

DISS. ETH NO. 24848

***THE MAGMATIC TO HYDROTHERMAL EVOLUTION  
OF PORPHYRY CU-AU DEPOSITS - A ZIRCON PERSPECTIVE***

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

***SIMON JOHANN EYRE LARGE***

*Master of Science ETH in Earth Science, ETH Zurich*

born on 17.05.1987

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

*Prof. Dr. Christoph A. Heinrich, examiner  
Dr. Albrecht von Quadt, co-examiner  
Dr. Richard Sillitoe, co-examiner*

2018

## Abstract

This thesis comprises three papers investigating the magmatic-hydrothermal evolution leading to the formation of porphyry Cu-Au deposits. By combining high-precision geochronology and spatially resolved geochemistry on the same zircon grains at three different porphyry Cu-Au deposits the timescales of individual magmatic and hydrothermal processes, such as ore formation, magma cooling and fractional crystallisation, can be constrained. This established temporal sequence of events allows evaluating key magmatic processes that contribute to the genesis of porphyry deposits of different magnitude.

Chapter 1 provides an introduction to porphyry deposits, the processes known to be involved in their formation and highlights the advances made in geochronology that allow for the temporal resolution required for this study.

In chapter 2 geological field relationships are combined with spatially resolved geochemistry and high-precision U-Pb geochronology of zircons to reconstruct the magmatic evolution at the Ok Tedi porphyry-skarn Cu-Au deposit, PNG. Three pulses of porphyry emplacement separated by a total of ~160 ka can be resolved by chemical abrasion-isotope dilution-thermal ionization mass spectrometry (CA-ID-TIMS) U-Pb zircon geochronology. The combined chemical data and precise ages of zircons indicate ~200 ka of closed system fractional crystallization and concurrent cooling in a common magma reservoir, from which the intrusions at Ok Tedi were successively emplaced. Based on CL-imaging a chemically distinct zircon population with low Th/U was identified in the youngest syn-ore intrusive rocks. These zircons indicate injection of a distinct magma into the common magma reservoir, followed by the emplacement of the youngest porphyry intrusion, an intrusive breccia, and intimately associated hydrothermal Au-Cu mineralization. High-precision geochronology identifies near contemporaneous emplacement of the youngest porphyry and the intrusive breccia at  $1.187 \pm 0.022$  Ma. Magma injection into the common reservoir occurred <30 ka before this emplacement and mineralisation event indicating that this magma injection was the immediate trigger for Au-Cu mineralization at Ok Tedi.

In chapter 3 high-precision zircon geochronology (CA-ID-TIMS) and spatially resolved zircon geochemistry (LA-ICP-MS) are utilised to resolve the magmatic evolution of the magma reservoir and the timescales of magmatic and hydrothermal processes at the Pliocene Batu Hijau porphyry Cu-Au deposit. Emplacement of the oldest pre- to syn-ore tonalite ( $3.736 \pm 0.023$  Ma) and the

youngest tonalite porphyry cutting economic Cu-Au mineralisation ( $3.646 \pm 0.022$  Ma) is determined by the youngest zircon grain from each sample. These emplacement ages constrain the duration of metal precipitation to less than  $90 \pm 32$  ka. Protracted zircon crystallisation together with apatite and plagioclase is recorded within the same magma reservoir over  $>300$  ka. Zircon geochemistry resolves closed-system fractional crystallisation and cooling of an inhomogeneous magma reservoir over  $>200$  ka until emplacement of the first porphyry stock and onset of hydrothermal veining. After emplacement of the first porphyry, the magma reservoir reached high crystallinity, chemical and thermal stability over several 10s of ka. The data constrains  $\sim 200$  ka of fractional crystallisation and cooling within a large magma reservoir that lead to rapid ore formation associated with emplacement of the first porphyries. Cu-Au precipitating hydrothermal activity was probably terminated by the transition of the magma reservoir into a high-crystallinity mushy state.

In chapter 4 precise temporal constraints are assigned to the Eocene Bingham Canyon deposit providing an ideal case study to reveal the type of magma storage in the underlying magma reservoir and the magmatic to hydrothermal evolution leading to porphyry ore formation. By combining high-precision zircon geochronology by CA-ID-TIMS with spatially resolved LA-ICP-MS trace element analyses, a chemically homogenous magma is resolved that is dominated by fractional crystallisation and cooling over  $\sim 850$  ka. Incremental assembly of the large magma reservoir was followed by rapid cooling over  $88 \pm 31$  ka resulting in fluid exsolution and storage within the magma reservoir. Near contemporaneous porphyry emplacement and hydrothermal ore mineralisation indicates that magmas ejected from the reservoir to form the first porphyry-intrusion at Bingham led to fluid release into the upper crust and high-grade Cu-Au mineralisation. The bulk of Cu and Au was precipitated within  $155 \pm 31$  ka. Younger zircons record lower and rather constant temperatures of the magma reservoir when later pulses of hydrothermal activity provided minor additions to the Cu-Au content at Bingham Canyon.

Chapter 5 presents conclusions derived from the results of this thesis and combines them with data from previous high-precision geochronological studies to portray the magmatic processes leading to porphyry deposit formation. Finally, ideas for further research advancing our understanding of these deposits are presented.

## Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit umfasst drei Kapitel, in welchen die magmatische und hydrothermale Entwicklung von Magmen untersucht wird, die zur Bildung von Kupfer-Gold Porphyrlagerstätten führt. Durch die Kombination von hochpräzisen Geochronologieanalysen und geochemikalischer *in-situ* Untersuchungen an den gleichen Zirkonen können wir die Zeitskalen von individuellen magmatischen und hydrothermalen Prozessen quantifizieren. Die hergeleitete Sequenz von Prozessen kann genutzt werden, um Schlüsselprozesse für die Genese von Porphyrlagerstätten unterschiedlicher Größe herzuleiten.

Kapitel 1 beinhaltet eine Einführung zu Porphyrlagerstätten und den bekannten Prozessen die zu ihrer Genese führen. Weiterhin werden die Fortschritte in der U-Pb Geochronologie beleuchtet, welche die Untersuchung dieser Prozesse auf solch kleinen Zeitskalen erst möglich gemacht hat.

In Kapitel 2 werden Feldbeziehungen genutzt, um mit *in-situ* Zirkongeochemie und Zirkongeochronologie die magmatische Geschichte der Ok Tedi Kupfer-Gold Porphyrlagerstätte herzuleiten. Die heute aufgeschlossenen magmatischen Gesteine wurden in drei Schüben, über einen Zeitraum von 160 ka, injiziert. Die Zirkone deuten auf ein Magmareservoir hin, das über 200 ka fraktionell kristallisierte und abkühlte. Mit Hilfe von CL-Untersuchungen und der geochemischen Zusammensetzung der Zirkone konnten zwei Zirkonpopulationen charakterisiert werden. Eine Population mit niedrigen Th/U Verhältnissen, deutet auf eine Injektion von neuem Magma in das Magmareservoir hin. Die Mischung dieser Magmen führte schließlich zur Ejektion von eben diesen Magmen und Fluiden, welche zu den heute aufgeschlossenen jungen Gesteine sowie der Kupfer- und Goldmineralisation führten. Hochpräzise Geochronologie an Zirkonen erlaubt es den Zeitpunkt der Porphyrint intrusion und der Kupfer-Goldmineralisation auf  $1.187 \pm 0.022$  Ma zu bestimmen. Die Mischung von unterschiedlichen Magmen im tieferen Magmareservoir fand  $<30$  ka vorher statt, was auf eine direkte Verbindung von Magmenmischung, Magmen- und Fluidejektion und Erzbildung in Ok Tedi schließen lässt.

In Kapitel 3 werden geochronologische und geochemische Untersuchungen an Zirkonen genutzt, um die Entwicklung der magmatischen und hydrothermalen Prozesse zu rekonstruieren, die zur Genese der Batu Hijau Porphyrlagerstätte führten. Die älteste und jüngste Porphyrint intrusion grenzen die Erzbildung in Batu Hijau zeitlich ein. Die Alter der Intrusionen wurde auf  $3.736 \pm 0.023$  Ma und  $3.646 \pm 0.022$  Ma bestimmt und ergibt somit eine maximale Dauer der Erzmineralisation von  $90 \pm 32$  ka. Zirkone erlauben weiterhin Rückschlüsse auf über  $>200$  ka von vorangehender fraktioneller Kristallisation im darunterliegenden Magmareservoir. Nachdem der erste Porphyr in der

oberen Kruste gebildet wurde, erreichte das Reservoir einen thermischen und chemischen stabilen Zustand über mehrere 10 ka. Die Daten lassen darauf schließen das ~200 ka fraktionelle Kristallisation nötig ist, um spätere Erzbildung zu ermöglichen. Weiterhin scheint ein chemisch stabiler Zustand bei hoher Kristallinität zum Ende der Mineralisation zu führen.

In Kapitel vier konnte ich Prozesse, die zur Bildung der Bingham Canyon Kupfer-Goldporphyrlagerstätte geführt haben zeitlich eingrenzen. Diese ermöglichen es Rückschlüsse auf die Art der Magma, im darunterliegenden Magmareservoir, vor der Erzbildung zu ziehen. Die homogene Magma ist über ~850 ka gleichmäßig abgekühlt und kristallisiert. Die Schubweise Bildung des Reservoirs ging schnell von statten und darauf folgten  $88 \pm 31$  ka von schneller Abkühlung, die zur Fluidausscheidung aus der Magma führten. Die Fluide verblieben vermutlich im Reservoir bis die Ejektion von Magmen in die obere Kruste auch die Kupfer und Goldführenden Fluide freisetzte. Der Großteil des riesigen Erzvorkommens wurde innerhalb von  $155 \pm 31$  ka gebildet. Jüngere Zirkone deuten auf relativ stabile Temperaturen des Reservoirs nach der Haupterzbildung hin und lassen vermuten, dass spätere kleinere Pulse von Fluiden noch kleinere Mengen an Kupfer und Gold hinzugefügt haben.

In Kapitel 5 werden die Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst und mit Daten von früheren hochpräzisen geochronologischen Untersuchungen verglichen. Dies erlaubt eine einmalige Einsicht in die magmatischen Prozesse die zur Porphyrlagerstättenbildung führen.