



Doctoral Thesis

Numerical modeling of magma ascent and emplacement in the continental lithosphere and crust

Author(s):

Keller, Tobias

Publication Date:

2013

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010192539> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH N° 21151

Numerical modeling of magma ascent and emplacement in the continental lithosphere and crust

a dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

TOBIAS KELLER

MSc ETH in Earth Sciences

6. September 1982

Hombrechtikon ZH

(accepted) on the recommendation of

Examiner	Prof. Dr. Paul J. Tackley
Co-examiners	Prof. Dr. Boris J. P. Kaus
	Prof. Dr. Marc Spiegelman
	Prof. Dr. Taras V. Gerya

2013

Abstract

Magmatism in the continental lithosphere often occurs along convergent margins, where partial melts are formed in the mantle wedge above a subducting slab of oceanic crust. The mechanics of magma ascent through the cold and mechanically strong continental lithosphere and its emplacement as plutonic bodies in the crust are not yet well understood. Also, the coupling between physical modes of melt transport and magmatic differentiation, which produces intermediate to felsic magma bodies from mafic mantle melts, remains an open problem. This thesis addresses the problem of the thermally and compositionally coupled physics of melt ascent in the continental lithosphere by means of numerical simulations.

Numerical models form an essential tool of investigation in geodynamics, where processes of interest often occur on time- and length scales inaccessible to direct observation. Here, a numerical model of two-phase flow is used to describe the physics of a low viscosity silicate melt in interaction with a high viscosity rock phase. As the continental lithosphere is relatively cool and therefore mechanically strong, it is essential to consider not only viscous creep, but also elasto-plastic modes of deformation in the model description as well. A realistic visco-elasto-plastic rheology has not previously been included in numerical model of geodynamic two-phase flow. Therefore, a physically consistent formulation of shear and tensile plastic failure in a two-phase medium is here derived from general plasticity theory.

Numerical simulations of melt transport in a visco-elasto-plastically deforming host rock performed at a range of rock viscosities reveal three distinct regimes of melt transport, two of which are governed by plastic failure of the host rock. These regimes are melt diapirism, occurring at low rock viscosities, decompaction channeling, emerging at intermediate rock viscosities, and tensile fracturing, observed at high rock viscosities.

Finally, the numerical method is expanded to include the thermal and compositional evolution of the magmatic system, along with a thermodynamically consistent melting model. The compositional variable represents a two end-member solid solution between an enriched (felsic) and a depleted (ultramafic) silicate component. The fully coupled numerical model may now be used to study the thermally and compositionally coupled ascent of magma bodies through the continental lithosphere.

Simulation results indicate that melt penetrates the lithosphere by means of plastic failure of the host rock induced by over-pressured melt and regional tectonic stress. During ascent and emplacement, the melt of initially mafic composition differentiates to intermediate to felsic

composition, effected by fractional crystallization and/or crustal contamination, depending mainly on the relative magnitude of pervasive versus advective melt transport. Furthermore, the simulation results demonstrate that igneous rock formations at crustal levels may often be emplaced incrementally, as consecutive melt pulses preferentially ascend into the lithosphere through weak conduits left behind by the ascent of previous magma bodies.

Zusammenfassung

Magmatismus in der kontinentalen Lithosphäre tritt oft entlang konvergenter Plattenränder statt, wo sich im Mantelkeil oberhalb einer subduzierenden ozeanischen Platte partielle Schmelzen bilden. Die Mechanik des Aufstiegs dieser Magmen durch die kühle und mechanisch feste kontinentale Lithosphäre und deren Ablagerung als plutonische Gesteinskörper in der Kruste sind bis anhin noch nicht wohlverstanden. Ebenso bleibt die Verknüpfung zwischen der Art des physikalischen Schmelztransportes und der magmatischen Differenzierung, durch welche aus ursprünglich mafischen Schmelzen intermediäre bis felsische Magmen hervorgebracht werden, ein offenes Problem. Diese Arbeit adressiert das Problem der thermisch und kompositionell gekoppelten Physik des Schmelzaufstiegs in der kontinentalen Lithosphäre mit Hilfe von numerischen Simulationen.

Numerische Modelle bilden ein essentielles Untersuchungsmittel in der Geodynamik, wo Prozesse von Interesse oft auf Zeit- und Längenskalen auftreten, welche nicht der direkten Beobachtung zugänglich sind. Ein numerisches Zweiphasen-Fließmodell wird eingesetzt, um die Physik einer niedrig viskosen Flüssigphase in Wechselwirkung mit einer hoch viskosen Gesteinsphase zu beschreiben. Da die kontinentale Lithosphäre relativ kühl ist und sich deshalb mechanisch fest verhält, ist es unablässig, nicht nur viskoses Kriechen sondern auch elasto-plastische Deformationsarten in der Modellbeschreibung zu berücksichtigen. Eine realistische, visko-elasto-plastische Rheologie wurde bisher in der Geodynamik noch nicht in numerische Zweiphasenmodelle mit eingeschlossen. Deshalb wird hier aus der allgemeinen Plastizitätstheorie eine physikalisch konsistente Formulierung für plastische Scher- und Zugbrüche in einem Zweiphasen-Medium hergeleitet.

Numerische Simulationen über Schmelztransport in einem sich visko-elasto-plastisch deformierenden Nebengestein zeigen drei ausgeprägte Formen des Schmelztransportes auf, wovon zwei von plastischer Bruchbildung im Nebengestein geprägt sind. Diese Formen des Schmelztransportes sind Schmelzdiapirismus, welcher bei tiefen Gesteinsviskositäten auftritt, Dekompaktions-Kanalisation, welche bei mittleren Gesteinsviskositäten aufkommt, und Zugbruchbildung, welche bei hohen Gesteinsviskositäten beobachtet wird.

Schlussendlich wird das numerische Verfahren ergänzt, um die thermische und kompositionelle Entwicklung des magmatischen Systems mitsamt eines thermodynamisch konsistenten Schmelzmodells mit einzuschließen. Die kompositionelle Variable repräsentiert dabei eine Mischung

zwischen den zwei Endgliedern einer angereicherten (felsischen) und einer abgereicherten (ultramafischen) Silikatkomponente. Das vollständig gekoppelte numerische Modell kann nun dazu verwendet werden, den thermisch und kompositionell gekoppelten Aufstieg von Magmakörpern durch die kontinentale Lithosphäre zu untersuchen.

Simulationsergebnisse zeigen an, dass Schmelze die Lithosphäre mittels plastischer Durchbildung des Nebengesteins unter Schmelzüberdruck und regionaler tektonischer Spannung zu durchdringen vermag. Während des Aufstiegs und der Ablagerung differenziert die Schmelze von ursprünglich mafischer Zusammensetzung hin zu intermediären und felsischen Zusammensetzungen, bewirkt durch fraktionelle Kristallisation und/oder Kontaminierung durch Krustengesteine, abhängig hauptsächlich von der relativen Größenordnung von perkolativem gegenüber advektivem Schmelztransport. Zusätzlich legen die Simulationsergebnisse dar, dass magmatische Gesteinsformationen in der Krust wahrscheinlich oft schrittweise abgelagert werden, da aufeinanderfolgende Schmelzpulse vorzugsweise durch von vorangegangenen Magmakörpern zurückgelassene, aufgeweichte Kanäle in die Lithosphäre aufsteigen.