



Doctoral Thesis

Evaluating the compatibility of ground motions resulting from physics-based rupture models with empirical GMPE and an attempt to develop a physics-based synthetic GMPE

Author(s):

Baumann, Cyrill

Publication Date:

2013

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010105912> →

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. 21348

**Evaluating the compatibility of ground motions
resulting from physics-based rupture models with
empirical GMPE and an attempt to develop a
physics-based synthetic GMPE**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
CYRILL BAUMANN

MSc Earthsciences, major Geophysics,
ETH Zurich
born October 18, 1978
citizen of Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Domenico Giardini, examiner

Dr. Luis A. Dalguer, co-examiner

Prof. Dr. Sinan Akkar, co-examiner

Dr. Carlo Cauzzi, co-examiner

2013

Zusammenfassung

Die Starke Bevölkerungszunahme sowie die Entwicklung von grossen Ballungsräumen in seismisch aktiven Regionen haben das seismische Risiko weltweit erhöht. Erdbeben stellen daher eine der grössten Bedrohungen der modernen Gesellschaft dar. Um das Risiko zu minimieren, ist ein angemessene Gefährdungsbeurteilung durchzuführen. Eine gründliche Gefährdungsanalyse zusammen mit einer erdbebensicheren Bauweise und dem Vorbereiten der Bevölkerung auf den Ernstfall, sind von eminenter Bedeutung im Hinblick auf das Reduzieren des Erdbebenrisikos.

Die Identifikation und Charakterisierung aller möglicher Erdbebenquellen, die in einem definierten Gebiet signifikante Erschütterungen generieren können, stellt den ersten Schritt in einer Erdbebengefährdungsanalyse dar. In Kapitel 1 (*Publikation in Druck für das Swiss Journal of Geosciences*) stellen wir eine einfach anwendbare und kostengünstige Methode vor, mit welcher man mittels Messungen des seismischen Hintergrundrauschens Verwerfungen detektieren kann. Wir haben dieses Verfahren auf eine Zweigverwerfung der Simplon Linie, welche keine Oberflächenspuren aufweist, in der Region zwischen Visp und Unterstalden (Schweiz) angewendet.

- Unsere Untersuchung zeigte eine klare Signatur im seismischen Spektrum des Hintergrundrauschens, die der Zweigverwerfung der Simplon Linie entsprechen könnte.
- Geologische, geomorphologische und historische Indikationen stützen dabei unsere Hypothese, die besagt, dass die gefundene seismische Anomalie zu einer neo-tektonischen Verwerfung gehören könnte, die für das Visp Erdbeben von 1855 verantwortlich ist.

Verwerfungen verursachen Erdbebenererschütterungen, welche für die Schäden sowie für das Einstürzen von Gebäuden im Epizentralgebiet, aber auch in

grösseren Entfernungen, zum Beispiel aufgrund von Bodenamplifikationen, verantwortlich sind. Die Gefährdungsanalyse stellt dabei einen Versuch dar, die Bodenerschütterungen in einer spezifischen Region abzuschätzen und mittels maximaler Bodengeschwindigkeit, maximaler Bodenbeschleunigung oder z.B. spektraler Beschleunigung zu quantifizieren. Gleichungen, welche die Bodenbewegungen vorhersagen, bilden die Basis für die Abschätzung der Bodenbewegungen im Zusammenhang mit einer Gefährdungsanalyse und deshalb für eine Makro- und Mikrozonierung.

Solche Gleichungen, welche die Bodenbewegungen vorhersagen, werden üblicherweise mittels Regressionsanalyse, die man auf einen empirischen Datensatz von Bodenbewegungen anwendet, hergeleitet. Allerdings weisen diese empirischen Datensätze Lücken auf, v.a. im Nahbereich des Erdbebenherds ($< 10\text{km}$), wo die grössten Erdbebenschäden zu erwarten sind. Die lückenhafte Datenerfassung im Nahbereich ist vor allem auf das Fehlen einer ausreichenden Zahl von Erdbebenstationen und/oder auf das seltene Inerscheintreten von Erdbeben zurückzuführen. Um diese Daten-Lücke zu füllen, bieten sich Physik-basierende dynamische Erdbebenmodelle an. Diese Modelle scheinen dafür besonders geeignet zu sein, weil damit die physikalischen Prozesse unter Einhaltung der Erhaltungssätze der Kontinuumsmechanik, der Berücksichtigung des konstitutiven Verhaltens der Gesteine unter Gleitreibung sowie unter Berücksichtigung der angewandten Spannung betrachtet werden können. Diese Art von Modellen birgt das Potential in sich, Erdbebenherd-dominierte Bodenbewegungs-Phänomene zu identifizieren und unser Verständnis darüber zu erweitern. Der Nachteil von Physik-basierenden Erdbebenmodellen ist, dass sie nur für lange Perioden zuverlässige Resultate liefern.

In Kapitel 2 (*Publikation in Druck für das Bulletin of the Seismological Society of America*) schlagen wir deshalb vor, dass synthetische Bodenbewegungsdaten, bevor man sie zur Ergänzung von empirischen Datensätzen verwendet, zuerst im Bezug auf ihre Vergleichbarkeit mit empirischen Daten verifiziert werden müssen und eine obere Frequenzlimite angegeben wird, bis zu der die synthetischen Daten mit den empirischen Daten vergleichbar sind. Als ein Beispiel dieser Verifikation evaluieren wir einen Bodenbewegungsdatensatz, resultierend aus Physik-basierenden Erdbebenmodellen. Wir zeigen

- quantitativ, dass die obere Frequenzlimite unseres exemplarischen Datensatzes bei 1 Hz liegt. Bis zu diesem Wert sind die synthetischen Daten mit den empirischen vergleichbar.

- dass im Nahbereich des Erdbebenherdes ($< 10km$), die synthetischen Daten eine Übersättigung aufweisen, ganz im Gegensatz zum Sättigungsverhalten der empirischen Bodenbewegungsgleichungen.
- dass der Effekt der Herdparameter "stress drop", "peak slip velocity", "rupture velocity" sowie der Effekt von blinden/aufgeschlossenen Verwerfungen und die Unterscheidung zwischen Hängendem und Liegendem bei Auf- und Abschiebungen einen signifikanten Einfluss auf die Bodenbewegung haben und massgeblich zur Bodenbewegungs-Variabilität im Herdbereich beitragen.

In Kapitel 3 (*in Vorbereitung*) präsentieren wir zwei alternative Parameterisierungen der synthetischen Bodenbewegungs Daten. In einer ersten Phase identifizierten wir die relevanten Variablen, welche in einer synthetischen Bodenbewegungs Gleichung berücksichtigt werden müssen, indem wir die Variation der synthetischen Daten (maximale Bodengeschwindigkeit sowie spektrale Bodendislokation) als Funktion der potentiellen Variablen, welche mit der Erdbebenquelle sowie mit der Propagierung durch das Medium in Verbindung stehen, analysieren. Des weiteren haben wir überprüft, ob die Ansätze, welche man im Zusammenhang mit empirischen Bodenbewegungs Gleichungen anwendet, auch auf unseren synthetischen Datensatz anwendbar sind.

- Wir stellten fest, dass die synthetischen Bodenbewegungen primär eine Funktion der Entfernung, Moment Magnitude, des Verwerfungs Mechanismus sowie der Situierung bezüglich dem Hängenden ist.
- Des weiteren haben wir die Richtungsabhängigkeit der Amplitude der synthetischen Bodenbewegungs Daten nachgewiesen. Wir schlagen deshalb vor, diesen Effekt entsprechend der Modifikationen von [Bayless and Somerville, 2013] in der synthetischen GMPE zu berücksichtigen.

Auf der Basis unserer Untersuchungen präsentieren wir eine synthetische Bodenbewegungs Gleichung, welche auf synthetischen Daten beruht. Wir zeigen, dass diese synthetische Gleichung die wichtigsten Eigenschaften einer empirischen Bodenbewegungs Gleichung erfasst.

Abstract

Fast population growth and development of large urban areas in seismically active regions have increased the seismic risk worldwide. Therefore, earthquakes represent one of the most dangerous threats to the modern society. In order to minimize the risk, an accurate seismic hazard assessment (SHA) is necessary. Together with seismically safe design, proper construction methods and preparedness of people, a SHA is of fundamental importance to mitigate the seismic risk.

Identification and characterization of all earthquake sources that may cause significant ground motion in a specified area represents the first step in seismic hazard assessment. In Chapter 1 (*accepted for publication in the Swiss Journal of Geosciences*) we propose an economic and practical method to detect fault zones based on ambient vibration observations. We applied this method in the region between Visp and Unterstalden (Switzerland) on a secondary fault branch, that has no surface expression, and which is linked to the Simplon Line.

- Our investigations showed a clear seismic signature in the power spectra of the seismic noise, which could correspond to the damage zone of the Simplon fault branch.
- Geological, geomorphological and historical indications support our hypothesis, which states that the seismic anomaly could correspond to a neo-tectonic fault that ruptured during the 1855 Visp earthquake.

Faults generate earthquake shaking, which is responsible for the damages to structures and ground failures within the epicentral region and potentially at far distances due to site amplification effects. Seismic hazard analysis represents an attempt to estimate these ground motions in terms of PGV (Peak Ground Velocity), PGA (Peak Ground Acceleration) or spectral ordinates (e.g.

Spectral Acceleration) for a specified region. Ground Motion Prediction Equations (GMPEs) provide the basis for the estimation of ground motions in the context of the seismic hazard analysis and therefore for macro and micro zonation.

GMPEs are derived through regression analysis on selected sets of instrumentally recorded strong motion data. However, at very near-source ($< 10km$), where largest earthquake damages are expected, recorded data are sparse due to the lack of seismic stations and/or due to the rare occurrence of earthquakes. To fill this data gap, physics-based dynamic rupture models appear to be an appropriate approach to produce near-source synthetic ground motions, since these models are capable to investigate the physical processes involved in the fault rupture by incorporating conservation laws of continuum mechanics, constitutive behavior of rocks under interface sliding, and state of stress in the crust, and have the potential to expand our understanding of source-dominated ground motion phenomena. However, these deterministic physics-based rupture models are often limited to simulate only coherent low frequency ground motion.

In Chapter 2 (*accepted for publication in the Bulletin of the Seismological Society of America*), we propose that synthetic ground motions first have to be verified regarding to their compatibility with current GMPEs and provide an upper bound frequency up to which the synthetic data are consistent with empirical models. As an example of verification, we evaluate a suite of deterministic ground motion simulations generated by dynamic rupture models. We show

- quantitatively that the upper frequency limit of the suite of simulations is 1.0 Hz. Up to this frequency, the synthetic data are compatible with the empirical model.
- At near-source ($< 10km$), synthetics show differences with the empirical GMPE, in addition, very near to the fault we observe supersaturation of the mean peak values, which is different to the saturation features predicted by empirical GMPEs.
- that the effect of source parameters, such as stress drop, peak slip velocity and rupture speed, as well as the effects of blind and surface rupturing

faults and hanging/footwall effects are considerably affecting ground motion, suggesting that these effects contribute to the variability of ground motion near the source.

In Chapter 3 (*publication in preparation*), we present two alternative parameterizations of a synthetic waveform dataset based on dynamic rupture models. In a first step, we identify the main explanatory variables by analyzing the variation of synthetic ground motions by means of Peak Ground Velocity and Displacement Response Spectra as a function of different explanatory variables related to the earthquake source and the path from site to source. We furthermore verify whether the common approaches used in empirical GMPEs are appropriate for the parameterization of our data suite.

- We show that synthetic ground motion are primarily dependent on distance, moment magnitude, fault mechanism and hanging wall site location.
- Furthermore, we demonstrate the presence of directivity effects in the data suite and suggest to consider directivity effects as proposed by [Bayless and Somerville, 2013].

On the base of the evaluation of relevant explanatory variables, we present a synthetic GMPE based on the data suite. We show that our synthetic GMPE captures the main features of empirical GMPEs.