

Diss. ETH No. 17048

**NUMERICAL EXPLORATIONS ON  
STRESS HETEROGENEITY:  
DYNAMIC EARTHQUAKE RUPTURE AND  
NEAR-FAULT GROUND MOTION**

A dissertation submitted to  
**ETH ZURICH**

for the degree of  
**DOCTOR OF SCIENCES**

presented by  
**JOHANNES RIPPERGER**

Diplom-Geophysiker Univ.,  
Ludwig-Maximilians-Universität München

born August 24, 1974

citizen of Germany

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Domenico Giardini, examiner  
Dr. P. Martin Mai, co-examiner  
Dr. Jean-Paul Ampuero, co-examiner  
Prof. Dr. Raul Madariaga, co-examiner

2007

# Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist es, die seismische Gefahrenanalyse in nächster Umgebung von Erdbeben-Bruchzonen zu verbessern. Dort sind die Erschütterungen an der Erdoberfläche am stärksten beeinflusst durch den Bruchprozess des Erdbebens, der sog. "Quelle". Aufgrund unzureichender Datendichte und der Vielzahl an Faktoren, die zur Komplexität des Bruchvorgangs beitragen können, ist kein umfassendes Verständnis der Variabilität der Bodenbewegung in der quellnahen Region vorhanden. Zur Verbesserung dieses Verständnisses können numerische Modellierungen des Bruchprozesses einen wichtigen Beitrag liefern.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt dabei auf der Auswirkung von heterogenen Scherspannungs-Verteilungen auf der Bruchfläche auf den Bruchprozess und die davon angeregte Bodenbewegung. Zu diesem Zweck führen wir numerische Simulationen der dynamischen Bruchausbreitung durch, in denen die Scherspannung durch ein zufallverteiltes Feld mit definierten statistischen Eigenschaften beschrieben ist. Eine wichtige Beobachtung in diesen Simulationen ist die Existenz eines Schwellenwerts im gemittelten Spannungszustand. Oberhalb dieses Schwellenwerts erfolgt ein scharfer Übergang von kleinen Beben, bei denen der Bruchprozess früh durch die Zonen niedriger Scherspannung gestoppt wird, hin zu systemweiten Beben, die nur noch durch die Ausdehnung der vorgegebenen Bruchfläche begrenzt sind. Wir beobachten dass der Mittelwert der Scherspannung, und damit die Lage ober- oder unterhalb des Schwellenwerts, hauptsächlich durch die Amplitude der räumlichen Spannungsverteilung beeinflusst wird. Während die kleineren Beben im Vergleich zu echten Daten niedrigere Bruchausbreitungsgeschwindigkeiten und seismische Abstrahlung zeigen, sind die makroskopischen Quellparameter der grossen Beben durchweg im Einklang mit Skalierungsbeziehungen beobachteter Daten.

Die beobachtbare Bodenbewegungen die durch die simulierten Bruchvorgänge hervorgerufen werden und insbesondere ihre Variabilität wird im letzten Abschnitt dieser Arbeit untersucht. Die maximalen Bodenbewegungen stimmen im langperiodischen Bereich gut mit empirischen Abminderungskurven überein und zeigen bei kurzen Perioden Abweichungen zu kleineren Werten. Die Variabilität der maximalen Bodenbewegung liegt in derselben Grössenordnung wie die der empirischen Daten. Dies deutet darauf hin, dass Unterschiede im Bruchprozess einen beträchtlichen Anteil der gesamten beobachteten Vari-

abilität ausmachen.

Der Inhalt der vorliegenden Arbeit behandelt die numerisch effiziente Berechnung von Spannungsänderungen, die Entstehung, Ausbreitung und Arretierung von Brüchen in heterogenen Spannungsfeldern und die resultierenden quellnahen Bodenbewegungen. Diese Dissertation stellt somit eine umfassende Studie der quellnahen Effekte dar, welche mittels der gewonnenen Erkenntnisse und der zur Verfügung gestellten Hilfsmittel potentiell in die seismische Gefahrenanalyse einfließen können.

# Abstract

This thesis aims at improving seismic hazard assessment close to earthquake faults. In this near-fault region the influence of the earthquake source on the observable ground shaking at the surface is largest. Due to the scarcity of observational data and the number of factors potentially contributing to the complexity of the source process, the variability of ground motion in the near-source region is not fully understood. Numerical modeling can help to improve this understanding.

The main emphasis of this work is placed on the effects of heterogeneous distributions of initial shear stress on the rupture process and the excited ground motions. To this end we perform numerical simulations of the dynamic rupture propagation, with initial shear stress described as a spatial random field with given statistical properties. An important observation in our simulations is the existence of a threshold value in the average stress level. At the threshold a sharp transition occurs between small events that are stopped early by the regions of low initial stress to system-wide events that are limited only by the imposed fault boundaries. We find that the average stress level, and thus the position above or below the transition, are mainly controlled by the amplitude of the stress heterogeneity. While the small events show reduced rupture velocities and seismic radiation compared to real data, the macroscopic source properties of the large events are found to be consistent with scaling relations of observed data.

The ground motions excited by the simulated dynamic ruptures and in particular their variability is investigated in the final part of the thesis. A comparison of peak ground motions to empirical attenuation relations shows a good match at long periods and an underestimation at short periods. The variability in our peak ground motion estimates is found to be on the same order as the variability in empirical data, therefore suggesting a strong contribution of source-effects to the empirically observed variability.

The contents of this work address numerically efficient stress-change calculations, investigations on rupture nucleation, propagation and arrest in a heterogeneous stress field and the resulting excitation of near-source ground motion. The thesis therefore presents a comprehensive study related to near-source effects which potentially can be folded into seismic hazard assessment by providing new understanding and effective numerical tools for the construction of future earthquake scenarios.