

The interplay of faulting, magmatism and hydrothermal fluid flow at oceanic ridges – new insights from numerical modeling

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Christine Andersen

Kiel, 2015

Referent:

Professor Dr. Lars Rüpke

Korreferent:

Professor Dr. Mark Hannington

Tag der mündlichen Prüfung:

21. Juli 2015

Zum Druck genehmigt:

Kurzfassung

Segmente des langsam-spreizenden Mittelatlantischen Rückens durchlaufen abwechselnd Perioden tektonischer und magmatischer Krustenbildung. Ein Hauptziel dieser Arbeit ist es die Hypothese, dass das tektonisch-magmatische Stadium langsam-spreizender Rückensegmente die Position hydrothermaler Quellen kontrolliert, zu beweisen. Hydrothermale Aktivität würde während magmatischer Phasen nahe der Rückenachse auftreten und wäre in tektonischen Phasen von Störungszonen kontrolliert und würde in einer Entfernung zur Rückenachse auftreten. Weiterhin tragen die Ergebnisse, die hier präsentiert werden, dazu bei neue Einsichten über das Zwischenspiel von Permeabilität assoziiert mit z.B. Rissen und Störungszonen, Magmatismus und hydrothermaler Zirkulation in der ozeanischen Lithosphäre zu gewinnen.

Numerische Simulationen wurden mit zwei verschiedenen 2D Finite Elemente Codes durchgeführt. Ein mechanisches Model wurde entwickelt, welches für voll visko-elastisch-plastische Deformation der Lithosphäre an ozenischen Rücken löst. Modellierung der Meeresbodenspreizung unter variierenden tektono-magmatischen Konditionen zeigt wie Krustenausdünnung und spröde Deformation entlang von Brüchen mit der Dominanz tektonischer Prozesse, wenn der Rückenachse weniger Magma zugeführt wird, zunimmt. Die Zirkulation hydrothermaler Fluide in der ozeanischen Kruste wird mit einem Model für poröses Fließen simuliert, welches für die Konvektion von inkompressiblem Wasser löst. Es wird dargestellt wie Permeabilitätskontraste in der Lithosphäre die Temperatur, den Massenfluss und die Energiebilanz submariner Hydrothermalfluide während des Aufstiegs zum Meeresboden kontrollieren. Die Kontrolle permeabler Störungszonen über Temperaturen und Fließmuster hydrothermaler Fluide wird am Logatchev 1 Hydrothermalfeld am Mittelatlantischen Rücken als Typbeispiel untersucht. Das Logatchevfeld ist mit einer aktiven tektonischen Störungzone assoziiert. Gemessenen Mikroseismizität und Meeresbodenbathymetrie sind im Model inkludiert. Hochtemperatur-hydrothermalfluide können nur effizient durch permeable Störungszonen fließen, welche nicht zu breit oder zu durchlässig sind. Ansonsten tritt ein deutlicher Temperaturabfall als Konsequenz von Durchmischung mit

eindringendem kalten Meerwasser auf. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass eine signifikante Menge hydrothermaler Zirkulation an langsam-spreizenden Rücken, welche häufig mit permeablen Störungszonen assoziiert sind, mit niedrigeren Temperaturen als an schnell-spreizenden Rücken auftritt. Dies ist potenziell wichtig für die Abschätzung der globalen Ausbreitung von SMS Vorkommen an ozeanischen Rücken, welche sich am effizientesten bilden wenn die Temperaturen von Hydrothermalfluiden höher als $\sim 300^{\circ}\text{C}$ sind.

Die kombinierten Ergebnisse der Modellierung von hydrothermalen Fließprozessen und des mechanischen Modells für die Deformation ozeanische Rücken zeigen wie die Position hydrothermaler Quellen von unterschiedlichen Stilen der Meeresbodenspreizung kontrolliert wird. Dies bestätigt die anfängliche Hypothese dieser Arbeit: die Lage der Wärmequelle kontrolliert die Position von hydrothermalen Quellen am Meeresboden in der Achsenregion unter magmatischen Konditionen, während die Position der Quellen in tektonischen Phasen von permeablen Störungszonen kontrolliert werden, welche in einer Entfernung zur Rückenachse am Meeresboden enden.

Abstract

Segments of the slow-spreading Mid-Atlantic Ridge (MAR) undergo shifting periods of tectonic and magmatic crustal accretion. A key goal of this work was to prove the hypothesis stating that the tectono-magmatic state of slow-spreading ridge segment control the position of hydrothermal vent sites: hydrothermal venting would occur in the axial region during magmatic phases and would be fault-controlled and occur in a distance to the ridge axis during periods dominated by tectonic activity. Further the results presented here provide new insights about the interplay of permeability associated with e.g. fractures and faults, magmatism and hydrothermal circulation in oceanic lithosphere.

Numerical simulations were conducted using two different Finite Element based 2D codes. A mechanical model has been developed that solves for the fully visco-elasto-plastic deformation of the lithosphere at oceanic ridges. Modeling of seafloor spreading under varying tectono-magmatic conditions show how crustal thinning and brittle faulting is increasing with dominance of tectonic processes, where less magma is supplied to the ridge axis. The circulation of hydrothermal fluids in the oceanic crust is simulated by applying a porous flow model, which solves for the convection of incompressible pure water. How permeability contrasts in the lithosphere control temperature, mass flux and the energy balance of submarine hydrothermal fluids during their ascent to the seafloor is illustrated. The control of permeable fault zones on hydrothermal vent temperatures and flow pattern is investigated at the Logatchev 1 hydrothermal field on the MAR as type example. The Logatchev field is associated with an active tectonic fault zone. Measured microseismicity and seafloor bathymetry is included in the model. High-temperature hydrothermal fluids can only efficiently flow along permeable fault zones that are not too permeable or wide, otherwise a distinct temperature drop as the result of mixing with entraining cold seawater occurs. The results imply that a significant amount of the hydrothermal circulation at slow-spreading ridges, which are frequently associated with permeable fault zones, is occurring at lower temperatures than at fast-spreading ridges. This implication is potentially important for the global estimate of SMS deposits at oceanic ridges, which most efficiently form if

hydrothermal fluid temperatures are higher than $\sim 300^{\circ}\text{C}$.

The combined results from hydrothermal flow modelling and lithosphere-scale mechanical model of oceanic ridges demonstrate how vent site location is controlled by different styles of seafloor spreading, which confirms the initial hypothesis of this work: the position of the heat source controls the location of on-axis hydrothermal vents at the seafloor under magmatic conditions while the location is controlled by permeable fault zones that are outcropping in a distance to the ridge axis under tectonic conditions.