

MODELLING APPROACHES TO GEODYNAMIC PROCESSES

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ZÜRICH
for the degree of Doctor of Natural Sciences

Presented by
BORIS JOZEF PAUL KAUS
Dipl. Natw. ETH
born 4. December, 1976
from the Netherlands

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J.-P. Burg	ETH Zürich	examiner
Prof. Dr. Y.Y. Podladchikov	PGP, University of Oslo	co-examiner
Prof. Dr. P.J. Tackley	University of California, Los Angeles	co-examiner

Abstract

This thesis addresses problems from a geodynamic perspective. Numerical methods and analytical techniques are used to obtain insight in the mechanics of geodynamic processes.

The interaction between petrology and tectonics, for example, is studied in a model of sedimentary basin subsidence. It is demonstrated that metamorphic phase transitions, which affect rock density, have a first order effect on the basin subsidence. In particular mantle phase transitions reduce the amount of synrift-subsidence, in agreement with observations.

The mechanics of a model that allows for erosion, compressional and density-driven deformation are studied in detail. The concept of mechanical phase diagrams is employed to study the key parameters controlling the dynamics of the system. In the model, up to eight deformation modes exist, as a function of two non-dimensional parameters. Good agreement is demonstrated between analytical and numerical results.

Mechanical phase diagrams are also applied to shear-localization in visco-elasto-plastic materials. Localization is initiated through shear-heating-induced increase of temperature, whereas it may be inhibited by thermal diffusion. Results are derived for 0D, 1D and 2D settings with constant stress and constant velocity boundary conditions. Up to six deformation modes exist as a function of four nondimensional parameters. Scaling laws, derived for the various deformation modes demonstrate that the model may be relevant to natural conditions.

The Rayleigh-Taylor (RT) instability is formed if a fluid of low density underlies a fluid of higher density. The deformation of the fluid interface is investigated analytical and numerically in both two and three dimensions. It is shown that the purely three-dimensional normal modes amplify faster than 2D modes. The superposition of different normal modes may result in relatively complex patterns. The 2D-3D transition is studied for various boundary conditions. The limits of existing linear stability theory are examined and a new finite-amplitude theory is proposed, which yields a better description of finite-amplitude structures growing from thin source layers. Reversibility issues of the RT-instability are discussed for different initial structures.

The tools used throughout this thesis include analytical techniques (thick- and thin-

plate methods), and numerical methods (finite-difference, finite-element and hybrid finite-difference/spectral methods) that have been specifically tailored to the investigated problems. Progress has been made in the incorporation of solid-like (elastoplastic) and fluid-like (viscous) behavior in a single computational framework.

Zusammenfassung

Diese Dissertation befasst sich mit Problemen aus dem Gebiet der Geodynamik. Numerische und analytische Methoden werden angewandt, um Einsicht in die Mechanik verschiedener geodynamischer Prozesse zu bekommen.

Die Interaktion zwischen Petrologie und Tektonik, zum Beispiel mit Hilfe eines Modelles eines Sedimentbeckens studiert. Es wird gezeigt, dass metamorphe Phasenübergänge, die die Dichte eines Gesteines beeinflussen, einen grossen Effekt auf die Subsidenz des Beckens haben. Insbesondere die Phasenübergänge im Erdmantel führen zu einer starken Verringerung der Synriftsubsidenz, was mit Beobachtungen übereinstimmt.

Die Mechanik eines Modelles, welches die Effekte von Erosion, kompressiver Deformation und dichtegetriebener Deformation berücksichtigt, wird detailliert studiert. Das Konzept mechanischer Phasendiagramme wird angewandt, um die wichtigsten Parameter des dynamischen Systems zu charakterisieren. Im Modell existieren acht Deformationsarten, die eine Funktion von zwei dimensionslosen Parametern sind. Eine gute Übereinstimmung zwischen analytischen und numerischen Resultaten wurde festgestellt.

Mechanische Phasendiagramme werden auch für die Scherlokalisierung in viskoelasto-plastischen Materialien berechnet. In diesem Modell wird die Lokalisierung durch Scherung initiiert, die einen Anstieg der Temperatur zur Folge hat. Gleichzeitig kann die Lokalisierung durch den Effekt von thermischer Diffusion verhindert werden. Resultate sind gültig für den 0D, 1D und 2D Fall, für sowohl eine konstante Geschwindigkeit als auch eine konstante Spannung als Randbedingung. Bis zu sechs Deformationsarten existieren als Funktion von vier nichtdimensionalen Parametern. Skalierungsgesetzmässigkeiten, hergeleitet für die verschiedenen Deformationsarten, zeigen, dass das Modell für natürliche Bedingungen relevant ist.

Eine Rayleigh-Taylor (RT) Instabilität tritt auf, wenn eine Flüssigkeit niedriger Dichte unter einer Flüssigkeit höherer Dichte liegt. Die Deformation der Grenzlinie zwischen den beiden Flüssigkeiten wird sowohl analytisch als auch numerisch für zwei und drei Dimensionen untersucht. Es wird gezeigt, dass reine dreidimensionale Perturbationen ("normal modes") schneller wachsen als zweidimensionale Perturbationen. Eine Überlagerung verschiedener Perturbationen resultiert in komplexen dreidimen-

sionalen Strukturen. Der Übergang von 2D zu 3D Strukturen wird für verschiedenste Randbedingungen studiert. Die Grenzen existierender linearer Theorien werden aufgezeigt und eine neue finite-amplituden Theorie wird vorgeschlagen, welche das Verhalten von Strukturen, die aus dünnen Grenzschichten wachsen, besser beschreibt. Die Reversibilität der RT-Instabilität wird für verschiedene Anfangsbedingungen aufgezeigt.

Die Methoden, die in dieser Dissertation benutzt werden, umfassen analytische Methoden (Theorie der dünnen und dicken Platten), und numerische Methoden (Finite-Differenzen-, Finite-Elemente und Spektral-Methoden) die speziell für diese Arbeit entwickelt und angepasst wurden. Fortschritte wurden auch bei der Implementierung von festem (elasto-plastisch) und flüssigem (viskoses) Materialverhalten in ein einziges numerisches Programm erzielt.