytem i amalgamatami srebra. Chalkopiryty występują zazwyczaj w formie soczewek, przy kontakcie z łupkiem/marglem oraz jako gniazda, budując wraz z pirytem spoiwo (fig. 5A). Gniazda rozrastają się wzdłuż spękań wypełnionych kalcytem przecinających kontakt litologiczny zanikając po stronie margli. Bornit obecny jest w postaci przerostów myrmekitowych z digenitem. Poszczególne wystąpienia bornitu różnią się od siebie optycznie w zależności od zawartości Fe w formule stechiometrycznej. Odmiany pomarańczowe są związane z nadmiarem żelaza, natomiast fioletowe – ze zubożeniem (Kucha i in., 1981). Obecne w konglomeracie siarczki Ag-Cu, stromeyeryt i mckinstyryt stanowią obwódki reakcyjne między digenitem i srebrem rodzimym (fig. 3D). Między ziarnami konglomeratu notuje się igielkowe wypełnienia anilitu (fig. 5B) o aglomeracjach dochodzących do 450  $\mu\text{m}$ , charakterystyczne dla złóż LGOM (Kucha, 1979).

Dość powszechne w stropowych partiach konglomeratu, są skaleni potasowe, które w swoim składzie posiadają Cu. Wprowadzenie miedzi w strukturę ortoklazu czy mikroklinu, kosztem sodu, następowało wobec braku  $\text{S}^{2-}$  we wczesnym etapie mineralizacji. Nasycanie skaleni miedzią następowało od brzegów ziaren do ich środka i po płaszczyznach łupliwości (fig. 5C). W złożach LGOM proces ten, w momencie dostarczenia zredukowanej siarki, prowadził do całkowitego zastąpienia skaleni przez chalkozyn i digenit, a nadmiar krzemionki powodował rekryształizację kwarcu (Kucha, 1985).

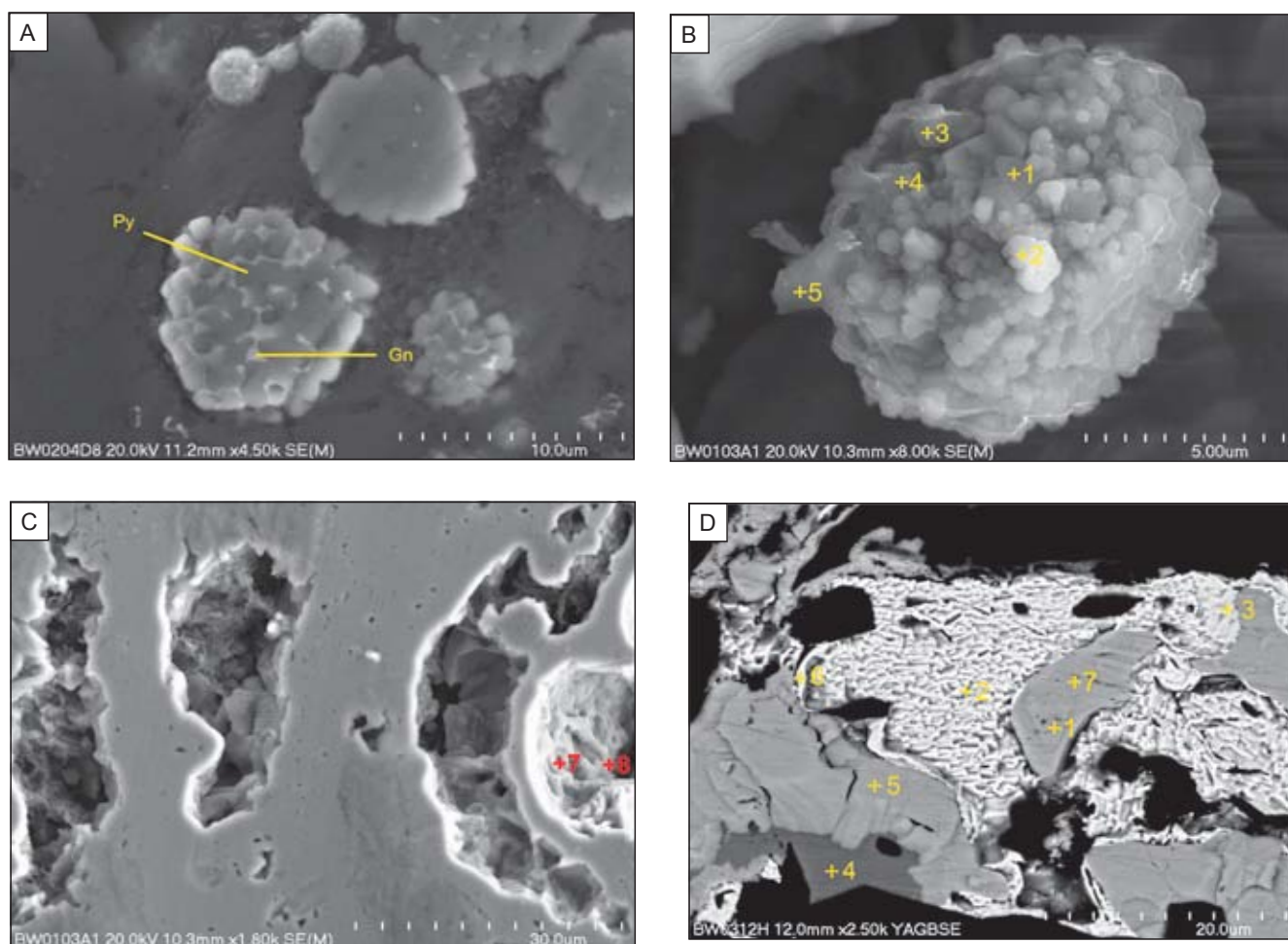
Łupek miedzionośny i margiel cechsztyński, zawierający podwyższone ilości substancji ilasto-organicznej, stanowią główny horyzont zmineralizowany. Siarczki występują w tym poziomie jako: soczewkowe nagromadzenia śródwartstwowe; agregaty pirytu framboidalnego cementowane przez galenę, bornit i digenit; zrosty digenitu z bornitem, rzadziej z galeną, sfalerytem, betechtinitem i amalgamatami srebra. Bornit zastępuje także szkielety bioklastów z gatunku Fusulinina, komory natomiast wypełnia piryt framboidalny i kalcyt. Ściany kawern po bioklastach, po wytrawieniu węgla wapnia, charakteryzują się skomplikowaną powierzchnią (fig. 3B i 5D), co świadczy o udziale bakterii w redukcji siarki, stanowiącej następnie substrat w reakcji powstawania bornitu i minerałów zbliżonych stechiometrycznie do bornitu (fig. 3C). Cechą typową w badanych próbkach jest występowanie bornitu, głównie jako cement, i zastąpienia pirytu framboidalnego, co dowodzi, że mineralizacja Cu była zależna od obecności siarki biogenicznej zgromadzonej podczas wczesnej diagenety.

Na kontakcie konglomerat/łupek stwierdzono ostrokrawędziste kryształy chalkopiryty zaburzające laminację łupka od dołu, co świadczy o ich jednoczesnej sedymentacji (fig. 4C). Jednocześnie, od góry redeponowany kryształ przerywa ciągłość cienkiej warstewki zbudowanej z pirytu framboidalnego. Szczegółowe obserwacje przy dużym powiększeniu wykazały, że framboidy te znajdują się wewnątrz kryształu chalkopiryty, co wskazuje na dalszy jego wzrost w plastycznym osadzie. Taką tezę potwierdza także zachowana ciągłość lamin ilastych przykrywających kryształy. Pierwotnie chalkopiryty stanowił cement w stropowej części konglomeratu, po czym został redeponowany w plastycznym osadzie (fig. 4D).

## PODSUMOWANIE

Podstawowe znaczenie w akumulacji siarczków ma mikrotektonika w obrębie łupków i margli. W próbkach, gdzie warstwowanie jest silnie tektonicznie odkształcone znajduje się bogata mineralizacja siarczkowa. Rozwinięta mikrotektonika wiąże się z ilością i formą występowania minerałów kruszczowych, co wynikać może z hydrospełkań matrycy ilasto-bitumicznej pod wpływem roztworów

zmineralizowanych, przeciskających się pod wysokim ciśnieniem w obszarze naprężeń tektonicznych (fig. 4B). Zaobserwowane zależności pomiędzy powstawaniem pola naprężeń w skałach i jego relaksacją poprzez system uskoków i drobnych spękań powstających w czasie epizodów sejsmicznych świadczą o przepływie znacznych ilości roztworów mineralizujących (Muir-Wood, King, 1993). Proces



**Fig. 3. A.** Piryt framboidalny cementowany galeną. Czarne pustki związane są z redukcją objętości w reakcji  $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3$ . **B.** Wytrawione kwasem solnym wnętrze bioklastu ukazujące piryt framboidalny złożony z form kulistych sfossilizowanych bakterii, form trójkątnych o ściętych narożach (1, 2) oraz romboidalne (3, 4, 5). **C.** Wytrawione HCl wnętrze bioklastu ukazujące skomplikowaną rzeźbę powierzchni pochodzenia bakteryjnego. **D.** Obraz SEM z zaznaczonymi miejscami wykonanych analiz digenitu (4), stromeyerytu (1), amalgamatów srebra (2, 3, 6) i mckinstrytu (5, 7)

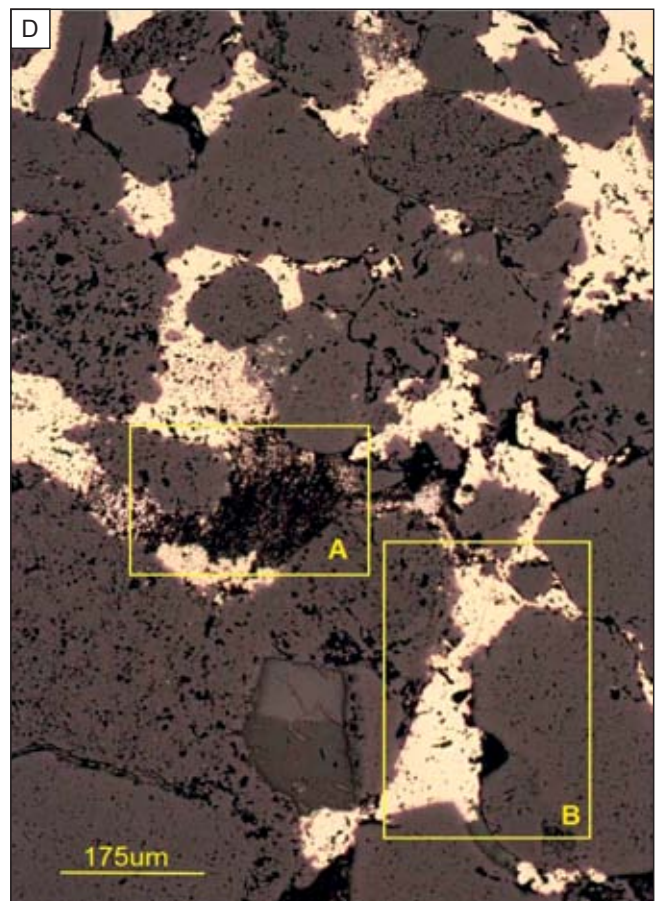
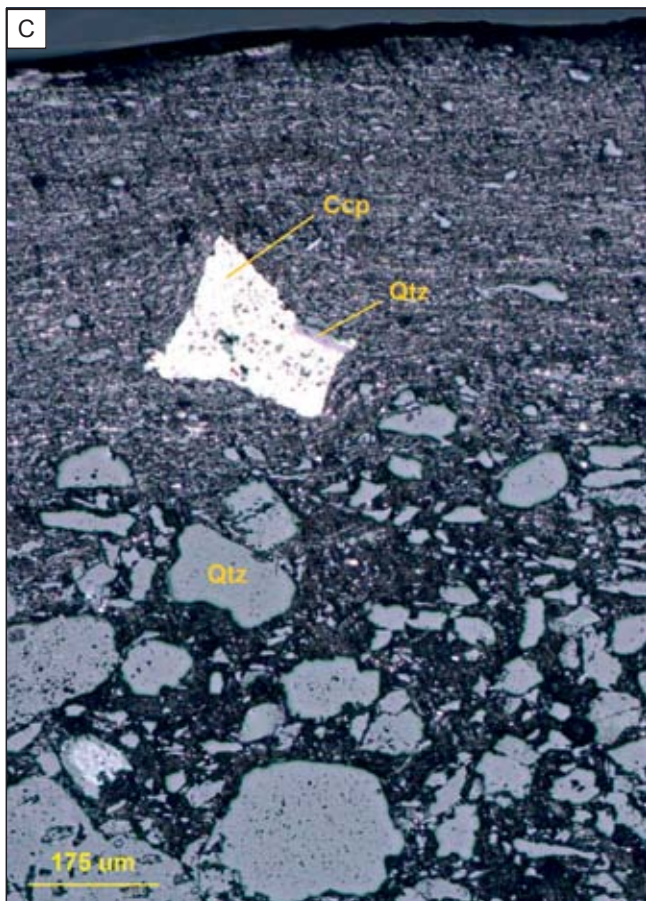
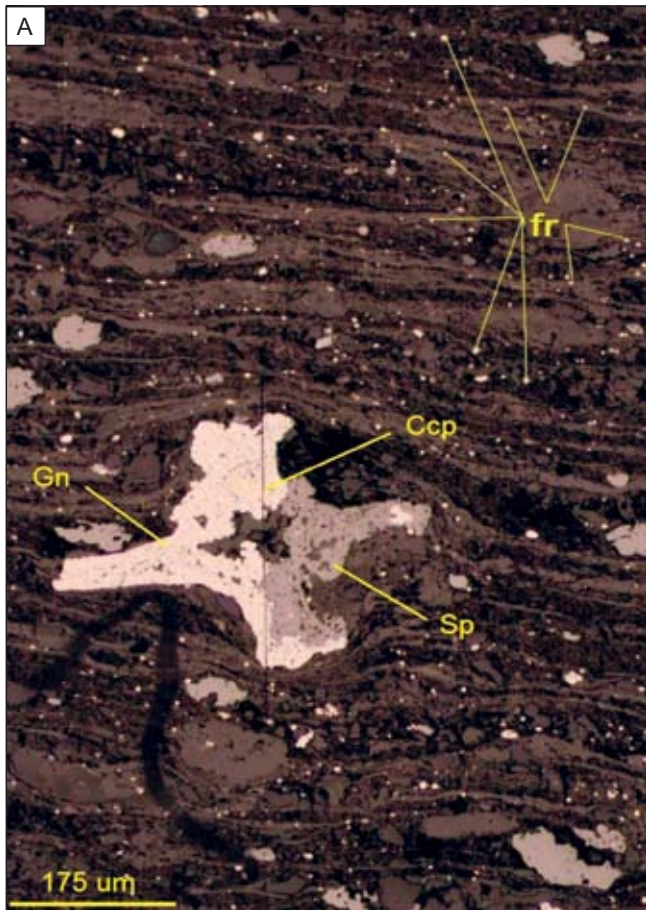
**A.** Framboidal pyrite cemented by galena. Black spots are the result of volume reduction during  $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3$  reaction. **B.** HCl-leached bioclast interior. Bioclast walls are built of framboidal pyrite: spherical fossilized bacteria; trigonal forms with cut corners (1, 2), and rhomboidal (3, 4, 5). **C.** HCl-leached bioclast interiors showing complicated, bacterial-origin surface of walls. **D.** SEM image with identified digenite (4), stromeyerite (1), Ag-amalgams (2, 3, 6) and mckinstrite (5, 7)

wspomagany jest przez pompowanie sejsmiczne w obrębie połączonego i uporządkowanego systemu deformacji (Sibson, 1996, 2000). Obliczenia numeryczne takiego systemu wykonane dla złoża LGOM wskazują, że taki system jest w stanie wytworzyć złożo ogromnych rozmiarów (Blundell i in., 2003). Zestawienie struktur tektonicznych poniżej 1 m dla kopalni Lubin i Polkowice wskazuje na ścisłą zależność pomiędzy takim systemem deformacji nieciągłych a mineralizacją siarczkową i Rote Fäule (Salski, 1977; Pieczonka i in., 1998; Kucha, 2003).

Na istniejący system spękań nałożył się drugi system, związany z odkształceniami wywołanymi zmianami objętości minerałów skalotwórczych wraz ze wzrostem minerałów kruszcowych podczas precypitacji z roztworów oraz

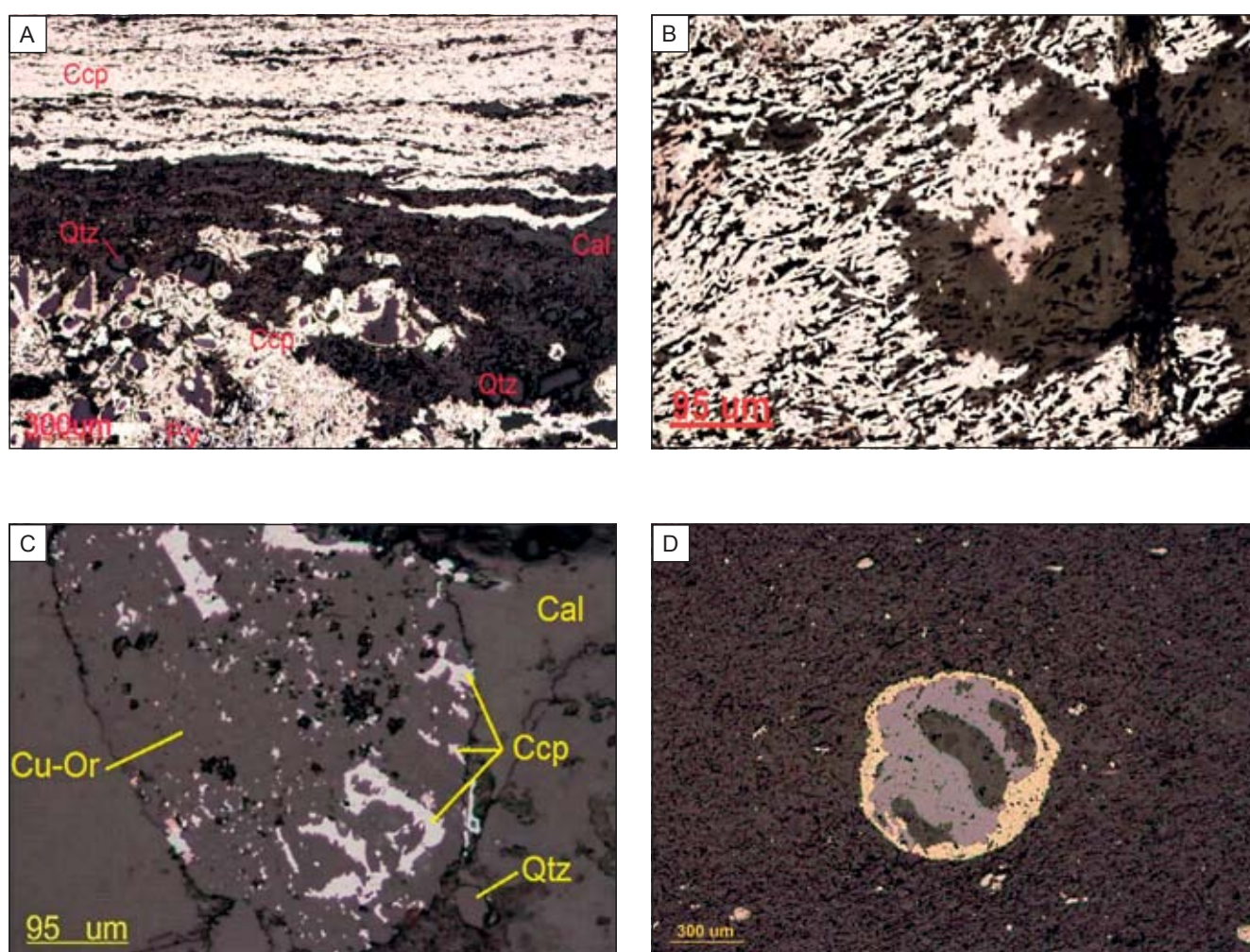
wzrostem kalcytu w czasie redukcji  $\text{S}^{6+}$  kosztem utleniania materii organicznej. Wywołane tymi procesami naprężenia mają wpływ na mikrotektonikę w bezpośrednim sąsiedztwie. W ten sposób powstaje sieć mikrospękań wokół rozrastających się kryształów minerałów rudnych. Mikrospękania i mikrospękania są obecne przede wszystkim w obrębie warstewek ilasto-organicznych i na kontakcie z warstewkami kalcytowymi. Systematycznie, wraz ze wzrostem agregatów siarczkowych i kalcytu podczas redukcyjnej działalności bakterii, pojawiają się poprzeczne spękania i bifurkacje mikrospęczelin.

Formy wykształcenia minerałów rudnych w obrębie łupków/margli charakteryzują się znacznym podobieństwem do mineralizacji w złożu LGOM. Różnica polega na znacznie



**Fig. 4. A.** Galena i sfaleryt z wrostkami chalkopirytu w lupku z rozproszonym w matrycy pirytem framboidalnym (fr). Lamina-cja lupka jest zaburzona, co świadczy o wzroście kryształu w plastycznym osadzie. **B.** Pionowa żyłka markasytu ze sfalerytem w formie rozproszonej i zastępującym bioklasty. **C.** Ostrokrawędzisty chalkopiryt w matrycy lupka zalegającego nad konglomeratem z widocznym ugięciem lamin lupka pod ciężarem ziarna w plastycznym osadzie. **D.** Konglomerat z cementem w postaci ostrokrawędzistego chalkopirytu (**B**) ze śladami wietrzenia (**A**)

**A.** Galena and sphalerite with chalcopyrite inclusions and dispersed faramboidal pyrite (fr) hosted by copper shale. Copper shale lamination is disturbed which indicates that crystals grew in plastic sediment. **B.** Vertical marcasite vein in copper shale. Sphalerite occurs within bioclasts and disseminated crystals. **C.** Sharp-edged chalcopyrite in copper shale with disturbed lamination. **D.** Conglomerate cemented by chalcopyrite (**B**), partly weathered (**A**)



**Fig. 5. A.** Soczewka chalkopirytu podkreślająca laminację na kontakcie margiel ilasty – konglomerat (Rote Fäule) oraz formy gniazdowe chalkopirytu i pirytu w konglomeracie cementujące ziarna kwarcu. **B.** Igielkowy anilit wypełniający przestrzeń między klastami. **C.** Chalkozyn zastępujący Cu-ortoklaz. **D.** Bioklast zastępowany przez sfaleryt i korodowany od brzegu przez chalkopiryt

**A.** Chalcopyrite lens underlying lamination at the copper shale/conglomerate contact, and chalcopyrite and pyrite nests as the cement. **B.** Needle anilite filling up gaps between clasts. **C.** Paragenesis of chalcocite in Cu-orthoclase. **D.** Bioclast replaced by sphalerite and chalcopyrite

mniejszej miąższości horyzontu okruszcowania ograniczającego się tylko strefy 0,3–1,9 m na obszarze Weisswasser. Precypitujące roztwory wykorzystwały zaledwie część siarki dostępnej w postaci piryty framboidalnego. Powiększenie miąższości horyzontu rudnego uniemożliwił brak porowatości i przepuszczalności w węglanach.

**Podziękowania.** Autorzy pragną podziękować pracownikom KGHM Cuprum i Panu Ryszardowi Tomanikowi z KGHM Polska Miedź S.A. za udostępnienie materiału badawczego oraz Panu Stanisławowi Speczikowi za wnikliwą recenzję.

## LITERATURA

- BLUNDELL D.J., KARNKOWSKI P.H., ALDERTON D.H.M., OSZCZEPALSKI S., KUCHA H., 2003 — Copper mineralization of the Polish Kupferschiefer: A proposed basement fault-fracture system of fluid flow. *Econ. Geol.*, **98**: 1487–1495.
- BORG G., PIESTRZYŃSKI A., BACHMANN G.H., PUTTMANN W., WALTHER S., FIEDLER M., 2012 — An overview of the European Kupferschiefer deposits. *SEG Spec. Publ.*, **16**: 455–486.
- CHMIELEWSKI A., 2014 — Charakterystyka reliktovej mineralizacji kruszcowej w zachodniej części obszaru złożowego Radwanice (południowo-zachodnia części złoża Lubin-Sieroszowice). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **458**: 1–24.
- HARAŃCZYK C., 1972 — Mineralizacja kruszcowa dolnocechsztyńskich osadów euksenicznych monokliny przedsudeckiej. *Arch. Mineral.*, **30**, 1/2: 13–144.
- HARTSCH J., 2012 — New Aspects of Copper Deposits at the Base of the Zechstein in Central Europe. *W: 3D, 4D and Predictive Modelling of Major Mineral Belts in Europe* (red. Pär Weihed). Mineral Resource Reviews: 147–161.
- KONSTANTYNOWICZ E., 1965 — Mineralizacja utworów cechsztynu niecki północnosudeckiej (Dolny Śląsk). *Pr. Inst. Geol.*, **28**: 7–99.
- KONSTANTYNOWICZ E., 1971 — Geochemiczno-mineralogiczna charakterystyka złoża. *W: Monografia przemysłu miedziowego w Polsce* (red. E. Konstantynowicz). T1: 178–197. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa.
- KOPP J., SIMON A., GOTHEL M., 2006 — The copper deposit Spremberg-Graustein in South Brandenburg. *Brandenburg. geowiss. Beitr., Kleinmachnow* 13–172: 117–132.
- KUCHA H., 1979 — Anilite,  $Cu_7S_4$ , from Lubin mine, Lower Silesia, Poland. *Miner. Pol.*, **10**: 89–95.
- KUCHA H., 1985 — Feldspar, clay, organic and carbonate receptors of heavy metals in the Zechstein deposits (Kupferschiefer-type), Poland. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy* (Sect. B: Appl. Earth Sci.), **94**: 133–146.
- KUCHA H., 2003 — Geology, mineralogy and geochemistry of Kupferschiefer, Poland. *W: Europe's Major Base Metal Deposits*, Irish Association for Economic Geology (red. J. Kelly i in.): 215–238. Colour Books Ltd, Dublin.
- KUCHA H., PAWLIKOWSKI M., 1986 — Two-brine model of genesis of strata bound Zechstein deposits (Kupferschiefer-type), Poland. *Miner. Deposita*, **21**: 70–80.
- KUCHA H., PAWLIKOWSKI M., 2010 — Badania genezy cechsztyńskich złóż miedzi w Polsce. *Geologia*, **36**, 4: 513–538.
- KUCHA H., MAYER W., PIESTRZYŃSKI A., WIECZOREK A., 1981 — The replacement of rutile by chalcocite in the copper ores of the Fore-Sudetic Monocline. *Miner. Pol.*, **12**, 1: 69–76.
- MUIR-WOOD R., KING, G.C.P., 1993 — Hydrological signatures of earth-quake strain. *J. Geoph. Res.*, **98B**: 22035–22068.
- OSZCZEPALSKI S., 1989 — Kupferschiefer in southwestern Poland: sedimentary environments, metal zoning, and ore controls. *W: Sediment-hosted stratiform copper deposits* (red. R.W. Boyle i in.). *Geol. Ass. Can. Special Papers*, **36**: 571–672.
- PIECZONKA J., PIESTRZYŃSKI A., GLUSZEK A., MICHALIK A., 1998 — Występowanie złota, platyny i palladu w obszarze złożowym Polkowice–Sieroszowice. *Pr. Spec. PTM*, **10**: 71–86.
- PIECZONKA J., 2011 — Prawidłowości w rozmieszczeniu minerałów kruszcowych w złożu rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej. Wydawnictwa AGH, Kraków.
- RATAJCZYK M., KWAŚNY L., ZACZEK S., BIL B.W., SOKALSKI D., DURKOWSKI K., GALICA A., 2012 — Sprawozdanie z realizacji prac geologiczno – poszukiwawczych w obszarze objętym zezwoleniem górnictwo-prawnym Weißwasser. Archiwum KGHM Cuprum sp. z o.o.
- RYDZEWSKI A., 1964 — Petrografia i mineralizacja osadów górnego permu na monoklinie przedsudeckiej i peryklinie Żar. *Prz. Geol.*, **12**, 12: 476–480.
- SALSKI W., 1977 — Rozwój tektoniczny obszaru miedzionośnego monokliny przedsudeckiej. *Rocz. PTG*, **47**: 27–48.
- SIBSON R.H., 1996 — Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes. *J. Struct. Geol.*, **18**: 1031–1042.
- SIBSON R.H., 2000 — Fluid involvement in normal faulting. *J. Geodyn.*, **29**: 469–499.
- WODZICKI A., PIESTRZYŃSKI A., 1994 — An ore genetic model for the Lubin-Sieroszowice mining district, Poland. *Miner. Deposita*, **29**: 30–43.

## SUMMARY

During the exploration work for copper in the Weisswasser area, samples were taken for mineralogical and geochemical analysis. The copper-bearing horizon of Weisslied Conglomerates, copper shale (Kupferschiefer T1) and laminated marl (Zechstein Carbonate Ca1) is up to two metres

thick. The thickness of the copper shale is variable and ranges from 0 to 2 m, passing into densely laminated marls, which are locally equivalent to copper-shale. In four wells drilled in the years 2011–2012, a layer of sulphide-bearing black marl with a thickness of 0.5–4.5 m was interpreted as



the Zechstein Marl (Ca1m) which is a transitional link between shale and grey-beige limestones and dolomites of the Zechstein Carbonate.

As a result of mineralogical observations using reflected light microscopy and scanning electron microscopy, the following minerals were identified: chalcopyrite, chalcocite, bornite, digenite, galena, sphalerite, native silver, Ag-amalgams, mckinstyite, anilite and betechtinite. The dominant mineral is pyrite found as euhedral grains in the calcite cement; framboidal pyrite in interstitial calcite, and framboidal pyrite cemented by digenite and galena. Sulphides occur as crystals scattered in the matrix, mutual inclusions, paragenesis, and the replacement of detrital grains in conglomerate. Chalcopyrite is usually found in the form of lenses, at the shale/marl contact, and as nests formed together with the pyrite cement. Three forms of mineralization were found: (1) horizontal, mid-layered copper sulphide lenses formed by hydraulic peeling along the sludge lamination surfaces

caused by mineralized high-pressure solutions, (2) horizontal copper sulphide lenses replacing previous framboidal pyrite lenses, and (3) replacement of bioclasts. Bornite occurs mainly as cement and replaces framboidal pyrite, suggesting that Cu mineralization was dependent on the presence of sulphur precipitated during early diagenesis, which was the source of sulphate sulphur-reducing bacteria. Single sharp-edged grains of chalcopyrite disturbing lamination of copper shale are observed, which indicates the displacement of grains from crushed conglomerate, and resedimentation together with copper shale. Detailed microscopic observations confirmed that the presence of microtectonic deformation, shear zones, and porosity are clearly connected with copper mineralization. Two tectonic episodes can be distinguished: Mesozoic tectonic events that enabled seismic pumping of hot fluids, and microfractures that developed during ore minerals precipitation. Barren samples are characterized by lack of organic matter and/or permeability.

