

DISS. ETH NO. 14855

FINITE AND INFINITE
HETEROGENEITIES
UNDER PURE AND SIMPLE SHEAR

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

DANIEL WALTER SCHMID

Dipl. Natw. ETH

born 22. December, 1973

citizen of Full-Reuenthal, Aargau

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J.-P. Burg	ETH Zürich	examiner
Dr. Yu. Yu. Podladchikov	ETH Zürich	co-examiner
Prof. Dr. H. Schmeling	Universität Frankfurt a. M.	co-examiner

2002

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Doktorarbeit identifiziert und beantwortet grundlegende Fragen der Strukturgeologie, welche entweder nicht gestellt oder nicht befriedigend gelöst worden waren. Der Themenbereich umfasst eine grosse Bandbreite von Problemen, welche von Einzelpartikelrotation zur Mehrschichtfaltung reicht. Dies sind Themen der klassischen Strukturgeologie, und trotzdem sind Effekte erster Ordnung nicht berücksichtigt worden. Faltung ist ein Beispiel. Die existierenden Theorien nehmen an, dass die faltenden Schichten unendlich lang sind oder die Kompression direkt durch starre Wände als Randbedingung an den Schichtenden angesetzt wird. Beide Annahmen sind selten relevant für die Geologie und wir zeigen, dass das Schichtlänge zu -dicke Verhältnis, zum Beispiel einer Quarzvene, einen entscheidenden Einfluss auf den Faltungsprozess ausübt. Dies resultiert in drei neuen Faltungsmodi welche gewisse Widersprüche der klassischen Theorien erklären. Wir geben eine Erklärung für die beobachteten kleinen Wellenlänge zu Schichtdicke Verhältnisse, welche im Widerspruch zu der grossen Variabilität natürlicher Viskositätskontraste stehen.

Ein weiteres Beispiel für die adressierten grundlegenden Fragen ist das Verhalten von Partikeln in Scherzonen. Diese Partikel zeigen oft eine regelmässige Ausrichtung (SPO), welche mit den klassischen Theorien nicht erklärt werden kann. Häufig sind diese Partikel von einem Mantel umgeben, welcher oft studiert wurde, dessen Funktion jedoch auf die eines passiven Deformationsaufzeichnungsgerät reduziert wurde. Dies steht im klaren Widerspruch zu der beobachteten Lokalisierung der Deformation im Mantelmaterial, welche ein Indikator für die Schmierwirkung des Mantels ist. Durch die explizite Modellierung des Mantels als separates, weiches Material entwickeln wir eine analytische Theorie, welche den Charakter der SPO erklärt. In Kombination mit einer grossen Anzahl numerischer Experimente schaffen wir ein Werkzeug das uns erlaubt die Mantelmaterialproduktivität, den Mantel-Matrix Viskositätskontrast und den totalen Scherbetrag abzuschätzen, basierend auf einfachen geometrischen Parametern, welche entweder im Feld oder anhand von Dünnschliffen bestimmt werden kann.

Intuitiv ist es akzeptiert, dass Kombinationen von reiner und einfacher Scherung zu asymmetrischen Falten führen. Frühere Studien mit analogen Materialien, analytischen

Theorien und numerischen Modellen konnten jedoch den Bezug zwischen einfacher Scherung und Faltenasymmetrie nicht darlegen. Wir zeigen hier unter welchen Bedingungen einfache Scherung tatsächlich asymmetrische Falten verursacht und wie dieser Zusammenhang benutzt werden kann, um ein Werkzeug zu entwickeln, welches dazu dient den Scherbetrag anhand der Faltengeometrie abzuschätzen.

Die letzte Frage welche wir in dieser Arbeit ansprechen bezieht sich auf die Bildung von Knicken in gefalteten Mehrschichtsequenzen. Dieses Phänomen wird normalerweise mit anisotropen und/oder nichtlinearen Rheologien verknüpft. Wir können jedoch zeigen, dass einfache, Newtonische Mehrschichtlagen Knicke ausbilden können, wenn sie unter kombinierter einfacher und reiner Scherung deformiert werden und eine starre Basis vorhanden ist. Konsequenterweise muss die Interpretation von Faltungsmechanismen und -bedingungen diese Resultate berücksichtigen und entsprechend angepasst werden.

Das Hauptwerkzeug, welches in dieser Arbeit angewandt wird, sind die Konzepte der Kontinuumsmechanik. Wir benützen analytische, numerische und kombinierte Techniken, welche auf die spezifischen Probleme abgestimmt sind und die Vorteile der benutzen Methode berücksichtigen. Diese Methoden umfassen die analytischen Formulierungen dünner und dicker Platten, die komplexe Potentialmethode von Muskhelishvili, Finite Differenzen, Finite Elemente und Spektralmethoden.

ABSTRACT

This thesis identifies, and gives solutions to, unanswered first order questions in structural geology concerning a wide range of problems from isolated clast behavior to multilayer folding. These are classical themes of research in structural geology and elsewhere; however, some of the basic problem characteristics have not been adequately accounted for in previous works. Folding is such an example, because the theory of folding assumes infinitely long layers or rigid wall boundary conditions directly applied to the layer extremities. Both assumptions are rarely appropriate for geology, e.g., we show that the aspect ratio of an isolated layer, such as a quartz vein, is a principal controlling factor of the folding process. Our analysis discovers three new folding modes that explain inconsistencies that are intrinsic to the classical theories. In particular, we give an explanation for the natural preference of small wavelength to layer thickness ratios that is in disagreement with the wide range of natural viscosity contrasts.

Another example for the addressed fundamental questions is the behavior of clasts in shear zones. Such clasts often show a shape preferred orientation (SPO) that cannot be explained by classical theories. The mantle that often surrounds these clasts had been the focus of many studies, however, it has been regarded as a passive strain recorder. This is in contradiction to the strain localization that takes place in the mantle, which is an indicator for the lubricant rheology of the mantle material. By the explicit introduction of a weak mantle material we succeed in developing an analytical theory that explains the character of the observed SPO, and in combination with a vast number of numerical experiments we develop a tool for estimating mantle material productivity, mantle-matrix viscosity contrast, and shear strain based on simple geometrical parameters that can be measured in the field.

It is intuitively accepted that combinations of pure and simple shear lead to asymmetric folds. However, previous analogue, analytical, and numerical experiments failed to identify the relationship between fold asymmetry and simple shear. We show under which conditions the simple shear – asymmetry conjecture is justified and outline how it can be used to estimate shear strains from natural folds.

The final question that we address is the formation of kinks in folded multilayer stacks. While this phenomenon is generally attributed to anisotropic and/or non-linear rheologies, we show that simple Newtonian multilayer stacks, subjected to general shear, and close to a no-slip base can exhibit kinking as well, which changes the interpretation of natural multilayer folds.

The key tool used to answer each question posed is the concept of continuum mechanics. We employ analytical, numerical, and combined techniques tailored to the requirements of the specific problems in such a way as to acknowledge the limitations of each method. These methods include thin and thick plate formulations, Muskhelishvili's complex potential method, finite differences, finite elements, and spectral codes.