

**Subsurface hydrology of submarine arc volcanoes,  
with application to the active hydrothermal system  
at Brothers volcano, Kermadec arc, New Zealand**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES  
(DR. SC. ETH ZURICH)

presented by

GILLIAN GRUEN

Dipl. Natw. ETH Zurich

born April 2, 1982  
in Columbus, Ohio, USA

citizen of  
Switzerland, Germany  
and United States of America

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Christoph A. Heinrich, examiner  
PD Dr. Thomas Driesner, co-examiner  
Dr. Cornel E. J. de Ronde, co-examiner  
Prof. Dr. Wolfgang Bach, co-examiner

## Abstract

The study of submarine arc volcanoes is a relatively young scientific field and has attracted more and more attention during the last decade from various scientific organizations as well as from the public. Every year, numerous interdisciplinary ship-borne expeditions go to volcanically active convergent plate margins to conduct in-situ observations along intraoceanic volcanic arc fronts as well as in back-arc basins. Work done ranges from regional measurements to detailed, site-specific monitoring. Their collective aim is to collect data which enable us to better understand the past, present, and potential future of these volcanic systems, with special interest in their ecologic impact and their ability to form ore deposits.

Numerical methods are a powerful tool to complement in-situ measurements on the seafloor and within the ocean crust, especially where limited information is available from the subsurface and where physical and chemical processes are complex. This thesis presents the results of multi-phase fluid flow simulations applied to an active submarine volcano. For this, Brothers volcano was chosen, a hydrothermally active submarine volcano of the southern Kermadec intraoceanic arc, northeast of New Zealand, part of the circum-Pacific Ring of Fire. Brothers volcano consists of a collapse caldera encompassing two post-collapse cones and is arguably the best studied submarine arc volcano on Earth. It provides insights into the complex subseafloor structure and the physical and chemical temporal evolution of these volcanoes and their various hydrothermal vents.

The main objective of this thesis is to determine and study the characteristics of vent sites at arc-related volcanic edifices. These include (1) the contribution of magmatic fluids from a hydrous underlying magma chamber and (2) the volcano morphology and hydrology. This thesis aims to characterize the physical conditions of subseafloor fluid flow in arc volcanic systems, and to identify their implications on the geochemical manifestations on the seafloor.

Hydrothermal activity on the seafloor has been observed to be bound to topographically elevated features. An analysis of the physical effect of seafloor topography on subseafloor hydrothermal flow patterns explains why, underneath a topographic slope, upflow zones are deviated towards topographic highs. Numerical simulation results for simplified seafloor configurations confirm this flow pattern.

Based on available geological, geochemical, and geophysical constraints, two conceptual models for the current and past magmatic-hydrothermal history at Brothers have been developed, which are used as geometric input for two-dimensional models. The fluid circulation thermally driven by an underlying magma chamber is investigated. Simulation results suggest that present venting at the inner walls of the caldera requires a high permeability fault zone underneath the caldera walls, which is in agreement with the observation of high-temperature venting in this area which is controlled by caldera ring faults and focused through black smoker chimneys.

Based on the physical conditions of the fluids and their comparison with direct observations at various vent sites, implications on geochemical consequences are done. Observed variations in venting salinities, for instance, have been explained by phase separation ("boiling") occurring in the subsurface. In the simulations, this can only be achieved by additional heat and salt provided

by a magmatic fluid exsolving from a hydrous magma chamber. The transition of a hydrothermal fluid from one phase state to another has consequences on its physical conditions (such as the significantly lower density of a vapor compared to a liquid phase), as well as on the partitioning behavior of contained chemical species (e.g., the fractionation of hydrogen isotopes, sulfur, and dissolved metals between vapor and liquid). It is therefore important to determine the physical evolution of hydrothermal fluids circulating in the subseafloor to improve our understanding about the evolution of submarine volcanic system and their role in ore formation.

A key result of this thesis is the significance of a magmatic fluid contribution for subseafloor phase separation processes and their possible consequences on magmatic-hydrothermal ore formation in submarine arc volcanoes.

## Zusammenfassung

Vulkane unterhalb der Wasseroberfläche haben im vergangenen Jahrzehnt immer mehr an Aufmerksamkeit gewonnen, dies sowohl im wissenschaftlichen Bereich, als auch in der Medienwelt. Jährlich werden zahlreiche Forschungsreisen zu vulkanisch aktiven Plattengrenzen unternommen. Deren Ziel ist die vielseitige Vermessung und Beobachtung an der vulkanischen Front von intra-ozeanischen Bögen (arcs) und der dahinter liegenden Bereiche, den Backarc-Becken. Nebst detaillierten Einzeluntersuchungen werden auch regionale Effekte betrachtet. Zweck dieser Forschungsarbeit ist das Sammeln diverser Messungen, deren Analyse für das Verständnis vergangener, gegenwärtiger und möglicherweise auch zukünftiger Prozesse in diesen komplexen Systemen eine wichtige Rolle spielt.

Einen wichtigen Beitrag für das Verständnis untermeerischer Vulkansysteme liefern numerische Methoden. Diese können wichtige Knotenpunkte, welche für direkte Messungen oft unerreichbar sind, ergänzen oder komplexe physikalische und chemische Prozesse besser in den Gesamtkontext stellen. Die vorliegende Dissertation präsentiert neue Erkenntnisse über das Fliessverhalten mehrphasiger hydrothermaler Lösungen ("Fluide") eines realen, aktiven Unterwasservulkans, welche mit Hilfe numerischer Computersimulationen gewonnen wurden. Der hierfür verwendete Vulkan, Brothers, befindet sich an der vulkanischen Front des südlichen Kermadec-Bogens, nördlich von Neuseeland. Der besonders aktive Vulkan ist Teil des bekannten zirkumpazifischen "Ring of Fire". Brothers besteht aus einem Einsturzkrater und zwei darin aufgeschütteten Vulkankegeln. Gegenwärtig ist er der wohl am besten studierte Unterwasservulkan. Er liefert dadurch zwar wichtige Einblicke in seine komplexe Untergrundstruktur, birgt jedoch weiterhin ungeklärte Aspekte zu den darin ablaufenden physikalischen und chemischen Vorgängen. Deren genauere Erkundungen wiederum sind behilflich beim Begründen der unterschiedlichen Charakteristiken seiner hydrothermalen Aktivität, welche am Meeresboden direkt gemessen werden.

Diese Arbeit ist eine Erweiterung einer numerischen Studie über Hydrothermalsysteme am mittelozeanischen Rücken. Die wichtigste Aufgabe war daher, signifikante Unterschiede zwischen der hydrothermalen Aktivität mittelozeanischen Rücken und jener bei vulkanischen Bögen zu definieren und zu untersuchen. Dazu gehören (1) der Beitrag einer magmatischen Lösung, die sich aus einer unterliegenden, wasserhaltigen Magmenkammer auslöst und (2) der Einfluss der Oberflächenform und der Hydrologie des studierten Vulkans. Zudem sollte die physikalischen Zustände des Fluidflusses im Untergrund von untermeerischen Vulkansystemen beschrieben und deren Auswirkung auf geochemische Erscheinungsformen am Ozeanboden erörtert werden.

Direkte Beobachtungen geben uns den Hinweis, dass die hydrothermale Aktivität am Meeresboden an topographische Erhöhungen gekoppelt ist. Der Effekt einer Meerbodenerhebung auf die Fliessstrukturen einer Hydrothermallösung wird physikalisch analysiert. Damit kann erklärt werden, warum sich unterhalb einer solchen Topographie die Ausflusslokalitäten hangaufwärts bewegen. Ein solches Verhalten kann zudem in den durchgeführten Simulationen beobachtet werden.

Anhand geologischer, geochemischer und geophysikalischer Beobachtungen wurden zwei Hauptstadien der magmatisch-hydrothermalen Entwicklung von Brothers definiert. Diese Entwicklungsstadien wurden als geometrische Grundlage für meine zweidimensionalen Computermodelle genutzt, an denen die von der unterliegenden Magmenkammer angetriebene Fluidzirkulation untersucht wird. Wie sich zeigt, muss für die beobachtete hydrothermale Aktivität an der Kraterwand eine höher permeable Bruchzone vorhanden sein. Dies deckt sich mit den Beobachtungen, dass an diesen Stellen hoch-temperierter Fluidausfluss durch Verwerfungen (faults) kontrolliert und durch "Schwarze Raucher" (black smokers) fokussiert wird.

Weiter werden die physikalischen Zustände der Hydrothermallösungen sowie deren geochemische Auswirkungen untersucht und mit Feldbeobachtungen an unterschiedlichen Lokalitäten verglichen. Z.B. wurden beobachteten Salinitätsvariationen anhand von Phasentrennung (phase separation) im Untergrund erklärt. Die durchgeführten Simulationen zeigen, dass dies nur durch ein magmatisches Fluid erreicht werden kann, welches sich aus dem wasserreichen Magma auslöst und das System mit zusätzlicher Wärmeenergie und Salz versorgt. Der Phasenübergang der hydrothermalen Lösung hat Auswirkungen sowohl auf deren physikalische Eigenschaft (z.B. die geringere Dichte von Wasserdampf gegenüber einer Flüssigphase) als auch auf das Aufteilungsverhalten der darin enthaltenen chemischen Stoffe (z.B. die An- bzw. Abreicherung von Wasserstoffisotopen, Schwefel und gelösten Metallen zwischen der Dampf- und Flüssigphase).

Die in dieser Dissertation präsentierten Aspekte von vergangenen, gegenwärtigen und höchst wahrscheinlich auch zukünftigen Prozessen untermeerischer Vulkane erlauben wichtige Einblicke in die komplexen physikalischen und chemischen Abläufe im Untergrund hydrothermalen Aktivität. Das damit gewonnene Wissen trägt ebenfalls zum Verständnis zur Entstehung und Entwicklung möglicher metallischer Lagerstätten bei.