

**Structural controls
on hydrothermal systems
on slow- and intermediate-spreading
mid-ocean ridges**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-
Universität zu Kiel

vorgelegt von
Meike Klischies

Kiel, 2021

Erster Gutachter:

Prof. M. D. Hannington

Zweiter Gutachter:

Prof. C. W. Devey

Tag der mündlichen Prüfung:

7. Juni 2021

Abstract

Mid-ocean ridges (MORs) accrete new ocean crust by magmatic and tectonic spreading processes and are cooled by hydrothermal circulation often creating seafloor massive sulphides (SMS). MORs spreading at slow- to intermediate rates (~20 to 60 mm/yr) host the majority of known hydrothermal occurrences (active, inactive and extinct) and are favourable settings for the accumulation of large SMS deposits, which are a potential future resource for metal supply. Geological maps are a common tool in land-based exploration to identify the setting of SMS deposits and to target exploration; however, vast portions of the MORs remain unmapped. As a result, the majority of sulphide occurrences are yet to be discovered and estimates of the global resource potential of the ocean floor are incomplete.

This thesis presents workflows and methodologies for geological mapping of the ocean floor at different scales ranging from ship-based surveys to collection and interpretation of high-resolution data using autonomous underwater vehicles.

Systematic approaches for interpretation of common remote sensing data of MORs are developed with the aim of assessing the geology and the key geological controls on hydrothermal systems. Examples are presented from 1) a regional-scale study of the Rodriguez Triple Junction in the Indian Ocean, 2) multi-scale mapping around hydrothermal occurrences in an area of the central Indian Ocean, and 3) site-specific mapping around 32 hydrothermal occurrences in the Indian Ocean.

At the Rodriguez Triple Junction, regional hydrothermal venting has accompanied abrupt changes in the rate of crustal growth, which are determined from area-age relationships and spatial distribution of large-scale geological units bound by crustal-scale structures. Geological mapping reveals larger SMS deposits occur >8 km from the MOR axis, where long-lasting hydrothermal circulation can be sustained by relatively stable crust and deeply rooted faults. Six distinct settings that host hydrothermal venting are identified in association with specific types of MOR crust: 1) off-axis volcanic fields, 2) axial shield volcanoes, 3) rift valleys, 4) tectonic massifs, 5) oceanic core complexes, and 6) shear-zone settings. This refines previous classifications of the settings of MOR hydrothermal vents as either 'magmatic' or 'tectonic' with additional interpretations of favourable geological formations and

structures that enable targeted exploration for SMS deposits, where only remote sensing data are available.

As more ship-borne multibeam echosounder data becomes available the geological models developed here for active and inactive SMS deposits can be applied in mineral potential mapping at other MORs. In particular, the approaches for geological mapping bridge an important exploration gap between the resolution of common remote-sensing data and the sizes of individual hydrothermal occurrences.

Zusammenfassung

Mittelozeanische Rücken (MOR) formen mit magmatisch-tektonischen Spreizungsprozessen neue ozeanische Kruste, die durch hydrothermale Zirkulation gekühlt wird und häufig mit der Bildung von Massivsulfiden am Meeresboden einhergeht. Die meisten bekannten hydrothermalen Vorkommen (aktive, inaktive und erloschene) sind an MOR mit langsamen bis intermediären Spreizungsraten (ca. 20 bis 60 mm/a) gebunden, die die Akkumulation von größeren Vorkommen begünstigen und daher als eine potenzielle, zukünftige Rohstoffquelle für Metalle gehandelt werden. Ein entscheidendes Werkzeug für die Exploration von Hydrothermalvorkommen an Land sind geologische Karten, mit denen die geologische Umgebung von Vorkommen charakterisiert wird und gezielt nach unbekanntem Vorkommen gesucht werden kann. Der Meeresboden ist jedoch in weiten Teilen noch nicht (geologisch) kartiert, sodass der Großteil der Massivsulfidvorkommen bisher unentdeckt geblieben ist und Schätzungen des globalen Rohstoffpotenzials unvollständig sind.

Diese Dissertation präsentiert Arbeitsabläufe und Methoden für das geologische Kartieren des Meeresbodens über Maßstabsgrenzen hinweg, von schiffsbasierten Untersuchungen bis hin zur Sammlung und Interpretation von hoch-auflösenden Daten mittels autonomer Unterwasserfahrzeuge.

Der systematische Ansatz bei der Interpretation typischer Fernerkundungsdaten von MOR ermöglicht es, die Geologie und Schlüsselprozesse an bekannten Hydrothermalvorkommen zu erfassen. Dies wird anhand von Beispielen gezeigt, wie 1) der Studie der „Rodriguez Triple Junction“ in regionalem Maßstab, 2) einer maßstabsübergreifenden Kartierung an ausgewählten Hydrothermalvorkommen im zentralen Indischen Ozean, sowie 3) der Analyse von insgesamt 32 Hydrothermalvorkommen im Indischen Ozean im lokalen Maßstab.

An der Rodriguez Triple Junction tritt hydrothermale Zirkulation in Verbindung mit Veränderungen in den Bildungsraten neuer Ozeankruste auf, die sich aus der regional-skalaren Verteilung von kartierten, geologischen Krusteneinheiten ableiten lassen und in Verbindung zu Störungszonen im Krusten-Maßstab stehen. Größere Hydrothermalvorkommen befinden sich in mehr als 8 km Entfernung zur MOR-

Achse, wo relativ stabile Ozeankruste und tiefgreifende Störungszonen eine langfristige hydrothermale Zirkulation begünstigen. Insgesamt konnten sechs verschiedene Arten von Ozeankruste definiert werden, die hydrothermale Zirkulation begünstigen: 1) das abseits der Rückenachse gelegene vulkanische Feld, 2) der axiale Schildvulkan, 3) der zentrale MOR-Graben, 4) das tektonische Massiv, 5) der ozeanische Kernkomplex und 6) die Scherzonen-Umgebung. Diese Einteilung verfeinert die bisher geltende Unterscheidung von „magmatischen“ und „tektonischen“ Vorkommen und ergänzt die Klassifizierung um konkrete lithologische Begebenheiten, Grenzwerte und Strukturen. Dies ermöglicht eine gezielte Suche nach ähnlichen geologischen Begebenheiten in Regionen, von denen es lediglich Fernerkundungsdaten gibt.

In Anbetracht der stetig wachsenden Verfügbarkeit von schiffsbasierten Fächerecholotdaten bieten die hier präsentierten Modelle für aktive und inaktive Massivsulfidvorkommen eine wichtige Grundlage für die Anwendung von „Mineral Potential Mapping“ an anderen MOR. Diese Anwendungen schließen eine bedeutende Lücke in der Exploration des Meeresbodens, die sich aus der typischen Auflösung von Fernerkundungsdaten und der Größe (erloschener) Hydrothermalvorkommen ergibt.