



Doctoral Thesis

## Numerical modelling of the evolution of large scale thermo-chemical heterogeneities in the lower mantle of the Earth

**Author(s):**

Li, Yang

**Publication Date:**

2015

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010406905> →

**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 NO. 22300

NUMERICAL MODELLING OF THE EVOLUTION OF  
LARGE SCALE THERMO-CHEMICAL  
HETEROGENEITIES IN THE LOWER MANTLE OF  
THE EARTH

A dissertation submitted to  
ETH ZÜRICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
YANG LI

MSc in Geophysics, University of Science and Technology of China, Hefei, China

Born on August 19<sup>th</sup> 1984

Citizen of People's Republic of China

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Paul J. Tackley, examiner

Prof. Dr. Cinzia Farnetani, co-examiner

Dr. Frédéric Deschamps, co-examiner

2015

---

The deep mantle ( $> 2400\text{km}$ ) of the Earth is largely heterogenous. The most striking figures are the two large low shear velocity provinces (LLSVPs) beneath the Africa and the Pacific, which almost cover one third to one half of the CMB region, and extend upward to hundreds of kilometers from CMB. Although a thermo-chemical structure is required to explain the seismic observations, the nature of LLSVPs is still not fully understood. Therefore, this thesis aims at exploring the model space of thermo-chemical convection that can maintain large-scale chemical heterogeneities in the lower mantle, which will give a better understanding on how the LLSVPs could remain stable in the lower mantle for a long period of time comparable to the history of the Earth.

First, we extend the model space from previous 3-D Cartesian geometry to 3-D spherical geometry, which is more like the shape of the Earth. We found that the main findings from 3-D Cartesian experiments are still valid in 3-D spherical geometry after slight modifications. Furthermore, we found with an intermediate buoyancy ratio and large thermal viscosity contrast, the chemical structure (primordial reservoirs of dense material in this study) is dominated by spherical harmonic degree 2, as in the case of the Earth's mantle, and plumes arise more from edges of dense piles instead of randomly with a smaller volume fraction of initial primordial material.

Second, we extend the search of the model space to include the phase transition from perovskite (pv) to post-perovskite (pPv), and we focus on the viscosity ratio between pv and pPv in investigating the effects of this phase transition on the stability and structure of primordial reservoirs in the lower mantle. In a model in which parameters are chosen from the findings of our first work to be able to maintain primordial reservoirs in the lower mantle, only very limited differences are observed between cases with regular pPv (pPv viscosity identical to that of pv) and weak pPv ( $1000\times$  viscosity reduction in regions containing pPv). Cold slabs can spread more easily and broadly along the CMB in the case with weak pPv, but the stability and size of the dense reservoirs is not substantially altered by weak pPv.

Finally, we investigate the influences of three parameters (the core-mantle boundary temperature, viscosity contrast between pv and pPv, and the Clapeyron slope of phase transition from pv to pPv) on the long term evolution of primordial reservoirs in the lower mantle. We find that the models in which the core is fully covered by weak pPv can not maintain large primordial reservoirs.

In summary, this thesis demonstrates that primordial reservoirs could survive from the whole history of mantle convection and the interaction between the sta-

bility and structure of primordial reservoirs and phase transition from pv to pPv.

---

Der untere Mantel ( $>2400\text{km}$ ) der Erde ist grösstenteils heterogen. Das auffälligste Merkmal sind die beiden grossen Niedriggeschwindigkeitsstrukturen (large low shear velocity provinces, LLSVPs) unter dem afrikanischen Kontinent und dem Pazifik, die beinahe ein Drittel bis zur Hälfte der Kern-Mantel-Grenzregion (core mantle boundary, CMB) bedecken und sich auch Hunderte von Kilometern vertikal ausdehnen. Obwohl eine thermo-chemische Struktur zur Erklärung der seismischen Beobachtungen herangezogen wird, ist die Herkunft der LLSVPs immer noch nicht restlos geklärt. Das Ziel dieser Doktorarbeit wird es deshalb sein, den Modelraum der thermo-chemischen Konvektion zu untersuchen. Diese Konvektion kann grossräumige chemische Heterogenitäten im unteren Mantel aufrechterhalten und liefert uns deshalb ein vertieftes Verständnis, wie die LLSVPs im unteren Mantel über längere Zeitperioden der Erdgeschichte stabilisiert werden können.

Zuerst erweitern wir den Modelraum von der ursprünglichen 3-D kartesischen Geometrie zu einer 3-D sphärischen Geometrie, die mehr der Form der Erde angepasst ist. Unsere Hauptkenntnisse aus den 3-D kartesischen Experimenten besitzen nach einigen kleineren Änderungen noch immer Gültigkeit. Des Weiteren haben wir gefunden, dass bei mittlerem Auftriebsverhältnis und grossem thermischem Viskositätskontrast die chemische Struktur (der ursprünglichen Reservoirs aus dichtem Material in dieser Studie) dominiert wird von der Kugelflächenfunktion vom Grad 2, wie das der Fall ist im Erdmantel. Plumes treten nicht zufällig auf, sondern jeweils an den Rändern der Reservoirs und mit einem kleineren Volumenanteil des anfänglichen Ursprungsmaterials.

Als nächstes erweitern wir unseren Modelraum um die Phasentransformation von Perowskit (pv) nach Post-Perowskit (pPv) und konzentrieren uns auf den Viskositätskontrast zwischen pv und pPv, so dass wir den Einfluss der Phasentransformation auf Stabilität und Struktur der ursprünglichen Reservoirs im unteren Mantel untersuchen können. In einem Model, dessen Parameter in Übereinstimmung mit unserer ersten Arbeit gewählt wurden, in der die ursprünglichen Reservoirs im unteren Mantel erhalten bleiben, konnten wir nur minimale Unterschiede ausfindig machen zwischen einem Fall mit regulärem pPv (wo die Viskosität von pPv identisch gewählt wurde zu der von pv) und schwachem pPv ( $1000\times$  reduzierte Viskosität in Regionen mit pPv). Im Falle von schwachem pPv können sich kalte Slabs einfacher und weiter ausbreiten entlang der CMB, aber die Grösse und Stabilität der dichten Reservoirs wird nicht substantiell verändert durch schwachen pPv.

Schlussendlich untersuchen wir noch den Einfluss dreier weiterer Parameter (der Kern-Mantel-Grenztemperatur, des Viskositätskontrastes zwischen pv und

pPv, sowie der Clapeyron-Steigung des Phasenüberganges von pv nach pPv) auf die Langzeitentwicklung der ursprünglichen Reservoirs im unteren Mantel. Wir konnten beobachten, dass in den Modellen in denen der Kern vollständig bedeckt ist mit schwachem pPv, die grossen ursprünglichen Reservoirs nicht erhalten blieben.

Zusammenfassend demonstriert diese Doktorarbeit, wie die ursprünglichen Reservoirs über die ganze Dauer der Mantelkonvektion überleben können, sowie die Interaktion zwischen Stabilität und Struktur der ursprünglichen Reservoirs und des Phasenüberganges von pv nach pPv.