

Insights on the role of alkaline magmatic
systems for epithermal gold potentials:
a case study of Conical Seamount,
Papua New Guinea

Dissertation

A thesis submitted for the degree of

Doctor rerum naturalium

At the

Faculty of Mathematics and Natural Sciences of the
Kiel Christian-Albrechts-University

submitted by

Louis-Maxime Gilles Gautreau

Kiel, May 2025

Thesis Advisor: Prof. Dr. Sylvia Gertrud Sander

Reviewer: PD Dr. Thor Henrik Hansteen

Date of oral exam: 24.06.2025

URN: urn:nbn:de:gbv:8:3-2025-00852-2

Declaration

I hereby declare that the content and design of the thesis are my own work, conducted under the guidance of my supervisors and only using the sources listed.

Parts of this work have been or are planned to be submitted in scientific journals for publication as follow: Chapter 1 in *LITHOS*, Chapter 2 in *Contributions to Mineralogy and Petrology* and Chapter 3 in *Journal of Petrology*. In these cases, contribution details to the manuscripts are provided and all kind of help during research work has been acknowledged adequately.

This work has not been submitted, either in whole or partially, at any other academic institutions for the obtention of any academic degree.

This thesis has been written in accordance with the guidelines of Good Scientific Practice of the German Research Foundation.

Prior to this thesis, I have not attempted to obtain a doctoral degree nor have ever been withdrawn from any academic degree.

Louis-Maxime Gautreau,

Kiel, 27.05.2025

Abstract

Alkaline porphyry-epithermal systems represent main gold sources throughout the world. While these systems are generally associated with arc or back-arc settings at subduction zones, they are not the products of typical arc volcanism, but rather of perturbations of the prevailing tectono-magmatic framework. In Papua New Guinea, located in the western Pacific and characterized by multiple subduction and collision events, copper (Cu-) and gold (Au-)rich porphyry-epithermal deposits are widely distributed. The Tabar-Lihir-Tanga-Feni (TLTF) island chain in north-eastern Papua New Guinea exhibits a particular metal endowment, especially exemplified by the giant Ladolam gold deposit on-shore Lihir island with more than 47.1 Mt Measured and Indicated Resources. In the past decades, increased attention has been given to the seamounts off-shore Lihir. Conical Seamount, located south to Lihir, has been well documented because of the hosting gold-mineralization, which is the site where epithermal-style mineralization was discovered on the seafloor first. Comparative studies have further suggested that Conical Seamount may represent a juvenile analogue to the Ladolam deposit.

However, the magmatic system of Conical Seamount underlying such a prominent gold mineralization has not been well constrained and remained widely unknown. This thesis aims at identifying and describing the main stages of magmatic evolution underneath Conical Seamount along with their importance for the metal transport and deposition. In a broader context, this study addresses the strong link between alkaline magmas and epithermal mineralization.

This work focuses first on reconstructing the magmatic evolution and ascent path of the magma underneath Conical Seamount and its implication for the ore-forming processes. Therefore, a detailed petrographic study combined with geochemical measurements of several magmatic samples recovered during previous cruises conducted with the research vessel SONNE (SO94, SO133 and SO166) was carried out. In addition, a recent research expedition (SO299) shed light on the mineralized Karambusel eruptive center, situated on the western flank of Conical Seamount. Karambusel hosts an active hydrothermal vent field as well as mineralization. This thesis revisits the magmatic history of Conical Seamount, based on petrological insights from Karambusel.

Conical Seamount is characterized by a modified mantle source from a previous subduction event. Modelling showed that the mantle source experiences prior depletion through melting as well as metasomatic enrichment. Furthermore, early and continuous

fractional crystallization drives alkalinity increase and volatile element enrichment, increasing thus the metal transport capability of the melt. Additionally, melt inclusion chemistry and glomerophytic textures indicate a shallow crustal magmatic reservoir. This reservoir experiences dynamic magmatic convection driven by frequent melt replenishment. Magmatic sulfides appear to be a transitional metal storage phase, which can be potentially extracted by fluid exsolution from the shallow magmatic reservoir.

Pressure-temperature calculation from volatile element analysis reflects a transcrustal magmatic plumbing system with several stagnation levels. In detail, enhanced magma fractionation starts at deep to mid-crustal levels. However, a major stagnation level is present in the shallow crust, localized at 4-5 km depth, and thus likely at the crust-sediment boundary and is supplied by different compositional melt batches. Notably, high volatile element content is likely to buffer the pressure changes due to melt replenishment. In addition, high crystallinity and CO₂ flushing processes drive fluid exsolution without volcanic eruption.

The Karambusel eruptive center is characterized by the presence of more hydrous phases as compared to the main edifice of Conical Seamount. The presence of amphibole and phlogopite as a main phenocrysts phase indicates higher water activities in the Karambusel magma. Whole rock and groundmass glass analysis reveal a more alkaline composition. The presence of iron-(oxy)hydroxide staining and only thin sediment cover on the magmatic units support a younger age of Karambusel compared to the main cone. However, thermobarometric calculations along with textural observations reveal a magmatic plumbing system similar to the other lavas of Conical Seamount. Notably, the different magmatic units exhibit isotopic signatures and parageneses gradually transitioning from the main cone to the Karambusel eruptive center. Thus, mixing occurred between the pre-existing residual melt erupting at Conical Seamount and a new, more hydrous parental magma. The latter originated from a more metasomatized mantle source and intruded into the magmatic plumbing system. Notably, magmatic sulfide is only found as inclusions in magnetite and, in one very rare case, within a clinopyroxene phenocryst, but appears to be absent from the groundmass at Karambusel. This may indicate that magmatic sulfides may have been either resorbed by magmatic volatiles flushing through the system or physically removed vapor-sulfide compounds.

Overall, Conical Seamount is characterized by several key features for the metal enrichment, transport and deposition: subduction-modified mantle source, shallow magma

chamber marked by metal extraction through sulfide precipitation and fluid exsolution. However, the specific case of the Karambusel eruptive center demonstrates that additional conditions are required to generate a more alkaline, fertile magma capable of producing epithermal Au mineralization. In particular, magmatic rejuvenation occurs through the ascent of a new, more hydrous parental magma. This melt likely originates from a mantle source characterized by increased metasomatism. Subsequent mixing with the pre-existing residing melt in the Conical Seamount magmatic system result in a higher fertility for epithermal mineralization.

Zusammenfassung

Alkalische Porphyro-Epithermalsysteme sind die wichtigsten Goldquellen der Welt. Obwohl diese Systeme im Allgemeinen mit Bogen- oder Backarc-Umgebungen an Subduktionszonen in Verbindung gebracht werden, sind sie nicht das Produkt von typischem Bogenvulkanismus, sondern eher von Störungen des vorherrschenden tektonischen und magmatischen Rahmens. In Papua-Neuguinea, einem Inselstaat, der im westlichen Pazifik liegt und durch mehrere Subduktions- und Kollisionsergebnisse gekennzeichnet ist, sind Kupfer- (Cu-) und Gold- (Au-) reiche porphyro-epithermale Lagerstätten weit verbreitet. Die Inselkette Tabar-Lihir-Tanga-Feni (TLTF) im Nordosten von Papua-Neuguinea ist besonders reich an Metallen. Ein Beispiel dafür ist insbesondere die Ladolam-Goldlagerstätte vor der Insel Lihir mit mehr als 47,1 Mio. Tonnen gemessenen und angezeigten Ressourcen. In den letzten Jahrzehnten gelangten die Tiefseeberge vor der Insel Lihir erhöht in den Fokus. Der südlich von Lihir gelegene Conical Seamount ist wegen der dortigen Goldmineralisierung gut dokumentiert. Es handelt sich um den Ort, an dem die epithermale Mineralisierung am Meeresboden zuerst entdeckt wurde. Vergleichende Studien haben außerdem ergeben, dass Conical Seamount ein junges Analog zur Ladolam-Lagerstätte darstellen könnte.

Das magmatische System des Conical Seamounts, welches zu einer deutlich ausgeprägten Goldmineralisierung führt, ist jedoch noch nicht gut erforscht und weitgehend unbekannt. Diese Arbeit zielt auf die Identifizierung und Beschreibung der wichtigsten Phasen der magmatischen Entwicklung unterhalb des Conical Seamounts sowie auf die Ergründung ihrer Bedeutung für den Transport und die Ablagerung von Metallen ab. Im weiteren Kontext befasst sich diese Studie mit dem engen Zusammenhang zwischen alkalischen Magmen und epithermalen Mineralisierung.

Diese Arbeit konzentriert sich zunächst auf die Rekonstruktion der magmatischen Entwicklung und des Aufstiegswegs des Magmas unter dem Conical Seamount sowie deren Auswirkungen auf die erzbildenden Prozesse. Zu diesem Zweck wurde eine detaillierte petrographische Studie in Verbindung mit geochemischen Messungen mehrerer magmatischer Proben durchgeführt, die auf früheren Fahrten mit dem Forschungsschiff SONNE (SO94, SO133 und SO166) gesammelt wurden. Darüber hinaus führte eine kürzlich durchgeführte Forschungsexpedition (SO299) zur Entdeckung des mineralisierten Eruptionszentrums Karambusel, welches an der Westflanke des Conical Seamounts liegt. Karambusel beherbergt sowohl ein aktives hydrothermales Schlotfeld als auch ein

Mineralisierungsvorkommen. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit die magmatische Geschichte des Conical Seamounts auf der Grundlage der petrologischen Erkenntnisse von Karambusel neu untersucht.

Der Conical Seamount zeichnet sich durch eine veränderte Mantelquelle aus, die von einem früheren Subduktionseignis abstammt. Modellierungen zeigen, dass die Mantelquelle zuvor durch Schmelzen verarmt und metasomatisch angereichert wurde. Darüber hinaus führt eine frühe und kontinuierliche fraktionierte Kristallisierung zu einem Anstieg der Alkalinität und einer Anreicherung flüchtiger Elemente, wodurch sich die Fähigkeit der Schmelze zum Transport von Metallen erhöht. Des Weiteren deuten die Chemie der Schmelzeinschlüsse und die glomerophyrischen Texturen auf ein magmatisches Reservoir innerhalb der oberen Kruste hin. Dieses Reservoir unterliegt einer dynamischen magmatischen Konvektion, die durch häufiges Nachfließen von Schmelze angetrieben wird. Magmatische Sulfide scheinen übergangsweise eine Speicherphase für Metalle zu sein, die möglicherweise durch Auslösung von Flüssigkeit aus dem oberen magmatischen Reservoir extrahiert werden können.

Druck-Temperatur-Berechnungen aus der Analyse flüchtiger Elemente deuten auf ein transkrustales magmatisches Leitungssystem mit mehreren Stagnationsstufen hin. Dies bedeutet, dass die Kristallisierung in der tiefen bis mittleren Erdkruste beginnt. Die Magmakammer in der oberen Kruste befindet sich in 4-5 km Tiefe und damit wahrscheinlich an der Krusten-Sediment-Grenze und wird von verschiedenen Schmelzen unterschiedlicher Zusammensetzung gespeist. Vor allem der hohe Gehalt an flüchtigen Elementen dürfte die Druckänderungen aufgrund der Ergänzung von Schmelzen abfedern. Darüber hinaus treiben eine hohe Kristallinität und CO₂-Spülprozesse die Flüssigkeitsauslösung ohne Vulkanausbruch voran.

Das eruptive Zentrum von Karambusel ist durch das Vorhandensein von mehr wasserhaltigen Phasen im Vergleich zum Hauptkegel des Conical Seamounts gekennzeichnet. Das Vorhandensein von Amphibol und Phlogopit als Phänokristalle deutet auf höhere Wasseraktivitäten im Karambusel-Magma hin. Die Analyse des Gesamtgestein und der Grundmassengläser zeigt eine eher alkalische Zusammensetzung. Das Vorhandensein von Eisen-(oxy)hydroxid-Färbungen und die nur dünne Sedimentbedeckung der magmatischen Einheiten sprechen für ein jüngeres Alter Karambusels im Vergleich zum Hauptkegel. Thermobarometrische Berechnungen und Gefügebeobachtungen lassen jedoch auf ein magmatisches Leitungssystem schließen, das dem des Conical Seamounts ähnelt.

Insbesondere die isotopische Signatur und die Paragenesen der verschiedenen magmatischen Einheiten zeigen einen graduellen Übergang vom Hauptkegel zum eruptiven Zentrum Karambusel. Es ist demnach zu einer Vermischung zwischen der bereits vorhandenen Restschmelze, die am Conical Seamount ausgebrochen ist, und einem neuen, wasserreicherem Magma gekommen. Letzteres stammt aus einer stärker metasomatisierten Mantelquelle und ist in das magmatische Leitungssystem eingedrungen. Auffallend ist die ausschließliche Präsenz von magmatischen Sulfiden als Einschlüsse innerhalb von Magnetit und Klinopyroxen Phänokristalle. Im Gegenteil scheinen diese in der Grundmasse komplett abwesend zu sein von Karambuselgesteine. Dies könnte darauf hindeuten, dass magmatische Sulfide entweder durch magmatische Fluide resorbiert oder als Dampf-Sulfid-Mischungen physikalisch entfernt wurden.

Insgesamt zeichnet sich der Conical Seamount durch mehrere Schlüsselmerkmale für die Anreicherung, den Transport und die Ablagerung von Metallen aus: eine durch Subduktion veränderte Mantelquelle und eine obere Magmakammer, die durch Metallextraktion durch Sulfidausfällung und Flüssigkeitsauslösung gekennzeichnet ist. Die speziellen Gegebenheiten im eruptiven Zentrum von Karambusel zeigen jedoch, dass zusätzliche Bedingungen erforderlich sind, um ein alkalischeres, angereichertes Magma zu produzieren, welches in der Lage ist, eine epithermale Au-Mineralisierung zu erzeugen. Insbesondere erfolgt die magmatische Verjüngung durch den Aufstieg eines neuen, wasserreicherem Magmas. Diese Schmelze stammt wahrscheinlich aus einer Mantelquelle mit verstärkter Metasomatisierung. Die anschließende Vermischung mit der bereits vorhandenen Schmelze im magmatischen System des Conical Seamount führt zu einem höheren Potenzial für epithermale Erzbildung.