



Doctoral Thesis

## Processes and properties controlling the formation of lithospheric-scale shear zones

**Author(s):**

Thielmann, Marcel

**Publication Date:**

2013

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010143426> →

**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. 21424

PROCESSES AND PROPERTIES CONTROLLING THE  
FORMATION OF LITHOSPHERIC-SCALE SHEAR ZONES

A dissertation submitted to

ETH ZÜRICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

MARCEL THIELMANN

Dipl. Geophys., University of Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Germany

4 November, 1981

Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Paul J. Tackley    ETH Zürich

Prof. Dr. Boris Kaus        Johannes-Gutenberg-Universität, Mainz

Prof. Dr. Mike Gurnis      CALTECH, Pasadena

## Abstract

In this thesis, the question of how and why lithospheric shear zones are formed is investigated using numerical and analytical methods. This question is of particular importance for plate tectonics, as lithospheric-scale shear zones are a necessary prerequisite for the initiation of subduction. To obtain plate tectonics in global geodynamic models, the strength of the lithosphere is commonly limited by an upper limit, the yield stress. However, this yield stress is extremely low compared to the strength of rocks measured in laboratory experiments. This raises several questions:

1. Which physical weakening processes result in lithospheric-scale shear zones?
2. Which weakening processes sufficiently reduce the strength of the lithosphere to the yield stress employed in global geodynamic models?
3. Are there any additional physical properties that could change the stress state of the lithosphere such that higher yield stresses are feasible?

These three questions are addressed in this thesis by means of numerical models. For 2D cases, the code MILAMIN\_VEP is used, which is a hybrid particle-in-cell-finite-element code. First, a series of benchmark tests is conducted to evaluate the accuracy and convergence properties of the used numerical code. Particular attention is paid to the effect of different interpolation schemes (from particles to quadrature points of the finite elements). A novel interpolation scheme is introduced that significantly improves both properties in the case of smoothly varying material properties.

Two possible weakening mechanisms are investigated: shear heating and grain size reduction. The feedback between lithospheric deformation and shear heating is investigated in a 2D visco-elasto-plastic model of a layered lithosphere under compression. Under certain conditions, shear heating results in the formation of a lithospheric-scale shear zone, thus enabling one plate to descend below the other. In this model, subduction is

thus initiated without prescribing a preexisting zone of weakness. Semi-analytical scaling laws are then developed that successfully predict under which conditions shear heating results in a lithospheric-scale shear zone. We additionally develop a semi-analytical scaling law that predicts under which conditions the post-localization phase is additionally affected by convective instabilities, thus potentially inhibiting the formation of a subduction zone.

The interaction of shear heating with grain growth and grain size reduction is extensively studied using 0D and 1D viscoelastic models with a viscous rheology composed of diffusion creep and dislocation creep. This results in a variety of deformation regimes which are either dominated by diffusion or dislocation creep. Above a critical stress, thermal runaway results in a localized shear zone where grain size is significantly smaller than in the surrounding matrix. Depending on the efficiency of grain growth, a persistent small-grained shear zone is formed which deforms in diffusion creep. This type of shear zones is also observed in the field. Commonly, those structures are interpreted as the localization of deformation due to grain size reduction. The numerical study conducted here implies that grain size is rather a result of localized deformation and not its cause.

Last, the effect of elasticity and of a free surface upper boundary condition on the stress state of a stagnant lid above a convecting mantle is studied. A free surface upper boundary condition allows for topography and bending of the lithosphere. The resulting bending stresses increase the stress in the lithosphere, in particular at shallow depths. Elasticity redistributes those stresses and results in elevated stresses at deeper lithospheric levels. This effect increases with increasing Deborah number. As the thickness of the stagnant lid decreases at higher Rayleigh numbers and the thickness of the high stress layer simultaneously increases (for Earth-like parameters), larger parts of the lithosphere are subject to elevated stresses. This has important implications for subduction initiation and shows that elasticity has a non-negligible effect on the stress state of the lithosphere for Earth-like parameters.

## Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Frage untersucht, wie und warum lithosphärische Scherzonen entstehen. Diese Frage ist für die Plattentektonik von besonderer Bedeutung, da lithosphärische Scherzonen eine notwendige Voraussetzung für Subduktionszonen sind. Die Festigkeit der Lithospäre wird in globalen geodynamischen Modellen normalerweise auf ein Maximum limitiert. Diese maximale Festigkeit ist jedoch viel kleiner als die Festigkeitswerte von Gesteinen, die im Labor gemessen werden. Das wirft einige Fragen auf:

1. Welche Schwächungsmechanismen führen zur Entstehung von lithosphärischen Scherzonen?
2. Welche Schwächungsmechanismen reduzieren die Festigkeit der Lithosphäre so dass ihre Festigkeit mit der vorgeschriebenen maximalen Festigkeit vergleichbar ist?
3. Gibt es zusätzliche physikalische Eigenschaften der Lithosphäre, die bisher vernachlässigt worden sind und die den Spannungszustand der Lithosphäre beeinflussen?

Diese Arbeit befasst sich allen oben genannten Fragen. Hierfür werden numerische Methoden verwendet. In den zweidimensionalen Fällen wird der Code MILAMIN\_VEP benutzt. MILAMIN\_VEP ist ein hybrider Code, bei dem die particle-in-cell Methode mit Finiten Elementen kombiniert wird. In dieser Arbeit wird deshalb als erstes eine Reihe von Benchmark-Tests durchgeführt, um die Genauigkeit und Konvergenz dieser Methode zu verifizieren. Besondere Aufmerksamkeit gilt hierbei dem Effekt der Interpolation von Materialeigenschaften von den Partikeln zu den Integrationspunkten der finiten Elemente. Wir führen ein neues Interpolationsschema ein, das (für den Fall stetig variierender Materialeigenschaften) sowohl Genauigkeit und Konvergenz signifikant verbessert .

Zwei mögliche Schwächungsmechanismen werden in dieser Arbeit untersucht: Schererwärmung und Korngrößenreduktion. Die Rückkopplung zwischen Schererwärmung

und Deformation wird mit Hilfe von zweidimensionalen viskoelastoplastischen Modellen einer homogen geschichteten Lithosphäre in Kompression untersucht. Bei bestimmten Bedingungen führt Schererwärmung zur Bildung einer lithosphärischen Scherzone und ermöglicht damit das Abtauchen einer Platte unter die andere. Subduktion wird deshalb in diesen Modellen ohne eine vorgeschriebene Schwächezone initiiert. Es werden halbanalytische Skalierungsgesetze entwickelt, die erfolgreich vorhersagen unter welchen Bedingungen Schererwärmung zu der Bildung einer Scherzone führt. Ein zusätzliches Skalierungsgesetz prognostiziert unter welchen Bedingungen die Bildung einer Subduktionszone möglicherweise von konvektiven Instabilitäten verhindert wird.

Das Zusammenspiel zwischen Schererwärmung und Korngrößenwachstum bzw. -reduction wird ausführlich mit Hilfe von 0D und 1D Modellen studiert. Diese Modelle sind viskoelastisch, wobei sich die viskose Rheologie aus Dislokations- und Diffusionskriechen zusammensetzt. Die Benutzung solch einer komplexen Rheologie führt zu einer Vielzahl an Deformationsregimen, die entweder von Diffusions- oder Dislokationskriechen dominiert werden. Wird eine kritische Spannung überschritten, kommt es zu thermischem Durchgehen, bei dem die im Material gespeicherte Energie freigesetzt und in Wärme umgewandelt wird. Während dieses Prozesses wird eine dünne Scherzone geformt, in der die Korngröße im Vergleich zur umgebenden Gesteinsmatrix deutlich reduziert ist. Die Bildung einer langlebigen und feinkörnigen Scherzone ist dann von der Effektivität des Korngrößenwachstums abhängig. Aufgrund der kleinen Korngrößen wird die Deformation in dieser Scherzone oft durch Diffusionskriechen dominiert. Solche Scherzonen werden auch im Feld gefunden. Man interpretiert sie normalerweise als Scherzonen, die durch Korngrößenreduktion gebildet werden. Die hier vorgestellte numerische Studie legt nahe, dass das nicht der Fall sein muss, sondern dass im Fall einer einfachen Scherung die Korngröße eher eine Folge lokalisierter Deformation, aber nicht deren Grund ist.

Als letztes wird in dieser Arbeit die Auswirkung von Elastizität und einer freien Oberfläche auf den Spannungszustand in einer stagnierenden tektonischen Platte („stagnant lid“) untersucht. Eine freie Oberfläche erlaubt vertikale Bewegungen der Oberfläche, was wiederum zur Entwicklung von Topographie und Biegungen führt. Die resultieren-

den Biegespannungen erhöhen die Spannungen vor allem in den oberflächennahen Schichten der Lithosphäre. Wird zusätzlich Elastizität berücksichtigt, werden diese Spannungen umverteilt, was wiederum zu erhöhten Spannungen in grösseren Tiefen führt. Mit zunehmender Deborahzahl wird dieser Effekt wichtiger. Da die Dicke der stagnierenden Platte mit steigender Rayleighzahl ab- und die Dicke der spannungsführenden gleichzeitig Schicht zunimmt, werden zunehmend grössere Regionen der Lithosphäre hohen Spannungen ausgesetzt. Dies wiederum hat bedeutende Auswirkungen auf die Entstehung von Subduktionszonen und zeigt, dass der Effekt von Elastizität auf den Spannungszustand der Lithosphäre nicht vernachlässigbar ist.