



Doctoral Thesis

Advancing Real-Time Seismic Risk Mitigation: Probabilistic Earthquake Early Warning and Physics Based Earthquake Triggering Models

Author(s):

Meier, Men-Andrin

Publication Date:

2015

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010608242> →

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. 22809

Advancing Real-Time Seismic Risk Mitigation:
Probabilistic Earthquake Early Warning and Physics Based
Earthquake Triggering Models

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH Zurich
(Dr. sc. ETH Zurich)

by
MEN-ANDRIN MEIER
MSc Earth Sciences, ETH Zurich

Born on January 29 1984
Kleinandelfingen, Zurich

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Stefan Wiemer	ETH Zurich
Prof. Dr. Thomas Heaton	California Institute of Technology
Prof. Dr. Richard Allen	University of California Berkeley
Dr. Maximilian J. Werner	University of Bristol
Dr. John F. Clinton	ETH Zurich

2015

Abstract

With increasing population densities in urban centers, and with ever more valuable infrastructure at stake, seismic risk is steadily increasing in many places around the world. Although earthquakes can neither be predicted, nor prevented, modern seismology offers a selection of tools for seismic risk mitigation, all of which have their limitations, but which can help reducing the vulnerability to earthquake hazards. Since the digital revolution enabled real-time communication of raw ground motion observations as well as rapid data analysis schemes, near real-time risk reduction strategies have emerged. In this thesis we aim to advance two seismological tools for risk reduction: Earthquake Early Warning (EEW) schemes that can potentially provide warnings of imminent ground motion seconds to tens of seconds before the ground motion onset, and earthquake triggering models that may provide the basis for enhanced seismicity forecasts and which, potentially, can be computed in near real-time. In the first part of this thesis we build upon existing EEW systems and identify three main challenges for the next generation systems. We study an extensive composite ground motion data set and analyze the time-, frequency-, distance- and magnitude-dependencies of seismic ground motions, as well as possible correlations between waveform features of early P-waves and final event magnitudes. We find no evidence for waveform features that are diagnostic of final event sizes in a predictive sense. These observations imply that EEW magnitude estimates can only characterize the part of a rupture that has already occurred, rather than predict the future development of ongoing ruptures. Owing to the relatively short duration of most earthquakes, compared to the duration over which damaging ground motions occur, EEW systems can still provide useful alerts, but the strategy with which ground motion prediction probabilities are computed must be adapted to this limitation. We develop a probabilistic evolutionary real-time magnitude estimation algorithm, the Gutenberg Algorithm, which takes this limitation into account and which estimates earthquake magnitudes based on the frequency content of seismic waveforms. Depending on the time-span of available input data the algorithm accounts for the probability that a rupture may grow beyond its current size. Furthermore, it optimizes the earliest EEW alerts, which in many situations may be the only ones that become available before strong ground motion sets in. In the second part of the thesis we study earthquake triggering models that are based on coseismic secondary static stress changes. We analyze two earthquake sequences and use catalog data to search for evidence that secondary coseismic static stress changes are a

first order mechanism that drives earthquake triggering. We do find evidence that the posited triggering mechanism may indeed be at work, but fail to establish the significance of these results. This may be the case either because indeed other mechanisms are more important than secondary static stress triggering, or because we are not able to model the stress changes with sufficient accuracy and precision. For more conclusive interpretations higher quality catalog data would be a prerequisite. In a real-time damage mitigation context, the use of such triggering models may be limited i) by the limited availability of source data of sufficient quality and ii) because simpler models, such as ETAS or STEP seismicity models may provide similar or even higher probability gains. We conclude that, within their relatively narrow limits, real-time risk mitigation tools can be crucial for reducing the vulnerability to earthquake hazards, but that they can only complement, not replace, the more important long-term risk reduction strategies, such as the implementation of and adherence to quality building standards and public education on earthquake risk.

Zusammenfassung

Durch immer höhere Bevölkerungsdichten in städtischen Zentren und weil immer mehr wertvolle Infrastruktur auf dem Spiel steht, ist das seismische Risiko vielerorts im Steigen begriffen. Obwohl Erdbeben weder vorhergesagt noch verhindert werden können, kann die moderne Seismologie mit einigen Mitteln aufwarten, die zwar klare Grenzen haben, die aber dennoch erlauben, unsere Verletzbarkeit gegenüber dem seismischen Risiko zu verringern. Durch die digitale Revolution ist es heute möglich, Bodenbewegungsdaten in Echtzeit zu übermitteln und Daten schnell zu analysieren, sodass fast-Echtzeit Risikominderungsmaßnahmen machbar geworden sind. In dieser Dissertation versuchen wir zwei spezifische solcher Mittel weiterzuentwickeln: Erdbeben-Frühwarnsysteme die das Potential haben, Sekunden bis Duzende Sekunden vor der eintreffenden Bodenbewegung zu warnen, und Erdbebenauslöse-Modelle welche die Basis für verbesserte Erdbebenvorhersage-Modelle bilden können, und die ebenfalls in fast-Echtzeit berechnet werden können. Im ersten Teil der Dissertation identifizieren wir drei Hauptherausforderungen für erfolgreiche Erdbeben-Frühwarnsysteme. Wir analysieren einen umfassenden, zusammengesetzten Bodenbewegungs-Datensatz und studieren die Zeit-, Frequenz-, Distanz- und Magnitudenabhängigkeiten der seismischen Bodenbewegungen, sowie etwaige Korrelationen zwischen Charakteristika von frühen P-Wellenformen und den schlussendlichen Ereignismagnituden. Wir finden keine Hinweise für Wellenform-Charakteristika die im Sinne einer Vorhersage diagnostisch sind. Unsere Beobachtungen implizieren, dass die Magnitudenabschätzungen von Erdbeben-Frühwarnsystemen nur jenen Teil eines Erdbeben-Bruches charakterisieren können, der bereits stattgefunden hat, und nicht die zukünftige Entwicklung von anhaltenden Brüchen voraussagen können. Da die Bruchdauer der meisten Beben jedoch kurz ist, im Vergleich zur Zeit über welche die Bodenbewegung stattfindet, können Erdbebenfrühwarnsysteme dennoch nützliche Warnungen versenden. Die Strategie mit welcher Bodenbewegungsvorhersagen berechnet werden muss indes an diese Einschränkung angepasst werden. Wir entwickeln einen probabilistischen und evolutionären Echtzeit Algorithmus, den Gutenberg Algorithmus, der diese Einschränkung miteinbezieht, und der Erdbebenmagnituden mittels des Frequenzgehaltes von seismischen Wellenformen abschätzt. Abhängig von der Menge der verwendeten Input-Daten schliesst der Algorithmus die Möglichkeit mit ein, dass der Bruch über seine gegenwärtige Grösse hinaus wächst. Zudem optimiert er die ersten Warnabschätzungen der Frühwarnsysteme, welche in vielen Situationen die einzigen Warnungen sein dürften, die rechtzeitig verfügbar werden. Im zweiten Teil der Dissertation analysieren wir Erdbebenauslöse-Modelle welche auf koseismischen sekundären statischen Spannungsänderungen basieren. Wir studieren zwei Erdbebensequenzen und verwenden Katalogdaten um nach Hinweisen

zu suchen, dass solche Spannungsveränderungen ein Hauptmechanismus der Erdbebenauslösung sind. Wir finden Hinweise darauf dass der postulierte Auslösemechanismus tatsächlich eine Rolle spielen könnte, können die Signifikanz der entsprechenden Resultate aber nicht bestätigen. Ein Grund dafür könnte sein, dass andere Mechanismen für die Erdbebenauslösung wichtiger sind, oder dass wir die Spannungsänderungen nicht mit genügender Richtigkeit und Präzision modellieren können. Im Kontext der Echtzeit Schadensbegrenzung ist der Gebrauch solcher Auslöse-Modelle möglicherweise limitiert durch i) die limitierte Verfügbarkeit der Quelldaten von genügender Qualität und ii) weil einfachere Modelle, z.B. die ETAS und STEP Seismizitätsmodelle ähnliche oder sogar höhere Wahrscheinlichkeitsgewinne ermöglichen können. Wir kommen zum Schluss dass die Echtzeit Risikominderungsmassnahmen entscheidend sein können, um die Verletzbarkeit gegenüber der Erdbebengefahr zu verringern. Die Massnahmen haben allerdings relativ enge Beschränkungen. Daher können sie die wichtigeren langfristig orientierten Risikominderungsmassnahmen, wie zum Beispiel hohe Gebäudebaustandards und öffentliche Ausbildung bezüglich der seismischen Gefährdung nur ergänzen, und nicht etwa ersetzen.