



Doctoral Thesis

Fluid evolution and ore mineral precipitation at the Bingham porphyry Cu-Au-Mo deposit, Utah, deduced from cathodoluminescence imaging and LA-ICPMS microanalysis of fluid inclusions

Author(s):

Landtwing, Marianne Regula

Publication Date:

2004

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004770653> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

**Fluid evolution and ore mineral precipitation at the
Bingham porphyry Cu-Au-Mo deposit, Utah, deduced
from cathodoluminescence imaging and LA-ICPMS
microanalysis of fluid inclusions**

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH

for the degree of

Doctor of Sciences (Dr. sc. ETH Zürich)

presented by

Marianne Regula Landtwing

Dipl. Natw. ETH

born July 2, 1973

citizen of Zug, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. C. A. Heinrich
Dr. T. Pettke
Prof. Dr. W. E. Halter
Prof. Dr. S. E. Kesler

ETH Zürich
ETH Zürich
ETH Zürich
University of Michigan

Examiner
Co-examiner
Co-examiner
Co-examiner

2004

Zusammenfassung

Bingham ist eine Eozäne Kupfer-Gold-Molybdän Porphyrlagerstätte und liegt südlich von Salt Lake City, Utah, in den U.S.A. Die Mine bietet ein ausgezeichnetes Studienobjekt, um die Entstehung von magmatisch-hydrothermalen Erzlagerstätten zu untersuchen, erstens aufgrund der guten Aufschlussverhältnisse und zweitens aufgrund der relativ schwach ausgebildeten hydrothermalen Überprägung. Der Bingham Tagebau stellt volumetrisch das grösste künstlich geschaffene Loch auf der Erdoberfläche dar. Vor dem Abbau enthielt die Lagerstätte etwa 2800 Millionen Tonnen Erz mit 0.73 Gew.-% Cu, 0.45 ppm Au, 3.9 ppm Ag und 0.043 Gew.-% Molybdänit. Die Mutterintrusion weist eine charakteristische Metallzonierung auf, mit einer zigarrenförmigen Gold-Reicherzzone und einer tassenförmigen Kupfervererzungszone, die in der Tiefe noch weit unter die Goldzone hinausreicht.

Die Hauptzielsetzungen dieser Doktorarbeit waren: 1) die Untersuchung der Metallzonierung von Bingham; 2) die Erforschung der Gründe für die Ausfällung von Gold- und Eisen-Kupfer-Sulfid; und 3) die Dokumentation der Bildungsbedingungen der erzausscheidenden hydrothermalen Lösungen. Um diese Fragen zu beantworten wurde die magmatisch-hydrothermale Entstehung der Bingham Lagerstätte mit Hilfe von Flüssigkeitseinschluss-Untersuchungen in unterschiedlichen hydrothermalen Quarzadern nachgezeichnet. In der vorliegenden Arbeit wurden zum ersten Mal konventionellen Flüssigkeitseinschluss-Untersuchungen, Rasterelektronenmikroskop-Kathodolumineszenz (SEM-CL in englischer Abkürzung) und Laser Ablations induktiv-gekoppelter Plasma Massenspektrometrie (LA-ICPMS) in Kombination angewandt.

Das erste Kapitel der Arbeit bietet eine Zusammenfassung der geologischen Verhältnisse der Bingham Lagerstätte, darunter die Beschreibung der unterschiedlichen Lithologien, Alterations- und Vererzungsazonen. Das Kapitel basiert im Wesentlichen auf Literaturdaten.

Das zweite Kapitel fasst die Ergebnisse einer detaillierten Aufnahme von Bohrkernmaterial aus der Mine zusammen. Aufgenommen wurden insgesamt 35 Kernsegmenten aus 17 Bohrungen entlang des 1400 West Profils (internes Koordinatensystem, Bingham) durch die quartz-monzonitische Hauptintrusion. Dieses Kapitel enthält auch eine detaillierte Beschreibung der unterschiedlichen Quarzadern aus den tieferen sowie den randlichen Bereichen der Mine. Es wird zudem versucht, diese neuen Ergebnisse mit jenen aus früheren Arbeiten, die nur auf den Zentralbereich der Lagerstätte beschränkt waren, zu korrelieren. Dieses Kapitel bildet die Grundlage für die LA-ICPMS Analysen in den folgenden Kapiteln.

Das dritte und vierte Kapitel konzentrieren sich jeweils auf die Reicherzzone im zentralen Teil der Lagerstätte. Die SEM-CL Petrographie an Quarzproben aus diesem Bereich der Mine lässt zwei Generationen von Quarz unterscheiden. Die erste Generation besteht aus hell bis grau lumineszierendem Quarz, der volumetrisch den Hauptanteil der Quarzadern bildet. Die Quarzkörner aus dieser Generation besitzen typischerweise einen unvollständigen Habitus, einige sind jedoch zoniert. Die zweite Generation besteht aus dunkel lumineszierendem Quarz, wurde zeitgleich mit oder kurz nach den Sulfiden ausgefällt. Sie schneidet die Quarzkristalle aus der ersten Generation und ist folglich in der Abfolge jünger.

Das dritte Kapitel dokumentiert, dass die zunehmende Helligkeit in der Kathodolumineszenz gekoppelt ist mit einer höheren Verunreinigung des Quarzes mit Spurenelementen. Die LA-ICPMS Analysen zeigen eine negative Korrelation der Elemente Al, K, Ti und Na mit den SEM-CL Grauwerten. Die geringsten Konzentrationen dieser Elemente lassen sich im dunkel lumineszierenden Quarz nachweisen, während sich die höchsten Konzentrationen auf den hell lumineszierenden Quarz der ersten Generation beschränken. Mögliche Gründe für Variabilität im Spurenelementgehalt von Quarz und somit unterschiedlicher Kathodolumineszenz sind: variable chemische Zusammensetzung (wie z.B. Spurenelementgehalt, pH) der quarzbildenden hydrothermalen Lösung, variable Bildungstemperatur und / oder unterschiedliche Kristallwachstums-Geschwindigkeiten. Die Flüssigkeitseinschluss-Untersuchungen (Wie in Kapitel IV im Detail beschrieben) legen jedoch nahe, dass die chemischen Zusammensetzungen der

verschiedenen quarzausfällenden hydrothermalen Lösungen, mit der Ausnahme von Kupfer, nur geringe Variationen aufweisen. Dies führt zur Hypothese, dass die Spurenelementgehalte im Quarz im Wesentlichen auf andere Ursachen zurückzuführen sind als auf wechselnde Zusammensetzung der hydrothermalen Lösung.

Im vierten Kapitel wird versucht, individuelle Generationen von Flüssigkeitseinschlüssen mit der Ausfällung von Cu-Fe-Sulfiden zu korrelieren, um die chemischen Bedingungen der Erzausscheidung zu rekonstruieren. Eine Kombination von SEM-CL und LA-ICPMS Untersuchungen zeigt, dass die hydrothermalen Lösungen vor und nach der Sulfidausscheidung sehr ähnliche Haupt- und Spurenelementgehalte aufweisen während die Kupferkonzentrationen, um zwei Größenordnungen abnehmen. Die Homogenisierungstemperaturen der kupferreich und der kupferarmen Brine-Fluideinschlüsse (i.e. Einschlüsse, die sehr salzreich und NaCl-gesättigt sind) unterscheiden sich jedoch nur gering (i.e. wenige zehn Grad Celsius), was darauf hindeutet, dass Kupfer in einem eng begrenzten Druck-Temperaturintervall zwischen 140 – 210 bar und 425 – 350 °C gebildet wurde. Diese Ergebnisse legen nahe, dass die Kupferausfällung im zentralen Bereich der Lagerstätte primär durch die Abkühlung der magmatisch-hydrothermalen Lösungen ausgelöst wurde. Andere Faktoren wie Mischung von magmatischem und meteorischem Fluid, chemische Effekte der Phasentrennung, oder Reaktionen mit dem Nebengestein sind von untergeordneter Bedeutung, mögen jedoch zur Abkühlung beigetragen haben. Die Kupferanreicherung wird daher in erster Linie auf die thermische Abkühlung des hydrothermalen Systems zurückgeführt. Die charakteristisch scharfe Grenze am unteren Rand des Haupterzkörpers wird deshalb als ein Kupfersättigungshorizont gedeutet, der, aufgrund vorliegender Daten aus der Mikrothermometrie, vermutlich vormals eine isothermale Oberfläche dargestellt hat, die während des Aufstiegs der magmatischen Lösungen über einen längeren Zeitraum stabil war.

Das fünfte Kapitel dokumentiert die räumliche und zeitliche Entwicklung des hydrothermalen Systems in Bingham, gestützt auf LA-ICPMS Analysen an ausgewählten Schlüsselproben. Vier Typen von Flüssigkeitseinschlüssen lassen sich unterscheiden, basierend auf ihrer Verteilung, Form, und ihre relative Phasenzusammensetzung bei Raumtemperatur. Flüssigkeitseinschlüsse in den tieferen Bereichen der Lagerstätte bestehen zumeist aus etwa 30 – 60 Vol-% Dampfphase mit <11 Gew.-% NaCl equivalent, einem geringen Anteil an CO₂ und einem opaken Tochterkristall, in der Regel Chalkopyrit. Diese Einschlüsse sind vermutlich magmatischen Ursprungs und spalteten sich beim weiteren Aufstieg in eine Dampfphase (mit >70 Vol-% Dampf, geringem Anteil von CO₂ und, seltener, einem opaken Tochterkristall aus Chalkopyrit oder Hämatit) und in eine Brinephase (mit 35 – 45 Gew.-% NaCl equivalent, einem Tochterkristall aus Halit und aus bis zu sieben weiteren transparenten und bis zu drei opaken Tochterkristallen). Zweiphasige wässrige Einschlüsse kommen auch vor. Sie sind sehr spät in der zeitlichen Einschluss-Abfolge und werden als meteorische Lösungen interpretiert. Die LA-ICPMS Analysen aller dieser verschiedenen Einschlusstypen dokumentieren, mit der Ausnahme von Kupfer, relativ konstante Konzentrationen von Haupt- und Spurenelementen. Abgesehen von den Cu/Na Verhältnissen, die in den Dampfeinschlüssen relativ variabel sind (0.03 bis 7.6), sind auch die Elementkonzentrationen der Fluideinschlüsse der tiefen Zone (in Bezug zu Na) beinahe identisch mit jenen der Dampfeinschlüsse, mit charakteristischen K/Na, Fe/Na, Mn/Na, Rb/Na, Sr/Na, Zn/Na, W/Na und Pb/Na Verhältnissen. Brine-Fluideinschlüsse haben ebenfalls ähnliche chemische Zusammensetzungen wie die Fluideinschlüsse der tiefen Zone. Sie besitzen jedoch höhere K/Na Verhältnisse, sehr geringe Mg/Na und relativ geringe Fe/Na, As/Na, W/Na, Sr/Na und Ba/Na Verhältnisse. Die Fluideinschlüsse der tiefen Zone besitzen sehr hohe Cu/Na Verhältnisse zwischen 0.1 bis 1.0. Die Cu/Na Verhältnisse im Zentrum der Bingham Mine variieren über zwei Größenordnungen. Das durchschnittliche Cu/Na Verhältnis der Dampfeinschlüsse ist ähnlich wie jenes der Fluideinschlüsse der tiefen Zone, während das Cu/Na Verhältnis bei den Brine-Fluideinschlüssen um bis zu einer Größenordnung geringer ist.

Die Metallzonierung von Bingham kann mit diesen Daten allein jedoch noch nicht ausreichend erklärt werden. Sie wird interpretiert als das Ergebnis des Zusammenspiels dreier Faktoren: Die selektive Ausscheidung von Bornit, Chalkopyrit und Gold, ihre gelegentliche Wiederauflösung an Orten lokaler Untersättigung, und der Herauslösung von erzbildenden Metallen aus einer ursprünglichen einphasigen hydrothermalen Lösung, aus der beim Aufstieg

eine Brinephase auskondensiert ist. Die grossen chemischen Ähnlichkeiten zwischen den Dampfeinschlüssen und den Fluideinschlüssen der tiefen Zone führt zu dem Schluss, dass sich das ursprüngliche Fluid der tiefen Zone in einen grossen Anteil einer Dampfphase und einen kleineren Anteil einer Brinephase aufspaltete. Ein weiteres Argument für die Dominanz der Dampfphase ist zudem, dass die letztere die Elementanreicherungen und Elementabreicherungen der Brinephase nicht widerspiegelt. Zudem belegen die LA-ICPMS Daten, dass Kupfer offenbar bevorzugt in die Dampfphase gewandert ist. Dies ergibt sich aus den erhöhten Cu/Na Verhältnissen in den Dampf-Fluideinschlüssen, die entweder vergleichbar oder höher sind als jene der Fluideinschlüsse der tiefen Zone und höher sind als jene der Brine-Fluideinschlüsse. Die Ergebnisse stützen die Hypothese, dass der grösste Anteil des Kupfers im zentralen Reicherzkörper der Mine aus der Dampfphase ausgeschieden wurde. Die Ausscheidung des Goldes in individuellen, aber das Kupfer überlappenden Zonen innerhalb der Gesamtvererzung hängt offenbar von einer Reihe von Faktoren ab. Schon relativ kleine Änderungen in der Temperatur der hydrothermalen Lösungen reichen offenbar aus, um starke Variationen in ihren Au/Cu Verhältnissen zu bewirken, aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit der Gold- und Kupferlöslichkeiten.

Die Ergebnisse dieser Arbeit wären ohne den kombinierten Einsatz der drei analytischen Methoden, bestehend aus konventionellen Flüssigkeitseinschluss-Untersuchungen, SEM-CL Petrographie und LA-ICPMS, nicht möglich gewesen. Die detaillierte petrographische Auskartierung einzelner Proben mit Hilfe der SEM-CL wurde als Grundlage verwendet für die textuelle Korrelation zwischen einzelnen Quarz- und Sulfidphasen sowie den damit assoziierten Flüssigkeitseinschlüssen. Die Mikrothermometrie erlaubte die Ermittlung der Bildungstemperatur und Bildungsdruckes. Die LA-ICPMS erlaubte die Analyse der Haupt- und Spurenelementkonzentrationen individueller Einschlüsse. Nur die Kombination aller dieser drei analytischen Verfahren erlaubte es, die physisch-chemischen Bedingungen während der Erz-Ausscheidung zu rekonstruieren. Dieser integrative Ansatz enthält noch ein vielversprechendes Potential für zukünftige Studien, nicht nur in der Lagerstätten-Forschung.

Summary

The Bingham porphyry copper-gold-molybdenum deposit, Salt Lake City, Utah, is an almost perfect field laboratory for studying porphyry-related magmatic-hydrothermal ore-formation, both because of its excellent vertical and lateral exposure and because of its relatively weak hydrothermal overprint. Bingham is late Eocene in age and claims to be the (by volume) biggest man-made hole on earth, containing a total of 2800 Mt ore grading at 0.73 wt-% Cu, 0.45 ppm Au, 3.9 ppm Ag, and 0.043 wt-% MoS₂. The intrusion has a distinct metal zonation with a cigar-shaped gold-rich orebody and an inverted cup-shaped copper mineralization extending beyond the gold-rich zone.

The main goals of this study were (1) to investigate the causes for the deposit-scale metal zonation at Bingham, (2) to define the causes of Cu-Fe sulfide and gold precipitation, and (3) to determine the temperature, pressure and chemical evolution of the ore-forming fluids. In order to achieve these goals, the magmatic-hydrothermal evolution of the Bingham porphyry copper deposit has been documented by a detailed fluid inclusion study of inclusions trapped at different stages of crystal growth of hydrothermal quartz veins. A combination of three analytical methods, i.e., conventional fluid inclusion methods, scanning electron microprobe – cathodoluminescence (SEM-CL), and laser ablation inductively-coupled plasma mass spectrometry (LA-ICPMS) has been used in this integrated study.

The first chapter of this thesis summarizes the geological knowledge of the Bingham porphyry Cu-Au-Mo deposit including the description of the lithologies, alteration zones, and mineralization patterns. It is mainly based on previous studies and on the published literature.

The second chapter summarizes the results from a detailed logging campaign of thirty-five drill core sections from seventeen drill cores collared along, or projected into one section across the first and volumetrically dominant quartz monzonite porphyry intrusion (-1400 East, Bingham mine grid). This chapter contains a detailed description of the vein sequence observed in the deep and peripheral parts of the Bingham porphyry copper system, and tries to expand the vein sequence from the center of the orebody. It also forms the base for the detailed LA-ICPMS study presented in the following chapters.

The third and the fourth chapter focus on the high-grade core of the deposit. The SEM-CL petrography in this area reveals two generations of vein quartz, implying a two-stage vein history with early crystal growth into open fractures followed by reopening and void and fracture filling. The first stage of CL-bright to CL-gray luminescent quartz forms the bulk of the quartz stockwork veins and consists of subhedral to anhedral quartz grains, some of which exhibit euhedral growth zoning. The second stage CL-dark luminescent quartz is closely associated with the Cu-Fe sulfide deposition, sometimes truncating and, hence, postdating quartz growth zones.

The third chapter aims at understanding the influence of the trace element content in quartz on the respective CL-response in these quartz generations documenting a general trend of increasing brightness of the CL response with an increasing total of trace element impurities. The LA-ICPMS studies reveal strongly variable concentrations of the elements Al, K, Ti, and Na across the two vein quartz types, indicating a negative correlation between trace element concentrations and CL gray values. The lowest contents of these elements are observed in the dark luminescent quartz next to sulfides, while the highest concentrations are obtained for the bright luminescent quartz. Variability in the trace element content of quartz and consequently variability in the CL response are generally related with changes in the composition of the quartz-forming fluid (such as, for example, variability in the trace element content, pH changes), temperature changes during mineral formation and changes in growth conditions such as the crystallization rate. Microthermometric fluid inclusion measurements (as described in detail in Chapter IV) suggest that the composition of the quartz-forming fluid, with the exception of Cu, varies little during the crystallization of the different quartz generations. This supports the hypothesis that the trace

element content of quartz is only to a lesser degree dependent on the composition of the quartz-precipitating hydrothermal fluid.

The fourth chapter tries to relate individual fluid inclusion generations to the formation of Cu-Fe sulfides and to constrain the chemical conditions of ore formation. Combined SEM-CL and LA-ICPMS studies show that the copper-rich fluids preceding sulfide precipitation and the copper-poor fluids (with copper concentration depleted by two orders of magnitude) postdating Cu-Fe-sulfide formation are very similar with regard to their major and minor element compositions (including Pb and Zn). Additionally, the average vapor disappearance temperatures and final homogenization temperatures of copper-rich and copper-poor brine inclusions show only a slight variation (several tens of °C), indicating that the main copper precipitation occurred in a tight pressure-temperature interval between 140 – 210 bar und 425 – 350 °C. These results support the hypothesis that copper precipitation in the central, metal-rich porphyry orebody was primarily controlled by cooling of magmatic-hydrothermal brine and vapor fluids, and not due to fluid mixing, chemical effects of phase-separation, or fluid/rock interaction. The degree of copper enrichment, i.e. the bulk hypogene ore grade, is thus interpreted to be mainly controlled by the thermal structure of the hydrothermal fluid flow system. In particular, the distinctly sharp lower boundary of the Bingham orebody is likely to represent a copper sulfide saturation horizon that, according to the available fluid inclusion data, probably corresponds to a near-isothermal surface maintained in place for considerable time while magmatic fluids ascended through the quartz monzonite porphyry.

The fifth chapter documents the spatial and temporal fluid evolution, as deduced from LA-ICPMS analyses on selected key samples. Four major types of fluid inclusions can be distinguished over the entire Bingham deposit in terms of their number, nature, and the relative proportions of phases at room temperature. Intermediate density fluid inclusions are typically CO₂-bearing, consisting of <11 wt-% NaCl eq., 30-60 vol-% vapor, and an opaque daughter crystal, usually chalcopyrite. They are restricted to the deep portions of the deposit and are interpreted to represent the magmatic input fluid. They underwent phase separation at shallower elevation into a vapor (CO₂-bearing, containing >70 vol-% vapor, and, in places, an opaque daughter crystal of chalcopyrite or hematite) and a brine phase (containing 35-45 wt-% NaCl eq., a daughter crystal of halite, and, in places, up to seven other transparent and up to three opaque daughter phases). Two phase aqueous fluid inclusions also occur; they are always late in the fluid inclusion sequence and are interpreted to be of meteoric origin. LA-ICPMS results of all these different fluid types exhibits a surprisingly simple evolution pattern of major and trace element compositions in time and space, with near-constant concentrations, but variable Cu contents. Except for the Cu/Na ratio, which varies in vapor inclusions from 0.03 to 7.6, the elemental compositions (relative to Na) of the intermediate density fluid inclusions are almost identical to those ones of the vapor inclusions, with well-defined concentrations of K/Na, Fe/Na, Mn/Na, Rb/Na, Sr/Na, Zn/Na, W/Na, and Pb/Na. Brine inclusions on the other hand have similar compositions as the intermediate density fluid inclusions, too, but they are enriched in K/Na, strongly depleted in Mg/Na, and slightly depleted in Fe/Na, As/Na, W/Na, Sr/Na, and Ba/Na ratios. Copper/Na ratios in the center of the Bingham deposit vary over two orders of magnitude. Intermediate density fluid inclusions have distinctly high Cu/Na ratios varying between 0.1 and 1.0. The average Cu/Na ratio of vapor inclusions, however, is similar to that one of intermediate density inclusions, whereas the average Cu/Na ratio of brine inclusions is depleted by one order of magnitude.

The deposit-scale metal distribution pattern as observed at Bingham cannot be explained conclusively with these results alone, but is considered to be the result of a combination of three major processes: selective precipitation of bornite, chalcopyrite, and gold, their occasional redissolution at sites of local undersaturation, and the partitioning of ore-forming components from an initially single-phase fluid condensing out some dense brine. The close chemical similarities of the vapor and intermediate density inclusions, without reflecting the elemental enrichment and depletion recorded by the brine inclusions, leads to the conclusions that the intermediate density fluid has separated into a large amount of vapor and a relatively small amount of brine and that, at Bingham, the total mass (and, even more so, the total volume) of vapor has exceeded the total mass of brine. Copper seems to have partitioned preferentially into the vapor phase, as documented by elevated Cu/Na ratios in vapor inclusions that are either comparable or exceed

those of intermediate density inclusions. These two observations lead to the hypothesis that most of the copper in the central, high-grade part of the deposit deposited from the vapor phase. The separation of gold and copper in distinct, but with copper overlapping, zones within the overall orebody could depend on a range of different factors. However, it appears that small variations in fluid temperature are adequate to explain a strong variation in Au/Cu ratios in the ore due to the steep temperature-dependence of gold and copper solubility.

Much of the results presented above could not have been obtained without the advantages of using the combination of conventional fluid inclusion methods, SEM-CL petrography, and LA-ICPMS microanalytical facilities. Detailed petrographic mapping supported by CL petrography has been used for the textural correlation between successive quartz types, sulfide deposition, and fluid inclusion assemblages, respectively. Microthermometric data permitted the temperature and pressure estimation. The LA-ICPMS revealed the major and trace elemental compositions of individual fluid inclusions. The combination of these analytical methods constrains the conditions of ore formation, determining the related temperature and pressure conditions and documenting chemical changes in the mineralizing fluids during sulfide deposition. The combination of these three methods bears a lot of potential in future studies of different types of deposits.