

Expertengruppe Starkbeben

Autor und Koautoren	D. Fäh, S. Wiemer, D. Roten, B. Edwards, V. Poggi, C. Cauzzi, J. Burjanek, M. Spada, R. Grolimund, M. Gisler, G. Schwarz-Zanetti, P. Kästli
Beauftragte Institution	Schweizerischer Erdbebendienst
Adresse	Sonneggstrasse 5, CH-8092 Zürich
Tel., E-Mail, Internetadresse	+41-44-633 3857, d.feah@sed.ethz.ch, www.seismo.ethz.ch
Dauer des Projekts	Juli 2010 to Juni 2014

ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt Expertengruppe Starkbeben ist in fünf Teilprojekte unterteilt und folgt dem Ziel der Verbesserung der regionalen und lokalen Erdbebengefährdungsabschätzung in der Schweiz mit speziellem Fokus auf die Standorte der Kernanlagen und den potenziellen Standorten für geologische Tiefenlager. Die fünf Teilprojekte befassen sich mit der Skalierung von Erdbeben und der Abminderung der seismischen Wellen als Funktion der Distanz vom Erdbebenherd mit den lokalen Verstärkungen von Bodenbewegungen, den sogenannten Standorteffekten, mit der Modellierung von seismischen Wellen in komplexen nichtlinearen Medien, mit der alternativen Charakterisierung von seismischen Quellregionen und mit der Aufarbeitung von historischen Daten zu Erdbeben.

Die Abminderung der seismischen Energie ist ein Hauptaspekt bei der Modellierung der Bodenbewegung. Die Expertengruppe Starkbeben beteiligt sich an der Entwicklung eines Schweiz-spezifischen stochastischen, seismischen Abminderungsmodells, welches eine Alternative zu den globalen Abminderungsmodellen im PRP darstellt.

Für die Charakterisierung des Standorteffektes sind die vorhandenen Informationen wie beispielsweise die Bodenklasse, Bodenunruhemessungen, das gemessene Geschwindigkeitsprofil oder Erdbebenaufzeichnungen von grosser Wichtigkeit. Um die Unsicherheiten dieser Charakterisierung zu reduzieren, untersucht die Expertengruppe Starkbeben verschiedene neue und existierende Proxys und berück-

sichtigt dabei den Einfluss von Geschwindigkeitsvariationen im Fels und in verschiedenen Sedimenten sowie Resonanz-Phänomene.

Als Vorbereitungen auf zukünftige Entwicklungen im Bereich der Erdbebengefährdungsabschätzung werden die ersten Schritte für den Übergang von der probabilistischen zur physik-basierten Erdbebengefährdungsabschätzung gemacht. Dazu wird nichtlineares Materialverhalten, einer der Schlüsselfaktoren bei der physikalischen Limitierung der Bodenbewegung mittels Modellierungen und Laboranalysen untersucht. Diese Arbeit verbessert auch das generelle Verständnis der Wellenausbreitungsphänomene und somit das Verständnis für die beobachteten Bodenbewegungen an der Erdoberfläche.

Im Teilprojekt der seismischen Quellcharakterisierung werden neue alternative Ansätze untersucht, um die Seismizität in schwach-seismischen Gebieten besser charakterisieren zu können. Mit der Anwendung einer realitätsnahen Verteilung der Seismizität wird gezeigt, dass herkömmliche PSHA Verfahren die Gefährdung überschätzen und die Unsicherheiten unterschätzen. Des Weiteren wurde in diesem Teilprojekt Arbeiten in Angriff genommen, um die Wahrscheinlichkeiten für Oberflächenrupturen zu berechnen.

Unter dem Teilprojekt der historischen Seismologie werden kontinuierlich historische Erdbebeninformationen aufgearbeitet, welche als Basisinformation in Schweizer Erdbebenkatalog einfließen. Die Expertengruppe beteiligte sich in diesem Zusammenhang an der Überarbeitung des Erdbebenkatalogs (ECOS-09).

Projektziele

Die Expertengruppe Starkbeben stellt für das ENSI das Kompetenzzentrum für Fragestellungen im Bereich Erdbeben dar. Die Expertengruppe wurde im Juni 2010 gestartet und im Laufe des Jahres 2011, nach dem schweren Tohoku-Erdbeben vom 11. März 2011, unter den neuen Rahmenbedingungen (Sistierung der neuen Kernkraftwerkprojekte, Entscheide in Richtung Ausstieg aus der Kernenergie in der Schweiz) nicht auf die ursprünglich vorgesehene Grösse mit vier Experten ausgebaut.

Ziel des Projektes Expertengruppe Starkbeben ist die aufsichtsgerichtete Forschung und Datenaufarbeitung im Bereich Erdbeben. Dabei lag der Fokus vor den veränderten Rahmenbedingungen auf den Standorten der bestehenden und geplanten Kraftwerkstandorte sowie potenziellen Standorten für zukünftige geologische Tiefenlager. Mittlerweile wurden die Projektziele den veränderten Rahmenbedingungen angepasst, wobei der Fokus auf geplante Kraftwerkstandorte entfällt.

Das Projekt ist in 5 Teilprojekte unterteilt und folgt dem Ziel der Verbesserung der regionalen und lokalen Erdbebengefährdungsabschätzung in der Schweiz mit speziellem Fokus auf die Standorte für Kernanlagen und den potenziellen Standorten für geologische Tiefenlager. Die 5 Teilprojekte befassen sich mit der Skalierung von Erdbeben und der Abminderung der seismischen Wellen als Funktion zur Herddistanz mit den lokalen Verstärkungen von Bodenbewegungen, sogenannten Standorteffekten, mit der Modellierung von seismischen Wellen in komplexen und nichtlinearen Medien, mit alternativen Charakterisierungen von seismischen Quellregionen und mit der Aufarbeitung von historischen Daten zu Erdbeben.

Aktivitäten und Resultate

Bodenbewegungs-Abminderungsmodelle und Erdbebenskalierung

Die Abminderung der seismischen Energie (einschliesslich des Qualitätsfaktors Q in der Erdkruste, der geometrischen Abminderung und des $Kappa$ -Parameters) ist ein Hauptaspekt bei der Modellierung der Bodenbewegung (z.B. Edwards et al., 2011a; Drouet et al., 2010). Da die Abminderung auch die Auflösung des Quellenparameters Stress-

Drop limitiert, führen das Verständnis und die verbesserte Modellierung der verschiedenen Einflussgrössen zu einer robusteren Vorhersage der Bodenbewegung. Die Modelle, welche die Abminderung beschreiben, werden auch Ground Motion Prediction Equations (GMPE) genannt. GMPEs basieren im Allgemeinen auf sehr komplexen Gleichungen mit Dutzenden von Parametern (Vergleiche z.B. Abrahamson et al., 2008). Allerdings ist die Qualität der Meta-Daten oft beschränkt. Beispielsweise ist die Beurteilung des sogenannten V_{s30} -Wertes (mittlere Scherwellengeschwindigkeit über die ersten 30 m) häufig unsicher, da der Wert nur abgeschätzt wurde oder von der eingesetzten Messtechnik abhängig ist. Der Hinweis auf solche Unsicherheiten ist insofern wichtig, weil für PSHA oft theoretische Modelle eingesetzt werden, die auf diesen unsicheren Parametern aufbauen. Eine GMPE zum Beispiel, welche sich in Wahrheit auf 760 m/s bezieht aber auf 900 m/s referenziert wird, beinhaltet bereits eine bestimmte unerwünschte Verstärkung, die nicht mehr korrigiert werden kann. Es ist daher ein Ziel dieses Teilprojektes, die Grundlagen für die Entwicklung von GMPEs weiter zu verbessern und die bestehenden Unsicherheiten der Modellparameter zu reduzieren. Insbesondere werden neue Beschreibungen der seismischen Quelle (z.B. Energie-Magnituden) und verbesserte Strategien für die Eingrenzung von $Kappa$ und der anelastischen Abminderung getestet, die zurzeit entwickelt werden.

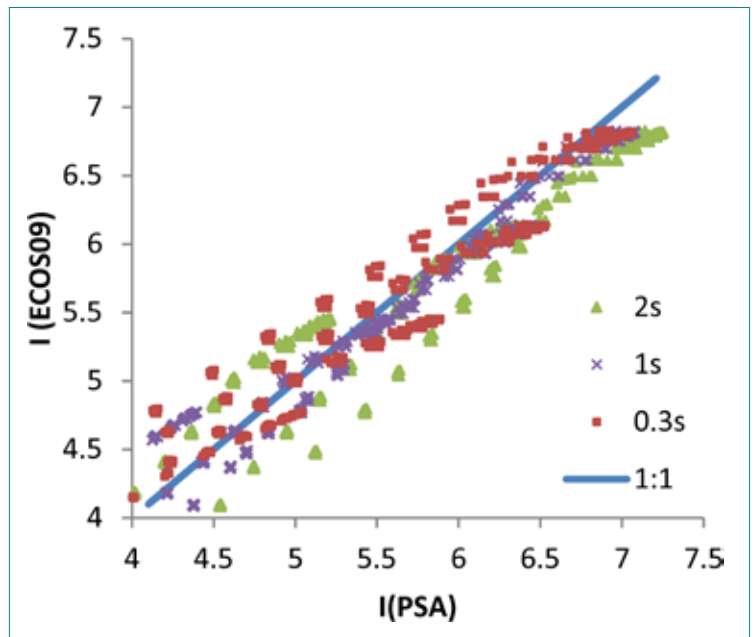
Die PRP-Expertengruppe SP2 hat eine Auswahl an bestehenden Ground Motion Prediction Equations (GMPEs) getroffen, um die Spannweite möglicher Bodenbewegung auf Fels abzudecken. Zusätzlich zur Auswahl von kalibrierten PRP SP2 GMPEs wurde ein stochastisches Modell einer Punktquelle entwickelt, um eine für die Schweiz spezifische, auf das generische Fels-Referenzprofil bezogene GMPE zu definieren (Edwards et al., 2010b). Dieses Modell beinhaltet Quellenbedingungen, die mit den Resultaten der PRP-Quellen-Untersuchungen (Goertz-Allmann et al., 2010) und der Magnitudenkalibrierung im Erdbebenkatalog der Schweiz ECOS-09 (Fäh, Giardini et al., 2011) kompatibel sind. Das stochastische Modell einer Punktquelle wird in einem nächsten Schritt ausgebaut, um Effekte einer endlichen Quelle zu berücksichtigen. Mit Hilfe der beobachteten makroseismischen Intensitäten und dem neu entwickelten makroseismischen Abminderungsmodell der Schweiz

wird das Modell gegen höhere Magnituden skaliert (Figure 1). Zurzeit ist dieses Modell in der Evaluation.

Die Berechnung von kompatiblen vertikalen Designspektren mit aktuellen PSHA-Verfahren bedingt den Einsatz von V/H-Verhältnissen der Bodenbewegung (z.B. Gülerce und Abrahamson, 2011). Ähnlich wie die GMPEs wurden die Modelle für die Vorhersage des V/H-Verhältnisses in den letzten Jahrzehnten verbessert, basieren aber oft auf komplexen Gleichungen. Aus japanischen und Schweizer Erdbebenregistrierungen wurde ein Modell des V/H-Verhältnisses für harten Fels entwickelt (Edwards et al., 2011b). Wir haben gezeigt, dass das V/H-Verhältnis für Felsstandorte aufgrund des Scherwellen-Geschwindigkeitsprofils mit einer vergleichsweise geringen Standardabweichung vorhergesagt werden kann. Ebenfalls wurden Korrekturen bestimmt, um die Zusammensetzung des Wellenfeldes im Nahbereich der Quelle und im Hochfrequenzbereich zu berücksichtigen. Diese Analyse ist auf harten Felsuntergrund mit Geschwindigkeiten von mehr als 800 m/s begrenzt.

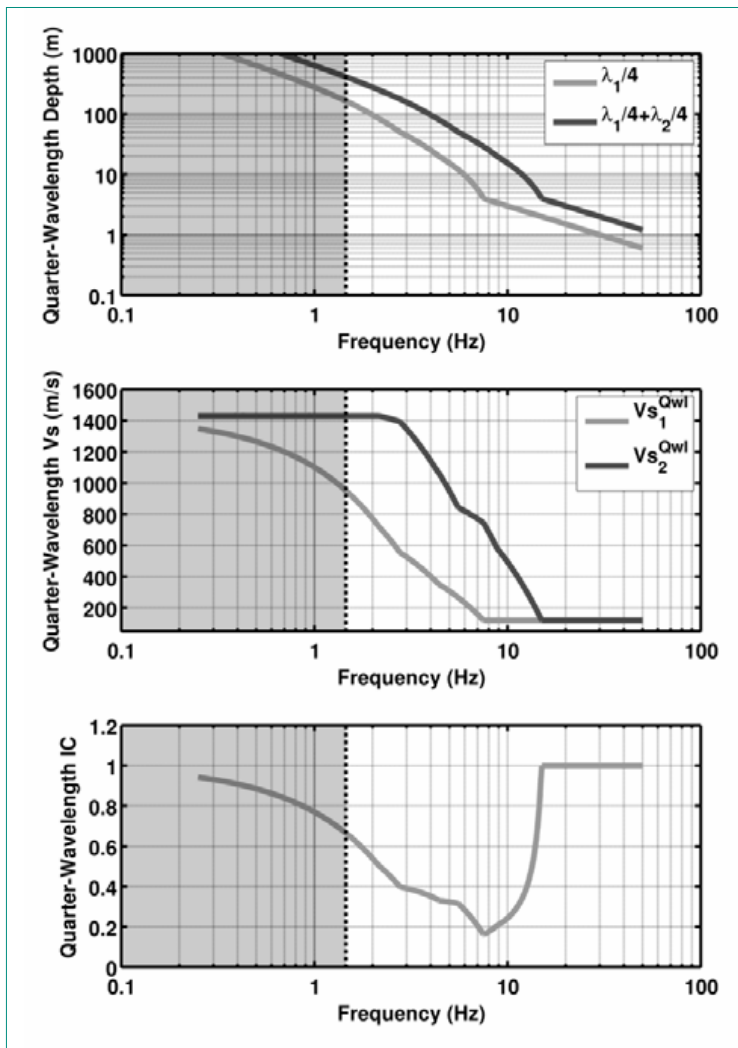
Standorteinfluss: Entwicklung empirischer Modelle für die Verstärkung der horizontalen und vertikalen Bodenbewegung

Die lokalen Sedimentablagerungen können das einfallende Wellenfeld im Fels stark verändern. Ziel dieses Teilprojekts ist es, diesen Einfluss des Standorts möglichst genau aus den bestehenden Informationen wie beispielsweise der Bodenklasse, Bodenunruhemessungen, dem gemessenen Geschwindigkeitsprofil oder Erdbebenaufzeichnungen abzuleiten. Die Beschreibung erfolgt primär in Form einer standortspezifischen, frequenzabhängigen Amplifikationsfunktion für die horizontale Bodenbewegung und dem V/H-Verhältnis, mit welchem sich die Bodenbewegung auf der vertikalen Komponente aus der horizontalen Bodenbewegung herleiten lässt (e.g. Gülerce und Abrahamson, 2011). In der Praxis ist die direkte Modellierung des vertikalen Design-Antwortspektrums mit GMPEs für die vertikale Komponente (Campbell, 1997) für einen Standort auf Sedimenten möglich; allerdings kann das Erdbeben-Deaggregations-Szenario zu einigen Unstimmigkeiten in Bezug auf die horizontale Bodenbewegung führen. Um dies zu vermeiden, wird das vertikale



Figur 1: Vergleich zwischen beobachteten makroseismischen Intensitäten I (ECOS-09) und mit dem erweiterten stochastischen Abminderungsmodell simulierten Werten für verschiedene Perioden (Edwards und Fäh, 2010a).

Spektrum durch Multiplikation des horizontalen Durchschnittsspektrums mit dem V/H-Verhältnis abgeschätzt. Dieser Ansatz stellt einen klaren Vorteil bei der Herstellung eines homogenen Erdbeben-Szenarios dar, das sowohl für das horizontale wie das vertikale Design-Spektrum Gültigkeit hat. Es wurde eine Methode entwickelt, um das V/H-Bodenbewegungsverhältnis für weiche Ablagerungen abzuschätzen. Der vorgeschlagene Ansatz erweitert die bisherige Methode von Edwards et al. (2011b), um Verstärkungseffekte durch Resonanzerscheinungen zu berücksichtigen. Dazu wurde ein neuer Parameter in den Vergleich mit den beobachteten V/H Verhältnissen eingeführt. Der sogenannte Quarter-wave-length seismic impedance contrast parameter (IC-Qwl) basiert auf der Schätzung des Kontrasts der seismischen Geschwindigkeit, den eine Welle einer vorgegebenen Frequenz an der entsprechenden Tiefe der Viertelwellenlänge «sehen» kann (Figur 2). In Sedimentbecken mit einem starken Geschwindigkeitskontrast weist die IC-Qwl Kurve typische Minima auf, die direkt mit den wichtigsten Schichtgrenzen in der Tiefe in Verbindung stehen. Das erste Minimum einer solchen Kurve kann mit der fundamentalen Resonanzfrequenz des Standorts in Beziehung gebracht werden. Dieser neue Parameter wird in die Korrelation mit den beobachteten V/H-Verhältnissen und den Viertelwellenlänge Geschwindigkeitsprofilen (V_s -Qwl) eingeführt. Als Ergebnis der Korrelationsanalyse wurden dann Regressionskoeffizienten für eine Reihe von diskreten Frequenzen im Bereich



Figur 2:
Beispiel der Beschreibung eines Profils mit Hilfe der quarter-wavelength oder Viertel-Wellenlänge Beziehung und die entsprechende IC-Kurve (IC-Qwl). Die gestrichelte Linie definiert den Frequenzbereich, in welcher das Profil zuverlässig ist, und auf Messwerten beruht. Im grauen Bereich sind die Werte extrapoliert.

zwischen 0,5 und 20 Hz bereitgestellt. Die vorgestellte Methode wurde mit einer Auswahl von Sedimentstandorten des japanischen Kik-Net Netzes kalibriert. Diese Standorte sind aufgrund einer Methode zur Festlegung der Zuverlässigkeit der Profile ausgewählt. Schliesslich analysierten wir die Abhängigkeit des V/H Verhältnisses von Distanz und Magnitude. Diese basiert auf einer Residuen-Analyse zwischen berechneten und beobachteten V/H-Verhältnissen.

Im Weiteren wurde eine zweite Methode entwickelt, die das V/H-Verhältnis für Erdbebenaufzeichnungen aus V/H-Verhältnissen der Bodenunruhe herleitet (Edwards et al., 2011c). Die Methoden wurden verwendet, um die V/H-Funktion zwischen 0,5 Hz und Peak-Beschleunigung (PGA) bei den Kernkraftwerkstandorten aus dem Geschwindigkeitsprofil vorherzusagen (Poggi et al., 2011c). Der Vergleich mit den bestehenden Aufzeichnungen von Erdbeben zeigt, dass die neuen Methoden zuverlässige Voraussagen erlauben. Als wei-

teres Beispiel für diese Anwendungen wurden die Verfahren auf eine Reihe von Standorten des seismischen Netzes in der Schweiz und Japan angewendet, für die gemessene Geschwindigkeitsprofile und V/H-Verhältnisse verfügbar sind. Die Auswertung ist noch nicht abgeschlossen.

Die vorliegende Arbeit unterstreicht die Notwendigkeit der Verwendung neuer Proxys für die lokale Standort-Charakterisierung. Insbesondere ist es nun offensichtlich, dass der alte Ansatz der Standort-Charakterisierung, welcher auf Schätzungen der V_{s30} (mittlere Scherwellengeschwindigkeit über die ersten 30 m des Profils) beruht, nicht ausreicht. Es konnte gezeigt werden, dass die entwickelten V/H-Modelle für Standorte auf weichen Sedimenten ein wertvolles Standard-Tool darstellen.

Modellierung komplexer Wellenausbreitungsphänomene und nichtlineares Verhalten

Das vorliegende Projekt befasst sich mit Grundlagen der Wellenausbreitung in heterogenen, nichtlinearen Medien. Diese Arbeiten bilden die Voraussetzungen für den Übergang von probabilistischer zu physik-basierter Erdbebengefährdungsanalyse. Die Schwerpunkte liegen auf den Phänomenen der Wellenausbreitung in dreidimensionalen, heterogenen Medien, auf den Auswirkungen des nichtlinearen Bodenverhaltens auf die lokalen Amplifikationen und Standorteffekte und auf den physikalischen Grenzen der Bodenbewegung auf Sedimenten und Fels.

Besonders die Auswirkungen des nichtlinearen Materialverhaltens auf Oberflächenwellen und fokussierten S-Wellen sind von Bedeutung. In der Praxis verwendete Programme simulieren die Wellenausbreitung nur in einer Dimension (z.B. Li, 1992, Prévost, 2010) und vernachlässigen dadurch die energiereichen Oberflächenwellen, welche markant zu Amplifikationen beitragen (z.B. Bard & Bouchon, 1980a, b). Ein Aspekt dieses Programms befasst sich daher mit der Wellenausbreitung in nichtlinearen Medien in zwei und drei Dimensionen. Dabei sollen Simulationen in 2-D (z.B. Bonilla et al., 2006) und möglicherweise 3-D durchgeführt werden. Diese Simulationen sollen dazu beitragen, Aufzeichnungen der Bodenbewegung mit eindeutiger nichtlinearer Signatur besser zu erklären.

Um die nichtlinearen Eigenschaften der Böden genauer zu modellieren, wurde zudem die Kalibrie-

rung der Bodenmodelle mit Labordaten verbessert. Dazu wurde ein Programm entwickelt, welches die im Labor gemessenen Kurven des Porenwasserdrucks und der Verformung nach den Parametern im Modell von Iai et al. (1990a) invertiert. Grundlage für diese Arbeiten bilden Experimente, welche an Proben aus dem Rhônetal bei Visp durchgeführt (Weber et al., 2007) und für eine Studie von nichtlinearem Bodenverhalten und Bodenverflüssigung bei Erdbeben im Wallis verwendet wurden (Roten et al., 2009). Die ersten Versuche mit simulierten und gemessenen Labordaten verliefen erfolgreich. Die Resultate dieser Arbeiten wurden an der ESG-2011-Konferenz in Santa Barbara präsentiert und in einem kurzen Paper vorgestellt (Roten et al., 2011b). Synthetische Seismogramme, welche mit dieser Methode generiert werden, dienen als Eingangssignal für die Simulation des nichtlinearen Bodenverhaltens. Erdbebenszenarien auf Basis solcher gekoppelter Simulationen wurden bereits z.B. für das Salt Lake Basin erstellt (Roten et al., 2011b). Diese Methode unterscheidet sich von der gängigen Praxis in der Verwendung synthetischer Seismogramme anstelle von skalierten Starkbebenaufzeichnungen. Daher ist die Sensibilität der nichtlinearen Effekte und der Bodenverflüssigung auf die Art des Eingangssignals ebenfalls ein Thema dieses Teilprojekts. Zudem sollen die Simulationen mit Aufzeichnungen an Standorten weltweit verglichen werden, welche eine vergleichbare Bodenbeschaffenheit aufweisen und Erdbeben in einem relevanten Magnitudenbereich erfahren haben (z.B. KiK-Net in Japan). Um relevante Daten für die Schweiz zu sammeln und Modelle zu kalibrieren, wird in Visp im Kontext des Projektes CO-GEAR (<http://cogear.ethz.ch>) eine Starkbebenstation mit mehreren Bohrlochensensoren installiert. Ein weiterer Aspekt dieses Teilprojektes ist der Einfluss möglicher Anisotropie. Eine solche wurde an mehreren Standorten schweizerischer Kernkraftwerke erkannt. Anisotropie hat einen grossen Einfluss auf die Wellenausbreitung, ist aber für oberflächennahe Strukturen nur wenig untersucht worden.

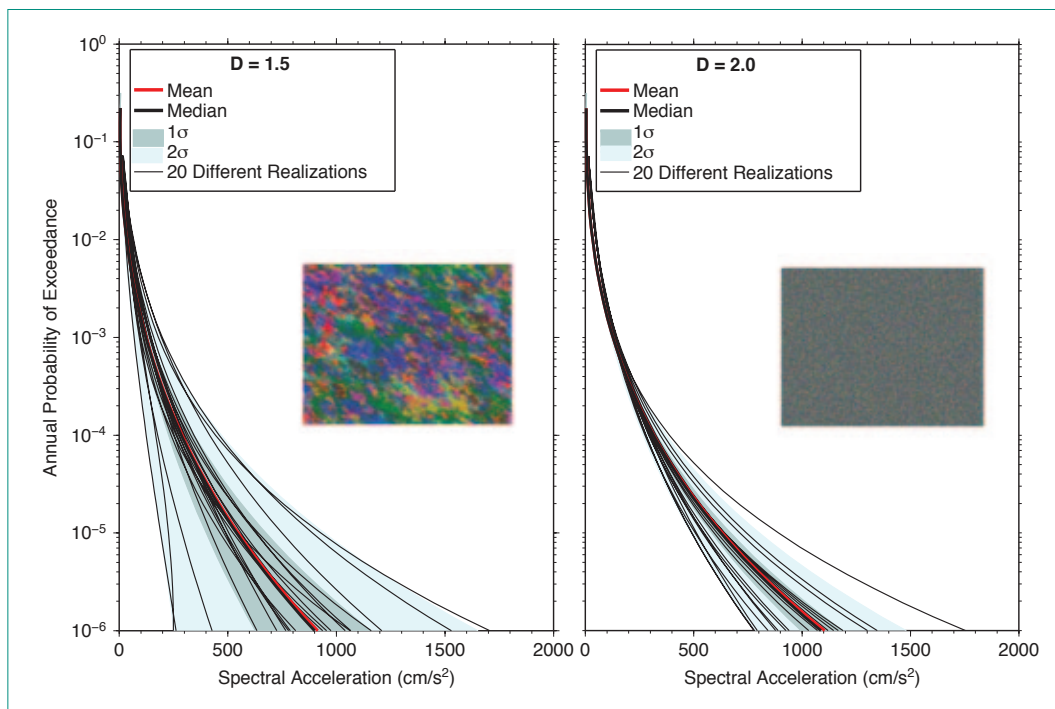
Mittelfristig sollen die in diesem Projekt entwickelten Methoden in einer umfangreichen Fallstudie getestet werden, die sich mit realistischen Erdbebenszenarien beispielsweise in der Region einer Schweizerischen Kernanlage befasst. Für diese Szenarien werden Verwerfungen ausgewählt, wel-

che am stärksten zur Gefährdung eines Standortes beitragen. Für die Simulation der Bodenbewegung werden verschiedene Methoden kombiniert. In einem ersten Schritt wird ein realistisches Modell der Quelle durch Simulation des dynamischen Bruchvorgangs erstellt (z.B. Dalguer & Day, 2007). Resultate dieser Simulation bilden die Grundlage für ein kinematisches Modell, mit welchem die Wellenausbreitung in einem detaillierten Modell der Erdkruste simuliert wird (z.B. Olsen et al., 2009). Diese Simulationen beschränken sich aufgrund des hohen Rechenaufwands auf Frequenzen bis 1 oder 2 Hz. Um synthetische Seismogramme für den relevanten Frequenzbereich von 0–50 Hz zu generieren, kommt eine Breitband-Methode zum Einsatz, welche den hoch-frequenten Anteil mit Hilfe der Diffusions-Theorie berechnet (Mai et al., 2010 und Mena et al., 2010).

Innovative Ansätze zur Charakterisierung von seismogenen Quellregionen in der Schweiz

Die Charakterisierung von seismischen Quellregionen ist ein wesentliches Element der probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse (PSHA). Die Modelle, die bislang im aktuellen schweizerischen Gefährdungsmodell von 2004 (Giardini et al., 2004; Wiemer et al., 2008) sowie auch die Modelle, die im Pegasos- und PRP-Projekt implementiert wurden (Wiemer et al., 2009), beruhen auf klassischen Zonierungsmodellen. Innerhalb einer Quellregion wird die Seismizität als räumlich und zeitlich zufällig verteilt angenommen. Speziell wenn auf niedrige Eintrittswahrscheinlichkeiten, welche für kritische Anlagen relevant sind, extrapoliert wird, ist es erstrebenswert, diese simplen Modelle zunehmend durch geologisch und physikalisch parametrisierte Modelle zu ersetzen. Die aktuellen Modelle sind in ihren Möglichkeiten begrenzt. So sind die Modelle primär zweidimensional konzipiert, und aktuelle Erkenntnisse über die 3D-Struktur der Kruste werden nicht berücksichtigt. Diese Modelle sind zudem extrem verschachtelt sowie komplex und daher fehleranfällig und nicht transparent. Des Weiteren verletzen einige Implikationen (z.B. Oberflächenbrüche, maximal mögliche Magnitude) geologische bzw. physikalische Randbedingungen, und der Spannungszustand sowie die Rheologie der Erdkruste ist nicht durch quantitative Modelle integriert.

Figur 3:
Vergleich der
Gefährdungskurven ba-
sierend auf dem klas-
sischen PSHA-Modell
(rechts) und dem von
uns eingeführten
«Fractal PSHA». Die
farbigen Einlegekarten
illustrieren den
Unterschied in der
Verteilung der synthe-
tischen Erdbeben mit
und ohne Clustering.



Das Ziel dieses Teilprojektes ist es, diese Einschränkungen sukzessive zu überwinden und so realistischere seismogene Quellmodelle zu erstellen, die aus numerischen Simulationen von realitätsnahen Modellen stammen. Dadurch wird es möglich sein, simulationsbasierte Gefährdungsberechnung der Quelle, der Ausbreitung und des lokalen Untergrundes zu einem Gesamtmodell zusammenzufügen. Dazu wurden diesbezüglich die Arbeiten zum sogenannten «Fractal PSHA» für die Schweiz abgeschlossen und publiziert [Spada et al., 2011]. Aufgrund der geringen Seismizität in erdbebenschwachen Gebieten und der Schwierigkeit, Bruchzonen zu identifizieren, bietet die Simulation von Erdbebenkatalog mittels eines fraktalen Ansatzes eine bessere Charakterisierung der Seismizität. Die bisherigen Ergebnisse zeigen eine Überschätzung der Gefährdung und eine Unterschätzung der Unsicherheiten durch herkömmliche PSHA-Verfahren. Ein Beispiel für den Unterschied von uniformer versus fraktaler PSHA für den Standort Mühleberg zeigt einen speziell grossen Unterschied in den Unsicherheiten (Figur 3). In einer anderen Forschungsrichtung wird die Wahrscheinlichkeit, dass Erdbebenbrüche die Erdoberfläche erreichen («Surface Faulting Probabilities»), für die Schweiz untersucht. Dazu wird zuallererst die Methodik erarbeitet und diese aufgrund des relativ einfach handhabbaren nationalen Gefährdungsmodells von 2004 ausgetestet. Des Weiteren wird die Interpretation der

3D seismischen Krustengeschwindigkeiten in der Schweiz mit Hilfe einer Kombination aus Daten der «controlled source seismology» (CSS) und «receiver functions» (RF) verbessert.

Historische Seismologie

Da Schadenbeben auf dem Gebiet der Schweiz relativ selten vorkommen, muss für Gefährdungsberechnungen auf Daten aus entsprechend weiten Zeiträumen zurückgegriffen werden. Die instrumentelle Seismologie liefert erst seit 1975 verlässliche Daten zur seismischen Aktivität auf dem Gebiet der Schweiz. Die Untersuchung der seismischen Gefährdung in der Schweiz ist deshalb auf historische Quellen aus der «vorinstrumentellen Zeit», d. h. auf zeitnahe Berichte aus allen Jahrhunderten angewiesen. Diese liegen für die neueste Geschichte u. a. in Form von makro-seismischen Erhebungen vor, für frühere Zeitperioden müssen Primärquellen und historische Erdbebenkataloge, die allerdings einer kritischen Prüfung bedürfen, beigezogen werden. Für grosse Erdbeben werden auch archäologische und paläoseismologische Befunde in die Interpretation der Ereignisse einbezogen.

Die Arbeiten der Expertengruppe Starkbeben ist in die Veröffentlichung des überarbeiteten Erdbebenkatalogs ECOS-eingeflossen. Die Publikation erfolgte einerseits in Form einer seit Juni 2011 öffentlich zugänglichen Online-Ausgabe ([178](http://www.seis-</p>
</div>
<div data-bbox=)

mo.ethz.ch), auf der die seismischen Parameter sowie, soweit vorhanden, Informationen über die Verteilung der Intensitäts-Datenpunkte und bibliographische Angaben abrufbar sind. Andererseits wurde eine detaillierte Dokumentation zum Erdbebenkatalog bereitgestellt. Diese beinhaltet eine zweibändige Buchpublikation (Schwarz-Zanetti und Fäh 2011, Gisler und Fäh, 2011), die den momentanen Forschungsstand in der historischen Seismologie am SED mit weiterführenden Kommentaren und Hinweisen vertieft zugänglich macht.

Weitere Aufgaben der nächsten Jahre sind weiterhin die Fortführung der historischen Dokumentation, des wissenschaftlichen Austausches, der Vermittlung der Forschungsergebnisse sowie der makroseismischen Erhebungen bei aktuellen Ereignissen, um die Datenbasis für die Kalibrierung historischer Erdbeben kontinuierlich zu verbessern. Zudem sollen Schadensbilder in Bezug auf die Einflüsse des geologischen Standorts und der Bau-substanz untersucht werden.

Nationale Kooperationen

Der Forschungsplan wurde in Zusammenarbeit mit dem ENSI ausgearbeitet und am 24. Februar in Brugg vorgestellt und diskutiert. Verschiedene Gruppenmitglieder nahmen an diversen Workshops des PRP teil. Die Teilnahme diente dazu, einen Überblick über das PRP-Projekt zu erhalten, sich in Aspekte des Projektes einzuarbeiten oder Resultate vorzustellen.

Die Rechenzeit für numerische Simulationen wird durch ein beim CSCS eingereichtes Projekt sichergestellt. An der ETH Zürich arbeiten wir mit dem Institut für Geotechnik, den verschiedenen Gruppen des SED und in enger Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Kissling (Seismologie und Geodynamik) zusammen. Zudem besteht im Rahmen des Projektes COGEAR (<http://cogear.ethz.ch>) eine intensive Zusammenarbeit mit Partnern aus verschiedenen Bereichen des ETH-Bereichs.

Internationale Kooperationen

Eine enge Zusammenarbeit besteht im EU-Projekt SHARE (Seismic Hazard Harmonization in Europe), insbesondere die Zusammenarbeit mit Fab-

rice Cotton und Stéphane Drouet (Universität Joseph Fourier, Grenoble) und Frank Scherbaum und Nico Kühn (Universität Potsdam). Der neue Erdbebenkatalog der Schweiz (ECOS-09) floss in die Katalogarbeit im EU-Projekt SHARE ein. Für die Simulation der Wellenausbreitung in 2D ist eine Zusammenarbeit mit Fabian Bonilla (IRSN) geplant. Es besteht regelmässiger Austausch mit Kim Olsen von der San Diego State University (SDSU) im Zusammenhang mit der Verwendung und Entwicklung der Programme für die 3D-Simulation der Wellenausbreitung. Für das 3D-Referenzmodell für die Schweiz sind wir in enger Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern vom Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).

Beurteilung 2011 und Perspektiven 2012

Nachdem die Expertengruppe Starkbeben nicht auf die ursprünglich vorgesehene Grösse mit vier Experten ausgebaut wird, besteht die Expertengruppe zukünftig aus zwei Experten. Der Forschungsplan für die sich im Aufbau befindliche Expertengruppe konnte aufgrund der neuen Rahmenbedingungen nicht weiter verfolgt werden. Die Neuausrichtung der Expertengruppe wurde zusammen mit dem ENSI definiert und wird sich zukünftig auf Aspekte fokussieren, welche für die Aufsichtstätigkeit des ENSI wichtig sind. Hauptziel wird es sein, das für die Tätigkeit des ENSI wichtige Fachwissen im Bereich der Seismologie zu erhalten und notwendigen Handlungsbedarf aufgrund von Forschungsfortschritten zu erkennen.

Die Forschungstätigkeiten im Jahr 2011 konnten unabhängig der Grösse der Expertengruppe Starkbeben und den bestehenden Randbedingungen weitergeführt werden.

Das Jahr 2012 steht im Zeichen der Umsetzung des ausgearbeiteten Forschungsplans für die Expertengruppe Starkbeben, bestehend aus 2 Experten.

Publikationen

Peer-reviewed publications and books related to the project (November 2011)

■ *B. Edwards and D. Fäh (2011), A Stochastic Ground-Motion Model for Switzerland. Submitt-*

ted to Bulletin of the Seismological Society of America.

- *B. Edwards, V. Poggi and D. Fäh (2011)*, A Predictive Equation for the Vertical-to-Horizontal Ratio of Ground Motion at Rock Sites Based on Shear-Wave Velocity Profiles from Japan and Switzerland. Bulletin of the Seismological Society of America, 101(6).
- *V. Poggi, B. Edwards and D. Fäh (2011)*, Characterizing the Vertical to Horizontal Ratio of Ground-Motion at Soft Sediment Sites. Submitted to Bulletin of the Seismological Society of America.
- *M. Spada, S. Wiemer, and E. Kissling (2011)*, Quantifying a Potential Bias in Probabilistic Seismic Hazard Assessment: Seismotectonic Zonation With Fractal Properties. Bulletin of the Seismological Society of America, 101(6).
- *M. Gisler und D. Fäh (2011)*, Grundlagen des Makroseismischen Erdbebenkataloges der Schweiz (1681–1878), Band 2, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, ISBN 978-3-7281-3407-3, DOI:10.3218/3407-3.
- *G. Schwarz-Zanetti und D. Fäh (2011)*, Grundlagen des Makroseismischen Erdbebenkataloges der Schweiz (1000–1680), Band 1, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, ISBN 978-3-7281-3406-6, DOI:10.3218/3406-6.

Poster presentations and extended abstracts related to the project (November 2011):

- *B. Edwards, V. Poggi and D. Fäh (2011)*, A Predictive Equation for the Vertical to Horizontal Ratio of Ground-Motion at Rock Sites Based on Shear Wave Velocity Profiles. 4th IASPEI/IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Strong Ground Motion, 2011, Santa Barbara, California. Available Online: <http://esg4.eri.ucsb.edu/sites/esg4.eri.ucsb.edu/files/5.22%20Edwards%20et%20al.pdf> [last accessed 28/11/11].
- *B. Edwards, D. Fäh and D. Giardini (2011)*, A Stochastic Ground-Motion Model for Switzerland. 4th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Strong Ground Motion, 2011, Santa Barbara, California. Available Online: <http://esg4.eri.ucsb.edu/sites/esg4.eri.ucsb.edu/files/3.3%20Edwards%20et%20al.pdf> [last accessed 28/11/11].
- *V. Poggi, B. Edwards and D. Fäh (2011)*, Characterizing the Vertical to Horizontal Ratio of

Ground-Motion in Soft Sediment Sites. 4th IASPEI/IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Strong Ground Motion, 2011, Santa Barbara, California. Available Online: <http://esg4.eri.ucsb.edu/sites/esg4.eri.ucsb.edu/files/5.23%20Poggi%20et%20al.pdf> [last accessed 28/11/11].

- *D. Roten, D. Fäh and J. Laue (2011)*, Application of a Neighbourhood Algorithm for Parameter Identification in a Cyclic Mobility Model. 4th IASPEI/IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Strong Ground Motion, 2011, Santa Barbara, California. Available Online: <http://esg4.eri.ucsb.edu/sites/esg4.eri.ucsb.edu/files/2.8%20Roten%20et%20al.pdf> [last accessed 28/11/11].

Referenzen

- [1] *N. Abrahamson, G. Atkinson, D. Boore, Y. Bozorgnia, K. Campbell, B. Chiou, I. M. Idriss, W. Silva and R. Youngs (2008)*, Comparisons of the NGA ground-motion relations, Earthq Spectra, 24(1), 45-66.
- [2] *P.-Y. Bard und M. Bouchon (1980a)*, The seismic response of sediment-filled valleys. Part 1. The case of incident SH waves. Bull. seism. Soc. Am., 70(4):1263–1286, August.
- [3] *P.-Y. Bard und M. Bouchon (1980b)*, The seismic response of sediment-filled valleys. Part 2. The case of incident P and SV waves. Bull. seism. Soc. Am., 70(5): 1921–1941, October.
- [4] *L. F. Bonilla, P.-C. Luis, und S. Nielsen (2006)*, 1d and 2d linear and nonlinear site response in the Grenoble area. In Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France, 30 August–1 September 2006, number 82.
- [5] *K. W. Campbell (1997)*, Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra, Seism. Res. Lett. 68, 154–179.
- [6] *L. A. Dalguer und S.M. Day (2007)*, Staggered-grid split-node method for spontaneous rupture simulation. J. Geoph. Res., 112:B02302.
- [7] *S. Drouet, F. Cotton und P. Gueguen (2010)*, $\nu(S30)$, κ , regional attenuation and

- M-w from accelerograms: application to magnitude 3-5 French earthquakes, *Geophys. J. Int.*, 182(2), 880-898.
- [8] *B. Edwards, B. Allmann, D. Fäh und V. Poggi (2010b)*, Stochastic model for Switzerland, Swiss Seismological Service Technical Report: SED/PRP/R/006/20091130, for the swissnuclear PEGASOS Refinement Project.
- [9] *B. Edwards, D. Fäh und D. Giardini (2011a)*, Attenuation of seismic shear wave energy in Switzerland. *Geophys. J. Int.*, 185(2), 967-984. doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.04987.x.
- [10] *B. Edwards, V. Poggi und D. Fäh (2011b)*, A Predictive Equation for the Vertical to Horizontal Ratio of Ground-Motion at Rock Sites based on Shear Wave Velocity Profiles: Application to Japan and Switzerland. Submitted to *Bull. Seism. Soc. Am.*
- [11] *B. Edwards, V. Poggi und D. Fäh (2011c)*, Characterizing the vertical to horizontal ratio of ground-motion at soft sediment sites derived from recorded ambient vibrations. Schweizerischer Erdbebendienst ETH Zürich, In technical Report SED/PRP/R/031/20110630, for the Pegasos Refinement Project.
- [12] *D. Fäh, D. Giardini, P. Kästli, N. Deichmann, M. Gisler, G. Schwarz-Zanetti, S. Alvarez-Rubio, S. Sellami, B. Edwards, B. Allmann, F. Bethmann, J. Wössner, G. Gassner-Stamm, S. Fritsche, D. Eberhard, 2011*, ECOS-09 Earthquake Catalogue of Switzerland Release 2011 Report and Database. Public catalogue, 17. 4. 2011. Swiss Seismological Service ETH Zurich, Report SED/RISK/R/001/20110417.
- [13] *D. Giardini, S. Wiemer, D. Fäh und N. Deichmann (2004)*, Seismic hazard assessment of Switzerland, 2004, SED internal report.
- [14] *M. Gisler und Fäh, D. (2011)*, Grundlagen des Makroseismischen Erdbebenkataloges der Schweiz (1681–1878), Band 2, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, ISBN 978-3-7281-3407-3, DOI:10.3218/3407-3
- [15] *B. Goertz-Allmann, B. Edwards, F. Bethmann, N. Deichmann, J. Clinton, D. Fäh und D. Giardini (2010)*, A new empirical magnitude scaling relation for Switzerland. BSSA submitted. 16.
- [16] *Z. Gülerce und N. Abrahamson (2011)*, Site-Specific Design Spectra for Vertical Ground-Motion, accepted for publication in *Earthquake Spectra*.
- [17] *S.-Y. Iai, Y. Matsunaga, und T. Kameoka (1990)*, Parameter identification for a cyclic mobility model. Report of the Port and Harbour Research Institute, 29:57–83.
- [18] *X. S. Li, ZL Wang und C.K. Shen (1992)*, SUMDES: a nonlinear procedure for response analysis of horizontally-layered sites subjected to multi-directional earthquake loading. Department of Civil Engineering, University of California, Davis, page 86.
- [19] *P. M. Mai, W. Imperatori und K. B. Olsen (2010)*, Hybrid Broadband Ground-Motion Simulations: Combining Long-Period Deterministic Synthetics with High-Frequency Multiple S-to-S Backscattering. *Bull. seism. Soc. Am.*, 100(5A): 2124–2142.
- [20] *B. Mena, P. M. Mai, K. B. Olsen, M. D. Purvance und J. N. Brune (2010)*, Hybrid Broadband Ground-Motion Simulation Using Scattering Green's Functions: Application to Large-Magnitude Events. *Bull. seism. Soc. Am.*, 100(5A): 2143–2162.
- [21] *K. B. Olsen, S. M. Day, L. A. Dalguer, J. Mayhew, Y. Cui, J. Zhu, V. Cruz-Atienza, D. Roten, P. Maechling, T. Jordan, D. Okaya und A. Chourasia (2009)*, Shakeout-d: Ground motion estimates using an ensemble of large earthquakes on the southern san andreas fault with spontaneous rupture propagation. *Geophys. Res. Lett.*, 36:L04303.
- [22] *V. Poggi, B. Edwards und D. Fäh, (2011c)*, V/H of 5% Damped Response Spectra for NPP sediment sites. . Schweizerischer Erdbebendienst ETH Zürich, in technical report SED/PRP/R/031/20110702, for the Pegasos Refinement Project.
- [23] *J.H. Prevost (2010)*, Dynaflow. Princeton University, Princeton, NJ.
- [24] *D. Roten, D. Fäh, L.F. Bonilla, S. Alvarez-Rubio, TM Weber und J. Laue (2009)*, Estimation of non-linear site response in a deep Alpine valley. *Geophys. J. Int.*, 178(3):1597–1613. ISSN 1365-246X.
- [25] *D. Roten, K.B. Olsen, J. Pechmann, V. Cruz-Atienza und H. Magistrale (2011b)*, 3-D Ground motion modeling for M7 dynamic rupture earthquake scenarios on the Wasatch fault, Utah. Part I: Spontaneous rupture simulations and wave propagation. *Bull. seism. Soc. Am.*, in press.
- [26] *G. Schwarz-Zanetti und D. Fäh (2011)*, Grund-

- lagen des Makroseismischen Erdbebenkataloges der Schweiz (1000–1680), Band 1, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, ISBN 978-3-7281-3406-6, DOI:10.3218/3406-6.
- [27] *M. Spada, S. Wiemer und E. Kissling (2011)*, Correcting a potential bias in Probabilistic Seismic Hazard Assessment: Seismotectonic Zonation with fractal properties. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, in press.
- [28] *T. Weber, J. Laue und S. M. Springmann (2007)*, Geotechnical laboratory tests for identification of soil parameters for the cyclic mobility model of sandy soil from Visp (VS). Project report – SHAKE-VAL 2, ETH Zürich, Institute for Geotechnical Engineering.
- [29] *S. Wiemer, M. Garcia-Fernandez und J. P. Burg (2009)*, Development of a seismic source model for probabilistic seismic hazard assessment of nuclear power plant sites in Switzerland: the view from PEGASOS Expert Group 4 (EG1d), *Swiss Journal of Geo-sciences*, 102(1), 189-209.
- [30] *S. Wiemer, D. Giardini, D. Fäh, N. Deichmann und S. Sellami (2008)*, Probabilistic Seismic Hazard Assessment of Switzerland: Best Estimates and Uncertainties, *J. Seismology*.