

DISS. ETH NO. 21149

**The interaction between subduction-related mantle currents
and surface topography**

A dissertation submitted to
ETH Zurich

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

Fabio Crameri
MSc in Earth Sciences, ETH Zurich
born on 17 January 1983
citizen of Poschiavo

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Paul J. Tackley, examiner
Prof. Dr. Taras V. Gerya, co-examiner
Prof. Dr. David R. Stegman, co-examiner

2013

Abstract

The present-day structure of Earth's interior is fairly well known thanks to observations. The dynamic processes involved in forming such a rocky planet like Earth are, however, still not fully understood. This thesis therefore aims at a better understanding of plate tectonics, a crucial dynamical feature within the global framework of mantle convection. Special focus is given to the interaction of subduction-related mantle flow and surface topography. Thereby, the application of a numerical model is essential and its main functional requirements are two-fold: Necessary are on the one hand, an evolution over a long time-scale to naturally model mantle flow and on the other hand, a physically correct topography calculation.

First, a compilation and evaluation of currently applied methods to calculate surface topography numerically is given. The 'sticky-air' method receives special focus because of its ability to approximate a free surface even for models calculated on a fixed (Eulerian) grid. It is found that the weak "air" or "water" layer has to be sufficiently thick and/or sufficiently weak in order to allow a free and undisturbed evolution of surface topography. In contrast to such physical requirements, a thin and highly viscous sticky-air layer is favoured for numerical reasons. An analytical condition is therefore presented that allows a straightforward determination of optimal sticky-air parameters and hence a numerically efficient and physically correct topography calculation.

In a second step, a free surface is applied to an already existing, dynamically self-consistent and time dependent model of mantle convection. This allows us to overcome the standard and widely used free-slip surface and thus avoids the assumption of a flat surface in such models. A direct and dramatic consequence of a freely evolving surface topography is the occurrence of single-sided subduction that was previously inhibited (i.e. double-sided) by a fixed, flat surface. A weak hydrated crustal layer in addition allows for an on-going single-sided subduction by lubricating the plate interface at the collision zone. Dynamically self-consistent single-sided subduction in global models of mantle convection is key for realistically reproducing the dynamics in Earth's interior. It thus allows new insights into the interplay of obliquely sinking plates, toroidal mantle flow and the arcuate shape of slabs and trenches. In addition, three different regimes of plate tectonics are found depending on the amount of plate strength and mantle viscosity increase with depth.

This realistic model of mantle convection is extensively used for characterising the influence of different physical and numerical parameters involved. Numerous two-dimensional experiments give insights into subduction initiation by small-scale convection, on-going subduction and subduction shut-off scenarios. A free surface is thereby shown to promote subduction

initiation and various parameter setups are shown to promote an on-going mobile lid. These parameter setups are (i) an intermediate plate strength, (ii) a weak hydrated crustal layer, (iii) an appropriate viscosity contrast between cold plates and hot mantle, (iv) the presence of a thin, sub-lithospheric low viscosity channel and both (v) a suitable sticky-air viscosity and (vi) initial condition. Interesting dynamical features in experiments of on-going mobile lids are subduction polarity reversals. Finally, subduction can for example shut down due to the resistance of young plates against sinking into the mantle.

In a last step, optimal parameter setups are applied to fully three-dimensional models in Cartesian and spherical geometries. These computational more expensive experiments allow for a more realistic evolution of mantle convection by involving the complete, three-dimensional dynamics. Three-dimensional features observed and characterised in these experiments include (i) the spontaneous development of arcuate trench geometry due to toroidal mantle flow, (ii) a strongly varying behaviour of subduction mode along the trench strike and (iii) spreading ridges that are laterally offset by (iv) normally striking transform faults. An interesting, newly discovered feature is ‘slab tunnelling’, which occurs in the centre of wide subduction zones. Mantle flow locally forces the slab to become more flat and form a tunnel-like opening. This opening allows mantle material from behind the slab to flow to the front, thereby allowing the subduction zone to retreat. Besides implications for Earth, such experiments further allow new insights into the dynamics expected on Venus: Spontaneous subduction initiation occurs in models starting from a stagnant lid, which subsequently evolve by a global overturn event until they, again, end up in a stagnant lid mode.

Overall, this thesis demonstrates the strong interaction between surface topography and mantle currents and highlights the importance of self-consistent, time-dependent modelling and appropriate visualisation in the field of Geodynamics.

Kurzfassung

Die gegenwärtige Struktur des Erdinnern ist dank Beobachtungen recht gut bekannt. Die dynamischen Prozesse, welche an der Entstehung eines Planeten wie der Erde beteiligt sind, sind noch nicht annähernd vollständig verstanden. Ziel der vorliegenden Studie ist deshalb ein besseres Verständnis der Plattentektonik, eines der wesentlichen Bestandteile im System globaler Mantelumwälzung. Besonderes Augenmerk wird auf das Zusammenwirken von subduktionsbedingter Mantelströmung und Oberflächen-Topographie gelegt. Dabei ist die Anwendung eines numerischen Modells unerlässlich und hat zwei Hauptfunktionen: Nötig sind einerseits die Entwicklung über eine lange Zeitskala, um Mantelbewegungen natürlich nachzubilden und andererseits, eine physikalisch korrekte Topographie-Berechnung.

Als erstes wird eine Zusammenstellung und Auswertung aktuell angewandter Methoden zur numerischen Berechnung von Oberflächen-Topographie vorgelegt. Auf die "zähe-Luft"-Methode wird dabei spezielles Augenmerk gerichtet. Dies aufgrund ihrer Fähigkeit, sogar für ein auf einem fixierten (Euler'schen) Gitternetz berechneten Modell, eine freie Oberfläche nachzuahmen. Es wird gezeigt, dass die "Luft" oder "Wasser" Schicht genügend dick und/oder genügend weich sein muss, um der Oberflächen-Topographie eine freie und ungestörte Entwicklung zu ermöglichen. Im Gegensatz zu solch physikalischen Notwendigkeiten wird eine dünne und zähflüssige "zähe-Luft" Schicht aus numerischen Beweggründen bevorzugt. Eine analytische Bedingung wird deshalb vorgelegt, welche eine einfache Bestimmung optimaler "zähe-Luft"-Parametern zulässt und somit eine numerisch effiziente und physikalisch korrekte Topographie-Berechnung.

In einem zweiten Schritt wird eine freie Oberfläche in einem schon existierenden, dynamisch selbstbestimmten und zeitabhängigen Modell der Mantelkonvektion angewandt. Dies ermöglicht uns die übliche und weitaus gebräuchliche frei-gleitende Oberfläche und so auch die Annahme einer flachen Oberfläche in solchen Modellen zu umgehen. Eine direkte und dramatische Auswirkung einer sich frei entwickelnden Oberflächen-Topographie ist das Auftreten einseitiger Subduktion, welche vorher durch eine fixierte und flache Oberfläche verhindert wurde (d.h. sie war doppelseitig). Eine weiche, hydratisierte Krustenschicht erlaubt darüber hinaus ein stabiles, anhaltend einseitiges Sinken der Platten indem sie die Platten-Schnittstelle an der Kollisionszone schmiert. Dynamisch eigenständige einseitige Subduktion in globalen Modellen der Mantelkonvektion ist zentral für eine wahrheitsgetreue Nachbildung der Bewegungen im Erdinnern. Dies ermöglicht deshalb neue Einblicke in das Wechselspiel von schräg abtauchenden Platten, toroidalen Mantelbewegungen und der Bogenform von sinkenden Platten und Subduktionsgräben. Zusätzlich werden drei unterschiedliche Funktionsbereiche der Plattentek-

tonik ausgemacht, abhängig von Plattenstärke und der tiefenbedingten Zähigkeitszunahme des Mantels.

Dieses realistische Modell der Mantelkonvektion wird ausgiebig zur Beschreibung der Auswirkung verschiedenster beteiligter physikalischer und numerischer Parameter verwendet. Zahlreiche zweidimensionale Experimente gewähren Einblick in Initiierung der Subduktion durch kleinskalige Konvektion, in andauernde Subduktion und in Szenarien für das Aussetzen von Subduktion. Eine freie Oberfläche, so wird gezeigt, begünstigt dabei das Einsetzen von Subduktion und verschiedene Parameter-Einstellungen begünstigen eine bewegliche äussere Erdschicht. Solche Parameter-Einstellungen sind (i) eine mittlere Plattenfestigkeit, (ii) eine weiche, hydratisierte Krustenschicht, (iii) ein angemessener Viskositätsunterschied zwischen kalten Platten und heissem Mantel, (iv) das Vorhandensein einer dünnen, sublithosphärischen und niedrigviskosen Schicht und (v) eine angemessene Viskosität der “zähen Luft” sowie (vi) eine zweckdienliche Anfangsbedingung. Interessante dynamische Vorkommnisse in Experimenten mit beweglicher äusserer Erdschicht sind Subduktions-Umpolungen. Letztlich kann eine Subduktion durch den Widerstand junger Platten gegen das Absinken in den Mantel zum Stillstand gebracht werden.

In einem letzten Schritt werden optimale Parametereinstellungen in komplett dreidimensionalen Modellen in kartesischer und kugelförmiger Geometrie verwendet. Diese rechnerisch aufwendigeren Experimente ermöglichen eine noch realistischere Entwicklung der Mantelkonvektion, indem sie die komplette, dreidimensionale Dynamik miteinbeziehen. Dreidimensionale Vorkommnisse, welche in diesen Experimenten beobachtet und gekennzeichnet werden, umfassen (i) die spontane Entwicklung bogenförmiger Subduktions-Graben-Geometrie, (ii) ein stark variierendes Verhalten der Subduktionsart entlang des Graben-Streichens und (iii) divergierende Rücken, welche seitlich versetzt sind durch (iv) senkrecht liegende Transformstörungen. Interessante, neu entdeckte Gebilde sind ‘untertunnelte Slabs’, welche in der Mitte breiter Subduktionszonen auftreten. Mantelbewegungen drängen den Slab zu einem flacheren Absinken und formen eine tunnelartige Öffnung. Diese Öffnung ermöglicht es dem Mantelmaterial von der Rückseite des Slabs auf seine Vorderseite zu fließen und so die Rückwärtsbewegung der Subduktionszone. Abgesehen von einem besseren Verständnis der Erde ermöglichen diese Experimente auch neue Einblicke in das Kräftespiel innerhalb der Venus: Spontane Subduktions-Initiierung tritt in, mit einer stagnierenden äusseren Planetenschicht startenden Modellen ein und entwickelt sich hernach in Form eines globalen Umwälz-Ereignisses weiter bis sie zuletzt wieder in einer stagnierenden Planetenschicht zu Ende gehen.

Insgesamt zeigt diese Studie das starke Zusammenspiel zwischen Oberflächen-Topographie und Mantelströmungen auf und hebt die Bedeutung eigenständig entwickelnder, zeitabhängiger Modellierung und angemessener Visualisierungen im Fachgebiet der Geodynamik hervor.