Hans-Ulrich Aust

VHMS-Lagerstätten auf Zypern

Mineralogie, Paragenesen und regional-geochemischer Vergleich mit dem Iberischen Pyritgürtel

Kapitel 6: Gesteine und Minerale

6.2: Kupfersulfide

Version 2.0
27.11.2026

© Photos und Abbildungen der vorliegenden Ausarbeitung dürfen unter der CC-Lizenz "CC BY NC" weiterverwendet werden.

Inhaltsverzeichnis

6.2: Sulfidische Haupt und Primärerze....4
6.2 Teil I: Kupfersulfide und primäre Erzphasen....5
Pyrit („Schwefelkies“)....7
6.2 Teil II: Sekundäre Kupferanreicherungsfilme....13
Bornit und Co....14
Anhang: Belegstufenvergleich „Bornit & Co“ vs. „Limonit B“....18

Hinweise:

1. Charakterisierung von Lagerstätten

die Minen der in diesem Unterkapitel gezeigten Handstücke werden bezüglich ihres Lagerstättentyps folgendermaßen charakterisiert, nähere Erläuterungen zu den Bezeichnungen finden sich in der Einführung:

IPB:

São Domingos: Hybrider VHMS-Typ (Sub-seafloor Replacement + Brine Pool / Mound)

San Telmo: Sediment-geprägter VHMS-Typ (Dominantes Sub-seafloor Replacement / VSC-Verdrängung)

Troodos:

alle VHMS-Lagerstätten: Zypern-Typ (oder mafic-type VMS)

2. Photos von Handstücken aus Zypern sind schwarz hinterlegt, die aus dem IPB grau.

6.2: Sulfidische Haupt und Primärerze

Das Kapitel 6.2 behandelt die sulfidischen Erze als zentrales Herzstück vulkanogener Massivsulfidlagerstätten (VHMS). Es umfasst sowohl die primären, unmittelbar aus hydrothermalen Lösungen am oder nahe dem Meeresboden ausgefällten Sulfidphasen als auch deren erste Gefüge- und Mineralumwandlungen in der anoxischen Zementationszone (supergene Sulfidanreicherung).

6.2 Teil I: Kupfersulfide und primäre Erzphasen (Pyrit, Chalkopyrit, Sphalerit)

Der erste Teilabschnitt widmet sich der primären Vererzung, die zeitgleich mit der Gesteinsbildung (syngenetisch) sowie durch spätere hydrothermale Lösungen (epigenetisch) entstand:

- Pyrit (FeS_2): bildet das volumetrische Rückgrat nahezu aller VHMS-Körper; er tritt typischerweise eigengestaltig (idioblastisch) bis massiv-feinkörnig auf und markiert die Hauptphase der vulkanisch-exhalativen Eisen- und Schwefelausfällung;
- Chalkopyrit ($CuFeS_2$): das dominierende primäre Kupfermineral; es kristallisiert bevorzugt in den höher temperierten Zonen des hydrothermalen Zufuhrschlots (Stockwerk/ Footwall) sowie in den zentralen Bereichen der Massiverzkörper;
- Sphalerit (ZnS): vertritt die Zinkfraktion, die primär bei etwas niedrigeren Temperaturen an den Rändern oder im Dachbereich der Sulfidlinsen ausfällt.

6.2 Teil II: Sekundäre Kupfersulfide der Zementationszone (Bornit, Chalkosin, Covellin)

Der zweite Teilabschnitt analysiert die sulfidische Anreicherungszone, die sich unmittelbar unterhalb der vadosen Oxidationszone (unterhalb des Grundwasserspiegels) erstreckt:

- Subsurface-Kupferanreicherung: aus der oberen Oxidationszone durch saure Sickerwässer gelöstes Kupfer wandert nach unten; bevor es den anoxischen, reduzierenden Grundwasserbereich erreicht, reagiert das gelöste Cu^{2+} mit primärem Pyrit oder Chalkopyrit.
- Phasenabfolge: es bilden sich kupferreichere, sekundäre Sulfidphasen wie Bornit (Cu_5FeS_4), Covellin (CuS) und schließlich das extrem kupferreiche Chalkosin (Cu_2S); diese Zone zeichnet sich oft durch auffällige, dunkelblaue bis rußige Anflüge (Buntkupfer, Kupferindig) aus.

Regionaler Vergleich: Zypern (Troodos) vs. Iberischer Pyritgürtel (IPB)

Zypern (Troodos): es handelt sich um mafisch dominierte, monometallische Cu-Pyrit-Lagerstätten; Blei fehlt nahezu vollständig; Sphalerit tritt nur untergeordnet oder in peripheren Linsen auf. Der primäre Erzmineralbestand ist extrem homogen und wird von Pyrit und Chalkopyrit dominiert. Das unmittelbare Nebengestein besteht aus karbonatfreien, mafischen Pillow-Laven. Die sauren Verwitterungslösungen werden kaum gepuffert, wodurch Kupfer sehr effizient gelöst und in der Zementationszone wieder ausgefällt werden kann (Chalkosin- und Covellin-Anreicherungen).

Iberischer Pyritgürtel (IPB): entstanden in einem kontinentalen Pull-Apart-Becken unter bimodal-siliziklastischem Vulkanismus und ist eine polymetallische Provinz (Cu-Zn-Pb-Ag-Au). Neben Pyrit und Chalkopyrit ist Sphalerit reichlich vertreten, eng vergesellschaftet mit Galenit (PbS) und komplexen Sulfosalzen (z. B. Tetraedrit-Tennantit). Die Erzkörper sind tief in Schwarzschiefer, Tuffe und Bicarbonatführende Sedimente eingebettet. Die hohe Pufferkapazität des Nebengesteins führt dazu, dass saure Wässer oft schon im oberen Bereich neutralisiert werden. Zementationszonen treten zwar auf (z. B. Rio Tinto), sind jedoch geochemisch stärker von komplexen Blei-Zink-Mischsulfiden und Edelmetallanreicherungen (Au, Ag) durchsetzt.

6.2 Teil I: Kupfersulfide und primäre Erzphasen

Merkmal	Pyrit (Schwefelkies)	Chalkopyrit (Kupferkies)	Sphalerit (Zinkblende)
Chemische Formel	FeS_2	$CuFeS_2$	(Zn,Fe)S
Farbe	hell-messinggelb, goldgelb	messinggelb, oft bunt anlaufend	gelb, braun, rotbraun bis tiefschwarz
Makroskopische Erscheinungsformen	Würfel, Pentagondodekaeder, dichte spritzigkörnige Massen	derbe Massen, feinkörnige Füllungen, seltene Tetraeder	Körnige bis blättrige Massen, selten tetraedrische Kristalle
Typische Oberfläche	stark metallglänzend	metallglänzend	Harz- bis Diamantglanz, fettig
Magnetisch	nein	nein	nein
Typische Begleitminerale	Chalkopyrit, Sphalerit, Quarz, Galenit	Pyrit, Sphalerit, Quarz, Galenit	Pyrit, Galenit, Chalkopyrit, Quarz, Barit
Häufige Verwechslung	Markasit, Chalkopyrit, Gold	Pyrit („Katzengold"), Gold, Pyrrhotin	Galenit, Wurtzit, Rutil, Zinnstein (Kassiterit)
Makroskopische Unterscheidung	sehr hart (Mohs 6–6,5, ritzt Glas),	weicher als Pyrit (Mohs 3,5–4),	hervorragende Spaltbarkeit, harziger Glanz
Typische VHMS-Zone	Massivsulfid-Körper, Stockwerk (*Feeder Zone*)	Primäres Erzzentrum, Stockwerk (*Feeder Zone*)	oberer/äußerer Erzkörper, exhalative Hülle
Häufigkeit Troodos	★★★★★ Masse der Massivsulfide	★★★★☆ Hauptkupferträger	★★★☆☆
Häufigkeit IPB	★★★★★ > 85 % der Sulfidmasse	★★★★★	★★★★★
Bedeutung	Hauptsulfid und Schwefelsäure-Lieferant für die Gossan-Bildung	wichtigstes primäres Kupfererz der VHMS-Lagerstätten	Hauptträger für Zink und Spurenelemente (z. B. Indium, Cadmium)

Das metallische Inventar vulkanogen-massivsulfidischer Lagerstätten (VHMS) wird maßgeblich durch die Paragenese der drei primären Hauptsulfide Pyrit, Chalkopyrit und Sphalerit bestimmt. Im hydrothermalen Gesamtsystem zeigen diese Phasen klare strukturelle und geochemische Rollen, die den Aufbau eines Massivsulfidkörpers vom Aufstiegskanal bis zur Meeresboden-Oberfläche widerspiegeln:

- **Pyrit (FeS_2)** bildet als quantitativ dominantes Hauptsulfid das strukturelle Rückgrat der Vererzung. Er stellt den überwiegenden Volumenanteil sowohl im Stockwerk (Feeder-Zone) als auch im eigentlichen Massivsulfidlager und liefert bei späterer Verwitterung die entscheidende Schwefelsäure für die Auslaugung und Gossan-Bildung.
- **Chalkopyrit ($CuFeS_2$)** fungiert als wichtigster primärer Kupferträger. Da seine Ausfällung an hohe Temperaturen (ca. 300–350 °C) gebunden ist, markiert er bevorzugt die heißen, zentralen Aufstiegsbahnen sowie den inneren Kern des Erzkörpers (Cu-Kern).
- **Sphalerit ((Zn,Fe)S)** repräsentiert als Hauptzinkträger die niedrigtemperierte Phase der primären Erzbildung (unterhalb von ca. 250 °C). Er reichert sich typischerweise in den äußeren, kühleren Rand- und Dachbereichen des Sulfidhügels (Zn-Hülle) an, wo die hydrothermalen Lösungen intensiv mit dem kalten Meerwasser vermischt werden.

Für die petrologische Einordnung von Handstücken ist diese zonale Verteilung von unmittelbarem diagnostischem Wert: das relative Mengenverhältnis und die Verwachsungsgefüge dieser drei Leitminerale erlauben direkte Rückschlüsse darauf, aus welcher Temperatur- und Bildungszone innerhalb des ehemaligen Hydrothermalsystems eine Probe stammt. Im Folgenden werden die spezifischen makroskopischen Merkmale und diagnostischen Kriterien dieser primären Erzphasen im Einzelnen dargestellt.

Im geochemischen Vergleich zwischen den beiden Lagerstättenprovinzen spiegelt die quantitative Verteilung dieser drei Hauptsulfide unmittelbar das jeweilige magmatische Wirtsgestein wider: während in den mafisch-basaltischen Ophiolith-Systemen des Troodos-Massivs (Zypern) Pyrit und Chalkopyrit dominieren und Sphalerit meist nur untergeordnet als Cu-Zn-Begleiter auftritt, weisen die bimodal-felsisch geprägten Lagerstätten des Iberischen Pyritgürtels (IPB) neben extrem mächtigen Pyritmassen signifikant höhere Gehalte an Sphalerit (sowie Galenit) auf, was sie zu ausgeprägten polymetallischen Zn-Pb-Cu-Systemen macht.

Pyrit („Schwefelkies“)

Im Folgenden findet sich ein Kurzsteckbrief zur makroskopischen Erkennung von Pyrit.

1. Makroskopische Kennzeichen:

- Pyrit zeigt im frischen Anbruch eine charakteristische hell-messinggelbe bis blass-goldgelbe Farbe und einen intensiven Metallglanz;
- im Handstück tritt er in VHMS-Lagerstätten vorwiegend in drei Gefügetypen auf:
  - als dichte, feinkörnige bis massiv-derbe Erzmasse;
  - als feinverteilte Imprägnierung im alterierten Nebengestein sowie
  - in Form idiomorpher Kristalle (vor allem Würfel und Pentagondodekaeder) häufig mit typischer Kristallstreifung auf den Würfelflächen;
- frischer Pyrit zeigt keinerlei Spaltbarkeit sondern einen muscheligen bis unebenen, spröden Bruch;
- bei beginnender Verwitterung läuft die Oberfläche oft bräunlich oder irisierend an und überzieht sich mit dünnen Häuten aus Goethit, Jarosit oder weißen Sekundärsulfaten.

2. Diagnostische Abgrenzung

Für die makroskopische Bestimmung am Handstück sind drei einfache, zerstörungsfreie Prüfmerkmale entscheidend, um Verwechslungen mit Chalkopyrit, Markasit oder gediegen Gold auszuschließen:

- Ritzhärte: mit einer Mohshärte von 6 bis 6,5 ist Pyrit außergewöhnlich hart; er lässt sich mit einer Stahlfeile oder einer Messerklinge nicht ritzen (hinterlässt stattdessen grauen Metallabrieb des Werkzeugs) und ritzt seinerseits Fensterglas. Chalkopyrit (Härte 3,5–4) und Gold (Härte 2,5–3) sind deutlich weicher;
- Farbe und Glanz: gegenüber dem satteren, oft leicht grünlich-gelben bis bunt anlaufenden Chalkopyrit wirkt frischer Pyrit kühler, blasser und messingartiger;
- Strichfarbe (falls an unauffälliger Stelle prüfbar): grünschwarz bis braunschwarz, im deutlichen Gegensatz zum goldgelben Strich von gediegen Gold.

3. Genese und Rolle im VHMS-System

Als Eisen(II)-Disulfid ($Fe^{2+}S_2^{2-}$) ist Pyrit die mit Abstand häufigste Erzphase beider Lagerstättenprovinzen und bildet das strukturelle Grundgerüst sowohl im Stockwerk (Feeder-Zone) als auch im schichtförmigen („stratiformen“) Massivsulfidkörper. Während in der heißen Aufstiegszone gröberkristalline, mit Quarz verwachsene Pyrite dominieren, zeigen die oberen Bereiche der Massivsulfidlinsen häufig feinkörnige, gebänderte oder framboidale Gefüge („himbeerförmig-kugelige Gefüge“), die auf schnelle Ausfällung beim Kontakt der Hydrothermalfluide mit kaltem Meerwasser hinweisen.

Im Verwitterungszyklus spielt Pyrit die entscheidende geochemische Schlüsselrolle für die Entstehung des Eisernen Huts (Gossan). Durch den Kontakt mit sauerstoffreichem Sickerwasser oxidiert Pyrit unter Freisetzung großer Mengen Schwefelsäure:

$$4FeS_2 + 15O_2 + 14H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 + 8H_2SO_4$$

Diese aggressive Säure laugt unedle Metalle aus dem Nebengestein und den primären Sulfiden heraus, mobilisiert Kupfer in tiefere Zementationszonen und hinterlässt an der Oberfläche die charakteristischen, zelligen Kieselzinder- und Goethit-Relikte (Boxwork-Texturen), in denen die ursprünglichen Umrisse aufgelöster Pyritwürfel oft noch als negative Hohlräume ablesbar sind.

In den Haldenfunden der zyprischen VHMS-Lagerstätten (u. a. Mathiatis, Mitsero oder Kalavasos) ist Pyrit das mit Abstand häufigste Erzmineral. Vom dichten, feinkörnigen Erzgerüst über grobkristalline Drusenfüllungen bis hin zu isolierten Mikrokristallen unmittelbar an der Verwitterungsfront tritt er in unterschiedlichsten Gefügetypen auf. Dies illustriert die folgende Auswahl (Abb. Pyrit A-F: alle Proben aus Zypern) – ohne Anspruch auf Vollständigkeit.



„Pyrit A“: dichte Erzmatrix im Übergang zu idiomorphen Mikrowürfeln

Bildbreite: 12 mm;

Übergang von einer dichten, feinkörnigen Pyritmatrix (oben links, Korngrößen < 0,1 mm) zu frei gewachsenen, scharfkantigen Pyritwürfeln (Kantenlänge bis ca. 2 mm) mit charakteristischer Kristallstreifung (unten rechts) in einer feinkristallinen, durch Eisenoxide/-hydroxide ocker- bis rötlich gefärbten Quarz-Gangart.



„Pyrit B“: grobkristalline Drusen- und Gangfüllung in alteriertem Nebengestein

Bildbreite: 5 cm;

dicht gepackte, dunkel angelaufene Pyritwürfel (Kantenlänge bis ca. 5 mm) mit gestuften und gestreiften Kristallflächen in einer Druse aus intensiv rötlich-braunem, hämatitisch verfärbtem Nebengestein; im Zentrum ist Pyrit unmittelbar mit einem weißen, stängelig-blättrigen Gangmineral (Quarz/Gips) verwachsen.



Pyrit C (Detailvergrößerung aus „Pyrit B“): Kristalltracht

Detailaufnahme der grobkristallinen Pyrite (Kantenlänge 3–5 mm) mit deutlicher Kombination aus Würfel- und Pentagondodekaederflächen und Kristallstreifung;

rechts umwächst die jüngere, transparent-weiße Gangart die älteren Pyritkristalle.



„Pyrit D“: isolierte Einzelkristalle unmittelbar an der Oxidationsfront

Bildbreite: 5 mm;

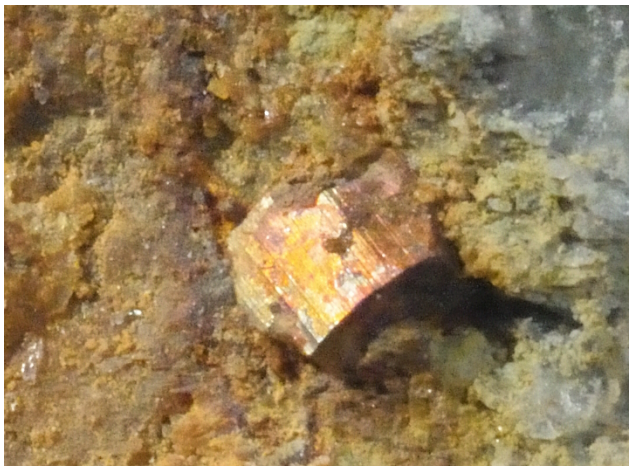
isoliert eingewachsener, bräunlich angelaufene Pyrit-Einzelkristalle (Kantenlänge ca. 0,5–0,7 mm) mit Kantenabstumpfungen und feiner Flächenstreifung in einer stark zersetzten, durch Jarosit und Limonit gelblich-ocker verfärbten Gesteinsmatrix;



„Pyrit E“: mehrkristallines Würfel-Aggregat (Mehrling) auf Quarz

Gesamthöhe der verwachsenen Kristallgruppe ca. 7 mm;

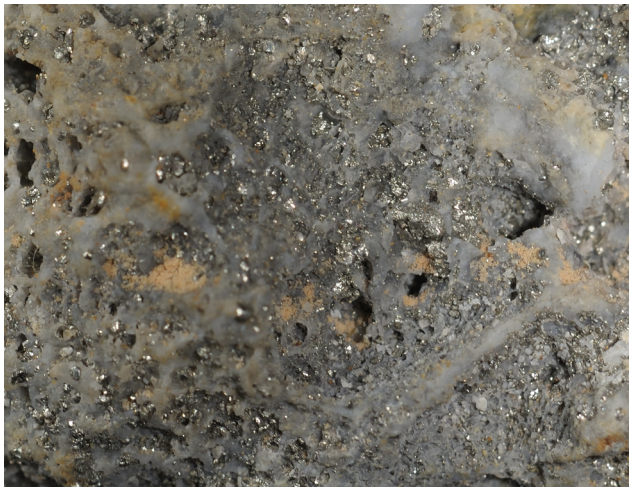
Kristallgruppe aus mehreren unterschiedlich orientierten, scharfkantigen Pyritwürfeln (Kantenlänge ca. 2,5–3,5 mm) mit ausgeprägter Kristallstreifung und einem winzigen aufgewachsenen Nachfolge-Kristall (unten rechts) auf einer durchscheinenden Quarzmatrix.; in den Zwickeln zwischen den Kristallen haben sich erdige, ockergelbe Verwitterungsprodukte (Jarosit/Limonit) abgesetzt;



„Pyrit F“ (unten links): irisierende Anlauffarben durch beginnende Oxidation

Bildbreite: ca. 7 mm;

isolierter, scharfkantiger Pyritwürfel (Kantenlänge ca. 2 mm) mit deutlicher Flächenstreifung und intensiven, goldgelb bis kupferrot irisierenden Anlauffarben infolge dünner Oxidationshäute. Trotz der chalkopyritähnlichen Farbgebung erlauben die scharfe Würfeltracht und die parallele Kristallstreifung eine eindeutige Ansprache als Pyrit. Die umgebende Matrix besteht aus porösen, ocker- bis grüngelben Verwitterungsbildungen (Limonit/Jarosit).



Die Handstücke für die Aufnahmen „Pyrit G -I“ stammen sämtlich aus San Telmo (IPB);

Pyrit G: verkieseltes Stockwerk mit Pyritkristallen und Jarosit-/Limonit-Belägen;

Bildbreite: ca. 1,9 cm;

feinkörnige Imprägnation, stark metallisch glänzenden Pyritkörnern und Mikrowürfeln (Korngröße ca. 0,1–0,5 mm) in einer intensiv silifizierten, porös-zellulären Quarzmatrix (Stockwerk-Zone). In den unregelmäßigen Auslaugungsporen finden sich feinkörnige, beigefarbene Sekundärfüllungen.



Pyrit H: verkieseltes Quarz-Pyrit-Gefüge mit Jarosit-/Limonit-Belägen;

Bildbreite: ca. 1,8 cm;

dichte, durchgehend verkieselte Quarzgrundmasse mit fein eingestreuten, rundlichen bis würfeligen Pyrit-Einzelkristallen (Korngröße ca. 0,2–0,6 mm) und einer feinstkörnigen Aggregat-Verdichtung im oberen Mittelbereich. Während die meisten oberflächlich freiliegenden Körner matt-dunkelgrau angelaufen sind, zeigen einzelne Bruch- und Kristallflächen hellen Metallglanz; entlang feiner Korngrenzen treten ockergelbe Limonit-/Jarosit-Säume auf.



Pyrit I (Bild unten links): verkieseltes Quarz-Pyrit-Gefüge mit gelber Verwitterungskruste;

Bildbreite: ca. 2,5 cm;

Quarz-Pyrit-Probe am Übergang zwischen frischem Gestein und Verwitterungszone. In die milchig-weiße Quarz-Grundmasse (Mitte bis rechts) sind sowohl fein verteilte Pyritkristalle (0,1–0,4 mm) und dichte, feinkörnige Erznester als auch scharfkantige, hell-messinggelbe Pyritwürfel mit deutlicher Riefung auf den Kristallflächen (Kantenlänge bis ca. 1,5 mm, unten rechts und unten mittig) eingewachsen. Nach links oben geht das Gestein in eine porös-schwammartige, gelblich-ockerfarbene Verwit - terungskruste über, in der ältere Pyritwürfel zwar bräunlich angelaufen, aber in ihrer scharfkantigen Würfelform erhalten geblieben sind.

Im Anschluss zur „Bildergalerie“ sei an dieser Stelle eine praktische Vorgehensweise vorgestellt, die zu einer sicheren Unterscheidung zwischen Pyrit und Chalkopyrit führt.

In VHMS-Lagerstätten, sowohl im Troodos-Massiv als auch im Iberischen Pyritgürtel, spielt die Kristalltracht bei der makroskopischen Unterscheidung von Pyrit und Chalkopyrit eine deutlich asymmetrische Rolle:

1.

- einseitiges Ausschlusskriterium:

  Pyrit neigt dank seiner hohen Kristallisationskraft selbst in dichter Sulfidmatrix oder in engen Zwickeln extrem stark zur Ausbildung idiomorpher, scharfkantiger Kristallformen – vor allem Würfel (Hexaeder) und Pentagondodekaeder mit typischer Flächenstreifung (siehe z. B. Abb. „Pyrit A“, „Pyrit F“). Findet man im Handstück solche idiomorphen Würfel oder gestreifte Kristallflächen, ist Chalkopyrit sicher ausgeschlossen;

- kein positives Erkennungsmerkmal (für Chalkopyrit):

  umgekehrt gilt das leider nicht; Chalkopyrit besitzt eine deutlich geringere Kristallisationskraft und tritt in VHMS-Erzen fast ausschließlich xenomorph (derb, körnig, schlierig-massiv oder als Zwickelfüllung zwischen älteren Pyritkristallen) auf. Die für Chalkopyrit theoretisch typischen tetragonalen Disphenoide (pseudotetraedrische Kristalle) bilden sich fast nur in offenen Klüften oder Spätphasen-Drusen – in den kompakten oder stockwerkartigen VHMS-Erzen von Zypern und des IPB sind sie eine absolute Rarität.

Konsequenz für die Differentialdiagnose im Handstück:

da Chalkopyrit in VHMS-Handstücken praktisch nie idiomorph vorliegt und umgekehrt auch Pyrit häufig in feinkörnigen, derben Massen auftritt (vgl. Abb. „Pyrit A“ oben links), reicht die Kristalltracht allein für eine positive Ansprache von Chalkopyrit nicht aus. In der Praxis läuft die Unterscheidung am Handstück daher zweistufig:

Stufe 1:

Formprüfung (First-Look): sind idiomorphe Würfel, Pentagondodekaeder oder gestreifte Kristallflächen vorhanden?

→ eindeutig Pyrit (auch bei messing- oder goldgelben Anlauffarben wie in Abb. „Pyrit F“);

Stufe 2:

Eigenschaftsprüfung bei derben / xenomorphen Partien: liegt eine massige, körnige oder zwickelfüllende Phase vor, entscheiden die physikalischen Merkmale:

- Farbe / Glanz:
  Chalkopyrit zeigt ein deutlich satteres, wärmeres Messing- bis Goldgelb (oft mit grünlichem Stich oder bunt-irisierenden Anlauffarben), während frischer Pyrit blass-messinggelb bis silbrig-gelb wirkt;
- Ritzhärte (das verlässlichste Kriterium):
  Chalkopyrit (Mohshärte 3,5–4) lässt sich mit einer Stahlklinge bzw. Feile mühelos ritzen und erzeugt ein schwarzes bis grünlich-schwarzes Pulver; Pyrit (Mohshärte 6–6,5) ist härter als Stahl und hinterlässt keinen Kratzer, sondern höchstens Metallabrieb der Klinge;
- Bruch:
  Chalkopyrit bricht uneben bis muschelig und wirkt spröde-weicher, während derber Pyrit einen deutlich härteren, feinkörnig-splittrigen Bruch zeigt.

Abgrenzungshinweis zu Gold, welches immer wieder in Handstücken vermutet wird: gelegentlich vorkommende winzige Goldflitter im Gossan sind im Gegensatz zum spröden Chalkopyrit geschmeidig-verformbar (duktil), laufen nicht an und besitzen eine wesentlich höhere Dichte.

4. Vergleich zwischen Pyrit im Troodos und IPB

- Tektonische Prägung (Schieferung vs. ungeschiefert):

  im IPB treten passend zur variszischen Gebirgsbildung geschieferte, lagenweise gebänderte Handstücke auf, während die gezeigten Troodos-Stufen ungeschiefert und massig bis porös ausgebildet sind;



Wiederholung „Belegprobe Serizit B“ aus Kapitel 6.4 als Beispiel für eine geschieferte Ausbildung im IPB (San Telmo)

- Weitgehend vergleichbare Matrix:

  in den ungeschieferten Bereichen zeigen beide Regionen eine sehr ähnliche, helle und stark verkieselte Quarzgrundmasse sowie vergleichbare gelblich-ockerfarbene bis bräunliche Verwitterungsbeläge;

- Pyrit-Ausbildung im Überblick:

  während der Pyrit in den geschieferten IPB-Partien eher feinkörnig-lagenweise eingestreut ist, tritt er in den verkieselten Partien beider Provinzen sowohl feinkörnig als auch in Form größerer, teils eigengestaltiger Einzelkristalle auf.

Klarstellung: die soeben beschriebenen Beobachtungen können aufgrund der extrem geringen Stichprobengröße lediglich als „Vermutung“ angesehen werden!

6.2 Teil II: Sekundäre Kupferanreicherungsfilme

Merkmal	Bornit (Buntkupferkies)	Chalkosin (Kupferglanz)	Covellin (Kupferindig)
Chemische Formel	Cu_5FeS_4	Cu_2S	CuS
Farbe	kupferrot-braun, bunt anlaufend (violett,blau)	bleigrau bis dunkelgrau/ schwarz	indigoblau, purpur-violett anlaufend
Makroskopische Erscheinungsformen	dichte, metallische Massen, Bänder, Anflüge	dichte, feinkörnige bis rußige Massen	blättrige, feinschuppige - pulverige Überzüge
Typische Oberfläche	stark metallglänzend mit bunter Anlauffarbe	metallglänzend (frisch) bis matt/rußig	Metall- bis Fettglanz, matt
Magnetisch	nein	nein	nein
Typische Begleitminerale	Chalkopyrit, Chalkosin, Covellin, Pyrit	Covellin, Bornit, Pyrit, Malachit, Cuprit	Chalkosin, Pyrit, Chalkopyrit, Malachit
Häufige Verwechslung	Chalkopyrit (angelaufen), Pyrrhotin	Bleiglanz (Galenit), Hämatit-Massen	Azurit, Bornit-Anläufe
Makroskopische Unterscheidung	Bunt anlaufenend („Taubenhals“)	Weich (Mohs 2,5–3), schneidbar mit Messer	intensive Indigofarbe, vollkommene Spaltbarkeit
Typische VHMS-Zone	Hypogene Übergangszone / Zementationszone	Zementationszone (Supergene Anreicherung)	Zementationszone (Supergene Anreicherung)
Häufigkeit Troodos	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆
Häufigkeit IPB	★★★★☆	★★★★★ (historisch abgebaut in Río Tinto)	★★★★☆
Bedeutung	hochgradiges Kupfersulfid im Übergangsbereich	Hauptmineral der Zementationszone	Indikator für supergene Sulfidanreicherung

Bornit und Co

Im vorliegenden Abschnitt werden sekundäre Kupfer-Anreicherungsfilme besprochen, bei denen es sich optisch meist um feine Zementations-Anlauffarben (überwiegend Covellin-, Digenit- und Bornit-Mischphasen) handelt.

1. Geologischer Kontext

In typischen vulkanogen-massivsulfidischen (VHMS) Lagerstätten – sowohl im ophiolitisch geprägten System wie auf Zypern als auch in bimodal-sulfidischen Großprovinzen wie dem Iberischen Pyritgürtel (IPB) – sind primäre, handstückbildende Reinerze aus kupferreichen Sulfiden wie z. B. Bornit (63,3 % Cu), Covellin (66,5 % Cu), Digenit (78,1 % Cu) oder Chalkosin (79,9 % Cu) eine extreme Seltenheit. Die primären Erzkörper werden petrographisch von massiven Eisensulfiden (Pyrit, Markasit je 0 % Cu) dominiert, wobei Kupfer primär als Chalkopyrit ($CuFeS_2$, 34,6 % Cu) gebunden ist.

Massive Anreicherungen von kupferreichen Phasen wie Bornit, Covellin oder Digenit treten in diesen Lagerstätten daher fast nie als primäre magmatisch-hydrothermale Abscheidungen auf. Stattdessen sind sie das klassische Produkt der supergenen Verwitterungs- und Zementationskinetik. Sie bilden sich in den oberen Teufen oder an exponierten Haldenoberflächen und Ausbissen durch die Zersetzung primärer Sulfide und die sekundäre Umverteilung mobilisierter Kupferionen.

2. Genese und mikro-hydrologische Mechanismen

Die Entstehung dieser kupferreichen Sekundärphasen ist eng an dynamische Sickerwasser- und Verdunstungsprozesse gekoppelt:

- innere Auslaugung und Transport: saure Porenwässer lösen Kupfer aus den primären Sulfiden (z. B. Chalkopyrit) heraus;
- kapillare Verdunstungspumpe: entlang von Mikro-Klüften oder an wetterexponierten Atmosphärenseiten steigen diese Wässer durch Kapillarwirkung auf;
- Ausfällung als Passivierungsfilm: bei der Verdunstung an der Luft-Gesteins-Grenze (Übersättigung) schlagen sich die gelösten Ionen nieder. Anstelle sofort ausgewaschen zu werden, bilden sie hauchdünne Sekundärhäute direkt auf einer porösen Eisenoxidhydrat-Basis, meist einer lückenhaften Goethit- oder Limonit-Trägerschicht.

3. Mineralogische Zusammensetzung und makroskopische Unterscheidbarkeit

Diese Sekundärüberzüge sind meist nur wenige Nanometer bis Mikrometer dick und entstehen als feinstrukturierte Mischphasen und Anlauffarben. Eine absolut trennscharfe Einzeldiagnose der Minerale ist über eine reine Handstufen-Makroskopie (ohne XRD oder EDX-Analytik) methodisch nicht möglich, da sich die optischen Eigenschaften stark überlappen. Dennoch lassen sich makroskopisch zwei optische Tendenzen differenzieren:

- Covellin (CuS) / Digenit (Cu_9S_5): dominiert dort, wo intensive, gesättigte und fast indigoblaue bis stahlblaue Tönungen auftreten; sie zeugen von einer direkten sulfidischen Überprägung unter reduzierenden oder grenzschichtnahen Bedingungen;
- Bornit (Cu_5FeS_4) / Übergangsphasen: zeigt sich in jenen Bereichen, in denen das typische, bunt anlaufende Spektrum von Purpur, Violett, Rosa und Kupferbronze („Buntkupferkies-Effekt“) über die Matrix läuft.

4. Fazit für die makroskopische Ansprache

Aufgrund der feinkörnigen Verwachsung, der submikroskopischen Schichtdicken und der fließenden Übergänge zwischen den Kupfer-Eisen-Sulfiden ist eine „globalere“ Darstellung als „Sekundäre Kupfer-Anreicherungsfilme“ nicht nur pragmatisch, sondern auch geologisch am exaktesten. Das optische Erscheinungsbild dient dabei als zuverlässiger makroskopischer Indikator für das supergene Milieu, ohne eine laboranalytische Scheingenauigkeit vorzutäuschen.

4. Bemerkungen:

In diesem Zusammenhang sind 2 Begriffe von besonderer Bedeutung und werden deshalb hier näher ausgeführt:

I. Acid Mine Drainage (AMD)

Im Deutschen als „saure Grubenwässer“ oder „saure Bergbau-Wässer“ bezeichnet. AMD beschreibt den Prozess und die entstehenden Lösungen, wenn sulfidische Minerale – insbesondere Pyrit (FeS_2) mit Wasser und Luftsauerstoff in Kontakt kommen und oxidieren. Der chemische Prozess läuft wie folgt ab:

1. Oxidation der Sulfide: freiliegender Pyrit reagiert mit Sauerstoff und Wasser dabei entstehen Eisen(II)-sulfat und Schwefelsäure (H_2SO_4);
2. Säureproduktion: durch die Freisetzung von Wasserstoffionen sinkt der pH-Wert der Lösung drastisch ab – oft in den stark sauren Bereich von pH 2 bis 4;
3. Metallmobilisierung: dieses extrem saure, aggressive Wasser löst Metalle (wie Kupfer, Zink, Eisen und Blei) aus dem umliegenden Gestein und hält sie in Lösung.

Die Bedeutung im Kontext mit z.B. San Telmo und der supergenen Verwitterung dort liegt darin, dass die anhaltende Oxidation verbliebener Sulfidrelikte im Kern sowie die Auflösung saurer Zwischenprodukte (wie Jarosit) das AMD-Milieu aufrecht halten und genau diese sauren, kupferreichen Porenwässer (Acid Mine Drainage) produziert. Das saure Milieu ist die notwendige chemische Voraussetzung dafür, dass Kupfer im Gestein mobilisiert wird, bevor es durch die kapillare Verdunstungspumpe (evaporative pumping) an die Oberfläche gezogen und dort als sekundäres Kupfersulfid (Covellin/Bornit) fixiert wird.

II. Zementationsfront

Um den Begriff verständlich einordnen zu können, hilft die Unterscheidung zwischen dem klassischen, großräumigen Lagerstättenmodell und der Mikro-Skala am Handstück:

1. Klassische Zementationsfront
   (Lagerstätten-Maßstab)

In einem ungestörten Verwitterungsprofil wandern saure, metallreiche Sickerwässer nach unten zum Grundwasserspiegel. Genau dort, wo das sauerstoffreiche Wasser der Oxidationszone auf das sauerstoffarme, sulfidische Milieu unterhalb des Grundwasserspiegels trifft, liegt die klassische Zementationsfront. Hier fallen Kupferionen schlagartig als sekundäre Kupfersulfide (Covellin, Chalkosin, Bornit) aus und „zementieren“ das bestehende Gestein.

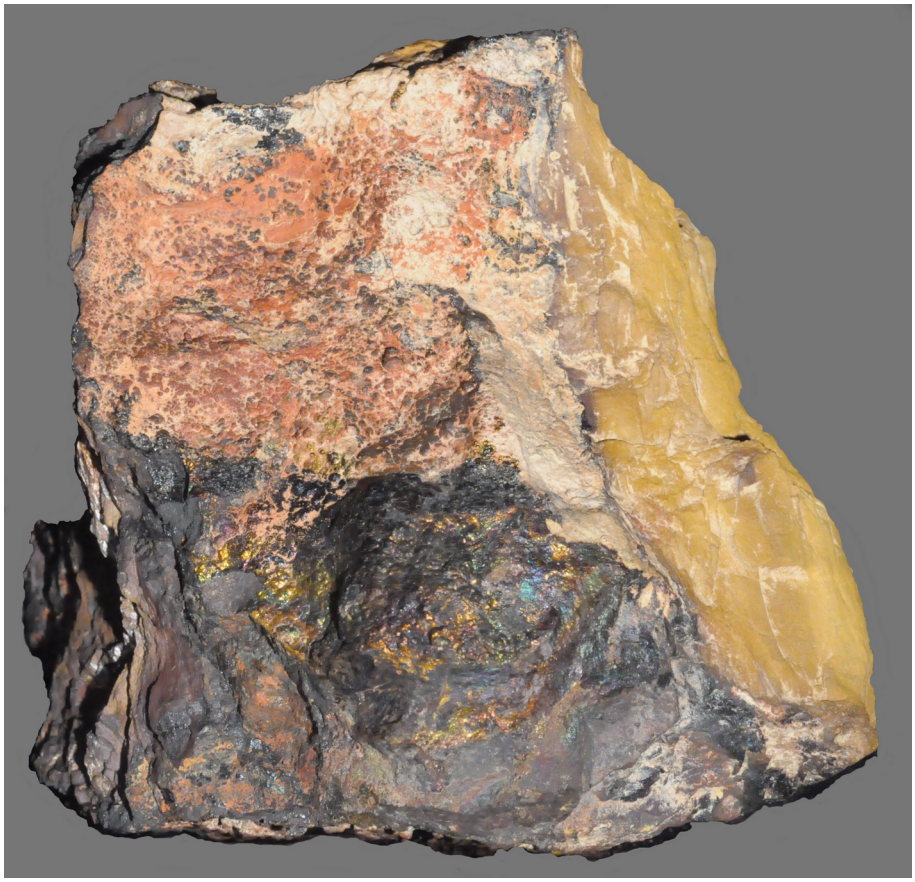
2. Zementationsfront am Handstück
   (Mikro-Maßstab / Verdunstungsfront)

Bei den hier vorliegenden Haldenproben wirkt die kapillare Verdunstungspumpe nach außen zur Gesteinsoberfläche hin. Hier fallen die Begriffe Verdunstungsfront und Zementationsfront räumlich praktisch zusammen:

- das Porenwasser transportiert gelöste Cu^{2+}-Ionen durch die Poren der Goethit-Matrix (z. B. San Telmo) oder des silikatischen Nebengesteins (z. B. São Domingos) bis dicht unter oder direkt auf die äußere Oberfläche;
- sobald die Lösung diese äußerste Grenzschicht erreicht, überschreitet sie durch Wasserverlust (Verdunstung) oder einen abrupten Wechsel von Eh (Redoxpotential) und pH-Wert schlagartig ihr Löslichkeitsprodukt. Die Front ist die scharfe räumliche Linie, bis zu der das Kupfer mobil bleibt und ab der es sofort als fester, zementierender Film (z. B. Kupfersulfid oder Chrysokoll) abgeschieden wird.

Die Zementationsfront meint daher in diesem Zusammenhang keine Schicht sondern die aktive chemische Ausfällungsgrenze an der Oberfläche des Handstücks, an der aus der mobilen Porenlösung wieder ein festes Mineral wird.

Belegstufe Bornit & Co A (IPB)



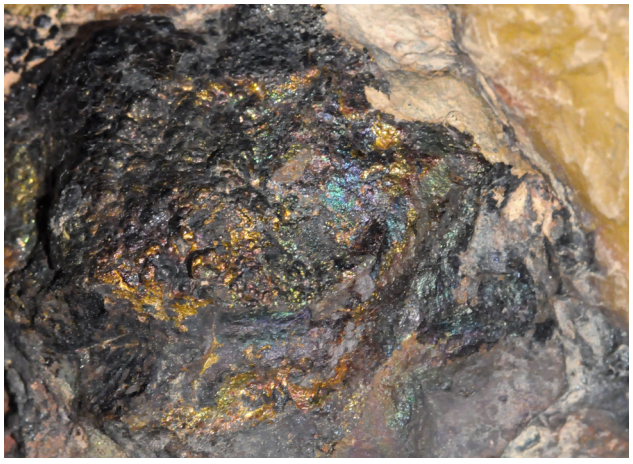
Links:
Belegstufe „Bornit & Co A“; sekundäre, irisierende Kupfer-Reichsulfid-Filme (Covellin/ Bornit) auf zelliger Goethit-Limonit-Matrix aus San Telmo (IPB); entstanden durch kapillare Verdunstung in saurem Milieu (evaporative pumping);

Breite der Stufe rd. 13 cm;

Links unten:
vergrößerter Ausschnitt; Bereich unterhalb der Mitte;
Bildbreite rd. 6 cm;

Unten:
vergrößerter Ausschnitt Bereich oben links;

Bildbreite rd. 7 cm;





Zone 1: dunkle Matrix mit teilweise aufsitzender irisierender Schicht (s. Bild links unten)

- Makroskopische Befundung: metallisch glänzender Film mit lebhaften Interferenz- und Anlauffarben in Pfauenblau, Violett, Smaragdgrün und Goldgelb, der unvollständig und netzartig auf einer porösen, dunklen bis ockerbraunen Trägerschicht aufsitzt.
- Interpretation: lokale Verdunstungs-/ Zementationsfront auf einer durch Auslaugung lückenhaft gewordenen Goethit-/Limonit-Basisschicht auf Atmosphärenseite.

Aussagesicherheit: gesichert

Begründung: die porösen, stabilen Goethit-Reste bilden einerseits die erforderliche feste Unterlage für die „bunten“ Filme und andererseits ermöglichten sie den Durchtritt der Wässer an die Atmosphäre. Die zuvor in Wasser gelösten Stoffe gehen dann bei Übersättigung in einen festen Zustand über, und es scheiden sich die beobachteten sekundären Kupfer-Passivierungsfilme (Covellin/Digenit/Bornit) ab.

- Differentialdiagnose: frischer, unzersetzter Chalkopyrit als Ursache der „bunten“ Filme.

  Aussagesicherheit: ausgeschlossen

  Begründung: frischer Chalkopyrit wäre unter den sauren, subaërischen Bedingungen an der freiliegenden Atmosphärenseite längst vollständig korrodiert und oxidiert worden; die optischen Effekte entsprechen sekundären, extrem dünnen Passivierungs- und Interferenzfilmen.

- Genese: Zusammenspiel aus innerer Auslaugung und äußerer Verdunstungspumpe; kapillar nachgefütterte Kupferionen schlagen sich als dünne Interferenzfilme auf den verbliebenen Goethit-Resten der Atmosphärenseite nieder (s.o. „Bemerkungen“).

Zone 2: rote, poröse Oxidations- und Boxwork-Zone

- Makroskopische Befundung: rötlich-braune bis ziegelrote, stark poröse und zellige Gitterstruktur (Boxwork-Struktur) mit ockerfarbenen Zwischenräumen;
- Interpretation: klassisches Sulfid-Boxwork (Eiserner Hut) mit subaërischer Hämatit-Nachreifung;

  Aussagesicherheit: gesichert

  Begründung: die zelligen Hohlraumstrukturen spiegeln exakt das negative Abdruckmuster vollständig ausgelaugter Pyrite wider, während die rötlichen Zonen die thermodynamisch bedingte Dehydration von instabilem Goethit zu wasserfreiem Hämatit in der oberflächlichen Atmosphärenzone belegen.

- Differentialdiagnose: blasige/poröse (vesikuläre) Magmatite oder Schlackenstrukturen

  Aussagesicherheit: ausgeschlossen

  Begründung: Morphologie, Textur und die chemische Assoziation mit Eisensulfiden und Oxidationsprodukten schließen magmatische Entstehungen völlig aus; es handelt sich rein um ein supergenes Auslaugungs- und Zersetzungsprodukt.

- Genese: vollständige oxidative Zersetzung der primären Eisensulfide (Pyrit) unter Erhalt des Raumgitters als hohles Zellgerüst (Boxwork), gefolgt von einer oberflächlichen Dehydration des Eisenoxidhydrats zu Hämatit.

Zone 3: gelbe Randkruste (vermutl. Haldenseite)

- Makroskopische Befundung: hell-senfgelbe bis ockerfarbene, dicht gebänderte, nierenförmige Überzüge mit glatten Flächen.
- Interpretation: konserviertes, primäres Eisenoxidhydrat-Gel (Goethit / Limonit, potentiell mit Jarosit-Anteilen) aus dem geschützten Haldenmilieu.

  Aussagesicherheit: gesichert

  Begründung: die nieren- und schalenförmige Morphologie und das helle Senfgelb entsprechen dem ungestörten, vor direkter atmosphärischer Erosion und kapillarer Zerstörung geschützten Ausfällungsprodukt saurer Porenlösungen. Hinweis: eine absolute Reinform ohne mikroskopische Jarosit-Anteile ist ohne instrumentelle Analytik wie XRD nicht belegbar.

- Differentialdiagnose: reine sekundäre Sulfatkrusten, z. B. reiner Jarosit

  Aussagesicherheit: gering

(unwahrscheinlich als Hauptmasse)

Begründung: zwar können Jarosite im sauren IPB-Milieu vorkommen, jedoch sprechen der makroskopische Habitus, die mechanische Stabilität und die typische, nierige Bänderung primär für feindisperses (kolloidales) Eisenoxidhydrat-Gel als Hauptmasse.

- Genese: rhythmische, schubweise Ausfällung von kolloidalem Eisen(III)-hydroxid-Gel aus sauren Porenwässern in geschützten Randbereichen oder an Unterseiten ohne direkten atmosphärischen Einfluss (genauere Beschreibung s. o.).



Wiederholung des Detailbilds der Eisen-/Chrysokollprobe aus São Domingos (s. Kapitel 6.1 „Limonit B“)

Fazit

Die Stufe dokumentiert das geochemische Gleichgewicht an einer VHMS-Verwitterungsfront: sie konserviert auf der geschützten Unterseite das primäre Goethit-Gel (Zone 3), zeigt im inneren Kern den typischen, zu Hämatit nachgereiften Gossan (Zone 2) und hält an der wetterexponierten Atmosphärenseite durch eine kapillare Verdunstungspumpe die irisierenden Kupfer-Sekundärfilme auf einer lückenhaften Goethit-Unterlage fest (Zone 1).

Anhang: Belegstufenvergleich „Bornit & Co“ vs. „Limonit B“

Es stellt sich die Frage, warum die Belegstufe „Limonit B“ aus Kapitel 6.1 „Eisenminerale“ bläulichgrüne Chrysokoll-Filme (s. Bildwiederholung rechts oben) im Gegensatz zur weiter oben besprochenen Stufe „Bornit und Co“ unterschiedliche Cu-Minerale ausbildeten. Die „Bornit Probe“ stammt aus San Telmo, die „Chrysokoll-Probe“ aus São Domingos, der grundsätzliche Bildungsmechanismus ist identisch. Worin liegt der Unterschied?

1. Der gemeinsame physikalische Mechanismus

Bei beiden Proben ist der primäre Transportprozess identisch: durch kapillare Verdunstung (evaporative pumping) steigen kupferhaltige Porenwässer aus dem Gesteinsinneren an die wetterexponierte Oberfläche auf und schlagen sich dort aufgrund von Verdunstung nieder.

2. Die unterschiedlichen Milieus an der Verdunstungsfront

Warum sich die ankommenden Kupferionen dort völlig unterschiedlich verhalten, liegt an der lithologisch gesteuerten Chemie des lokalen Mikromilieus:

- San Telmo (sulfidisch-saures Milieu):
  die Probe sitzt direkt auf einer massiven Sulfiderz-Matrix.; die anhaltende Oxidation von Pyrit erzeugt ein extrem saures und lokal reduzierendes Milieu (Acid Mine Drainage), in dem noch reduzierte Schwefelspezies verfügbar sind und keine silikatischen Puffer existieren;
- São Domingos (silikat-gepuffertes Milieu):
  die Probe ist in silikatisches Nebengestein (Schiefer/Grauwacken) eingebunden. Der Kontakt neutralisiert die Säure (pH steigt auf > 5–6), der Schwefel ist bereits vollständig zu Sulfat oxidiert, und das Porenwasser wird massiv mit gelöster Kieselsäure (H_4SiO_4) angereichert.

3. Konsequenzen für das „Endprodukt“:

Aufgrund dieser unterschiedlichen Rahmenbedingungen resultiert direkt die mineralogische Differenzierung:

- San Telmo:
  Kupfer trifft auf ein schwefelreiches, saures und suboxisches Milieu; es reagiert sofort mit dem verbliebenen Schwefel und fällt als hauchdünner, metallisch irisierender Kupfer-Reichsulfid-Film (Covellin, Digenit, Bornit) aus;
- São Domingos:
  da kein reduzierter Schwefel mehr zur Verfügung steht aber reichlich Kieselsäure und ein neutralisierter pH-Wert vorliegt, scheidet sich das Kupfer nicht als Sulfid ab. Stattdessen reagiert es mit dem Silikat zu einem amorphen, blaugrünen Kupfersilikat-Gel (Chrysokoll).

Fazit

Nicht der Transport steuert das Mineral, sondern das chemische Reaktionsmilieu an der Oberfläche. Die immer noch sulfidische Matrix zwingt das System auf den Sulfid-Pfad (San Telmo, Bornit & Co), während das silikatische Nebengestein es auf den Silikat-Pfad zwingt (São Domingos, Chrysokoll).