

The behavior of 3-Dimensional fluid-controlled earthquake model applications and implications

Doctoral Thesis

Author(s):

Miller, Stephen A.

Publication date:

1997

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001892079>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH Nr. 12275

**THE BEHAVIOR OF A 3-DIMENSIONAL FLUID-CONTROLLED
EARTHQUAKE MODEL:
APPLICATIONS AND IMPLICATIONS**

A Dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

Presented by

Stephen A. Miller

M.Sc. Geophysics, Stanford University, USA

Born January 12, 1960, USA

Accepted on the recommendation of:

Prof. J.P. Burg , ETH Zürich

Dr. David L. Olgaard, ETH Zürich

Dr. Ian Main, U. of Edinburgh, UK

Examiner

Co-examiner

Co-examiner

1997

Abstract

Numerous and varied lines of evidence point to fluids as an important, or even controlling, factor in the mechanics of earthquakes. Other lines of evidence show that earthquakes are scale invariant, self-organizing critical systems. An attempt at reconciling these principle observations was made with the development of a 3-dimensional, fluid-controlled earthquake model that couples the mechanical effects of fluids with elastic dislocation theory for faulting. Fluid flow within a fault zone is modeled as a simple cellular automaton model based on the assumption that permeability can be treated as a toggle switch. That is, permeability is zero when plate motion accumulates shear stress along the fault plane, and permeability is infinite to nearest neighbors when a dilatant slip event occurs. High pore pressures develop through either a compaction mechanism or a direct fluid source such as dehydration reactions. The dynamical system between shear stress and the state of the fluid pressure shows the evolution to a complex stress state that results in scale-invariant and self-organizing behavior.

The model shows a spontaneous evolution and destruction of asperities (locked regions), and that the long-term model behavior is determined by the state of fluid pressure. If mechanisms to increase pore pressure are slow relative to dilatant slip, the fault evolves to a normally pressured, strong fault. If pore pressure increase mechanisms are sufficient to outrun dilatant slip, the result is an overpressured, weak fault. Model comparisons show good correlation with observed seismic scaling relations and stress drops, and the 3-dimensional strain field shows features observed around active faults. The surface displacement field in the neighborhood of a vertical strike slip fault are shown to respond to the slip state at depth, and initial results show the development of a fractal topography, indicated by a power law power spectra with a slope of -2.

A model application to a section of the San Andreas fault in central California showed that the model could explain how adjacent thrusting events affect a strike-slip fault through a fluid-mediated mechanism. It is proposed that an $M > 6$ earthquake expected for this sec-

tion of the fault around Parkfield, CA, was delayed because of the effect of reducing a compaction-induced pore pressure increase mechanism. Reducing the rate of pore pressure increase within the fault acts to increase the fault strength and allow a greater accumulation of seismic moment before failure.

In an auxiliary study, a model for dehydration reactions was developed to help explain experimental observations of dehydration that showed the reaction is dominated by access to the free, drained boundary. The model couples the state of the fluid pressure with devolatilization kinetics, and shows that this feedback mechanism could contribute to the channeling of metamorphic fluids. Preliminary experimental results showed that access to the free drained boundary controls the dehydration reaction in serpentine, and some evidence for reaction-induced microcracking was observed. It is proposed that internal cracking can positively feed back on the kinetics, thus contributing to the evolving permeability network.

The ideas pursued in this thesis rely on incorporating the dominant effects of fluid while ignoring more subtle effects such as diffusion. This gross approximation has been shown to produce complex and interesting results, but it must still be proven whether this assumption is reasonable. Substantial evidence suggests that it is a reasonable assumption, but this hypothesis for treating crustal fluid flow must be tested.

Zusammenfassung

Es gibt viele, ganz unterschiedliche Hinweise dafür, daß Fluide eine wichtige, wenn nicht entscheidende Rolle in der Mechanik von Erdbeben spielen. Andere Untersuchungen zeigen, daß Erdbeben Maßstabs-unabhängige, selbstorganisierende, kritische Systeme sind. Es wurde der Versuch unternommen, diese prinzipiellen Beobachtungen mit der Entwicklung eines 3-dimensionalen, fluid - kontrollierten Erdbebenmodells in Einklang zu bringen, das die mechanischen Effekte von Flüssigkeiten mit der elastischen Dislokationstheorie für Deformierung ("Faulting") verbindet. Fluid - Bewegungen innerhalb einer Störungszone wurde mit einem einfachen "cellular automaton model" simuliert, das auf der Annahme beruht, daß Permeabilität als "Kippschalter" gesehen werden kann. Das bedeutet, daß Permeabilität Null ist, wenn die Plattenbewegung Scherkräfte entlang der Störungszone akkumuliert. Permeabilität gegenüber dem nächsten Nachbar ist hingegen unendlich, wenn eine erweiternde Abschiebung der Platte auftritt. Hohe Porendrucke entstehen entweder durch Kompressionsmechanismen oder eine direkte Flüssigkeitsquelle wie zum Beispiel Dehydratationsreaktionen. Das dynamische System zwischen Scherkräften und dem Ausmaß des Fluiddruckes zeigt die Entwicklung hin zu einen Zustand von komplexem Streß, der schlußendlich ein Maßstabs - unabhängiges, selbstorganisierendes Verhalten zeigt.

Das Modell zeigt die spontane Entwicklung und Zerstörung von "Asperities" (locked regions). Es macht weiterhin deutlich, daß das Langzeitverhalten des Modells vom Ausmaß des Fluiddruckes bestimmt wird. Wenn die Erhöhung des Porendruckes im Vergleich zur erweiternden Abschiebung langsam entsteht, entwickelt sich die Störung zu einer starken Störung mit normalen Druckverhältnissen. Wenn aber der Anstieg des Porendruck schneller

ist als die erweiternde Abschiebung, resultiert eine schwache Störung mit Überdruck. Die mit dem Modell errechneten Daten korrelieren gut mit bei seismischen Messungen erhobenen Bezugsskalierungen und Streßabfällen. Das dreidimensionale Streßfeld zeigt Eigenschaften, die in der Nachbarschaft einer aktiven Störung beobachtet wurden. Es kann gezeigt werden, daß der Oberflächenversatz in der Nachbarschaft einer vertikalen Schrägabschiebung auf den Zustand der Abschiebung in der Tiefe reagiert. Erste Resultate zeigen, die Entwicklung einer fraktalen Topographie mit einer fraktalen Dimension von 2.5.

Die Anwendung des Modells auf einen Abschnitt des San Andreas Grabens in Zentral-Californien, USA, zeigt, daß das Modell erklären könnte, wie angrenzende Überschiebungsereignisse eine Schrägabschiebung durch fluid-vermittelte Mechanismen beeinträchtigen kann. In dieser Arbeit wird postuliert, daß ein Erdbeben mit einer Magnitude > 6 , das für diesen Abschnitt des San Andreas Grabens in der Nähe von Parkfield, CA, erwartet wurde, verzögert wurde durch die Reduktion eines Kompressions - induzierten Anstieg des Porendruckes. Dadurch, daß der Anstieg des Porendruckes in der Störung verlangsamt wurde, wurde die Störung gestärkt und eine weitere Akkumulation von Seismischen Kräften ist möglich bevor es zum nächsten Bruchereignis kommt.

In einer Zusatzstudie wurde ein Modell für Dehydratation entwickelt. Es soll dazu dienen experimentelle Beobachtungen zu erklären, die zeigen, daß diese Reaktion vom Zugang zu einer freien, drainierten Grenzfläche dominiert wird. Das Modell verbindet den Zustand des Fluiddruckes mit der Dehydratationskinetik und zeigt daß dieser Feed-back-Mechanismus zur Kanalisierung metamorpher Fluide beitragen könnte. Erste experimentelle Ergebnisse zeigten, daß der Zugang zu einer frei-drainierten Grenzfläche die Dehydratationsreaktion in Serpentin kontrolliert. Zusätzlich wurden Hinweise auf reaktionsinduzierte Mikrorisse beobachtet. In dieser Arbeit wird postuliert, daß innere Risse ein positives Feed-back auf die Kinetik haben können und dennoch zum entstehenden Permeabilitäts - Netzwerk beitragen können.

Die Ideen, die in dieser Arbeit verfolgt werden, basieren auf den dominanten Effekten von Fluiden, während mehr subtile Effekte wie Diffusion vernachlässigt werden. Es wurde gezeigt, daß diese grobe Annäherung komplexe und interessante Resultate produziert. Obgleich es substantielle Hinweise dafür gibt, daß diese Annäherung berechtigt ist, muß diese Hypothese sicher noch weiter untersucht werden.