

Dynamische und hochauflösende Aktivitätsvorhersagen und Folgenabschätzung von Erdbeben

Danijel Schorlemmer, Sebastian Hainzl, Arno Zang, Fabrice Cotton
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

The nucleation of earthquakes and their seismic waves cannot be predicted in a deterministic sense. However probabilistic hazard and risk estimations can be conducted which help to increase the preparedness and reduce the vulnerability of societies. Those estimations are based on the rapidly growing number of empirical earthquake data recorded by seismic networks or known from historical or geological studies, which show that earthquakes are not randomly occurring. They typically occur clustered in space and time with specific characteristics such as the Gutenberg-Richter law for the frequency-magnitude distribution. Seismicity models have to account for earthquake interactions to avoid erroneous estimations of the activity level and spatial distribution of future activity. Additionally, the vulnerability of societies is changing with time, because of the dynamic reconstruction and growth of cities in earthquake-prone regions. Thus new sophisticated models, strategies, and methods have to be developed and tested for all components of the earthquake risk chain to improve our probabilistic hazard and risk estimations.



Die zerstörerische Kraft von Erdbeben stellt eine große Bedrohung für die Menschheit dar. Das verheerende Beben von San Francisco im Jahre 1906 war eine dieser großen Erdbebenkategorien, wurde aber zugleich zu einem wichtigen Meilenstein in der Seismologie, da das Gebiet um San Francisco kurz vor dem Beben vermessen wurde und diese Messung danach wiederholt und damit erstmals das genaue Ausmaß der Verschiebungen ermittelt werden konnte. Aus diesen Beobachtungen formulierte Harry Fielding Reid 1910 die Theorie der elastischen Entspannung, die als erste eine wissenschaftliche Beschreibung der Erdbeben lieferte. Basierend auf dieser Theorie, versuchten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, große Erdbeben vorherzusagen. In der Regel beschränkte sich die Suche auf Vorläufersignale, also messbare Anomalien, die mit einem Erdbeben ursächlich verbunden sind. Der scheinbare anfängliche Erfolg der Evakuierung der chinesischen Stadt Haicheng 1975 vor einem großen Beben wurde bereits 1976 erschüttert, als das völlig überraschende Erdbeben von Tangshan die gesamte Stadt zerstörte und mehreren hunderttausend Menschen das Leben kostete. Zudem traten mit der Zeit Zweifel auf, ob die Erdbebenvorhersage von Haisheng wirklich eine Vorhersage oder nur eine Reaktion auf bereits erhöhte Erdbebenaktivität war. Das gescheiterte Erdbebenvorhersageexperiment des United States Geological Survey im zentralifornischen Parkfield führte zu dem Schluss, die Versuche zur Erdbebenvorhersage aufzugeben und den wissenschaftlichen Fokus auf die statistische Berechnung der Erdbebengefährdung zu setzen als einzige Möglichkeit der nachhaltigen Verminderung der Auswirkungen von Erdbeben. Derartige Langzeit-Erdbebengefährdungsanalysen liefern die ingenieurseismologischen Grundlagendaten für Erdbebenbaunormen und damit für das erdbebengerechte Design von gebauter Infrastruktur. Die Methodik statistischer Langzeitabschätzungen der Erdbebengefährdung wurde im GFZ-Journal „System Erde“ bereits detailliert dargestellt (Grünthal et al., 2013).

In den letzten Jahren sind große Datenquellen entstanden und zugänglich gemacht geworden, die neue Verarbeitungsmethoden erfordern, neue Möglichkeiten in der Informationsgewin-

nung eröffnen und zu neuen, detaillierteren Ergebnissen führen werden. Dieser Artikel stellt diesbezügliche Arbeiten am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ exemplarisch vor.

Von der Erdbebenbeobachtung zur hochauflösenden Aktivitätsprognose

Der Ausgangspunkt aller Erdbebengefährdungsberechnungen sind die direkten Beobachtungen. Diese sind im Wesentlichen frühere Erdbeben, große zerstörerische und die kleinen, nicht spürbaren Beben, sowie Lage, Ausdehnung und Aktivität von geologischen Verwerfungen. Von Erdbeben verursachte Wellen breiten sich im Erdkörper aus und werden von seismologischen Messgeräten erfasst. Aus deren Aufzeichnungen werden die Magnitude, das Hypozentrum und die Herdzeit des Erdbebens berechnet. Die Detektionsfähigkeit variiert räumlich und hängt insbesondere von der Dichte des Stationsnetzes und der Stärke der Erdbeben ab. Kleinere Erdbeben treten viel häufiger als große Erdbeben auf. Aus ihren Raten werden in Gebieten, in denen geologische Verwerfungen nicht bekannt oder kartiert sind, die Raten und die räumliche Verteilung der größeren Erdbeben abgeschätzt. Dazu muss allerdings die Magnitude bekannt sein, ab welcher der Katalog als vollständig angenommen werden kann. Zu diesem Zweck wurde eine probabilistische Methode entwickelt, um die raumzeitliche Verteilung der kleinsten vollständig aufgezeichneten Erdbeben sowie die Detektionswahrscheinlichkeit für jeden Ort, jeden Zeitpunkt und jede Magnitude zu berechnen (Schorlemmer und Woessner, 2008). Bei diesem Verfahren werden von allen Beben die Signalerfassungen an allen Stationen verarbeitet, um die Detektionsfähigkeit des Netzwerks als eine Funktion von Raum und Zeit bestimmen zu können. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel aus Italien (Schorlemmer et al., 2010). Neben Italien wurde auch in Neuseeland, Kalifornien und Japan die Entwicklung der Detektionsfähigkeit der jeweiligen Netzwerke berechnet und dokumentiert. Aktuell wird diese Methode derart erweitert, dass für moderne Netzwerke die gesamten Aufzeichnungen aller Stationen verarbeitet und die Detektionswahrscheinlichkeiten mithilfe der Signal-Rausch-Verhältnisse berechnet werden. Dies wird es ermöglichen, Detektionswahrscheinlichkeiten in Nahe-Echtzeit zu berechnen und die Analysen noch detaillierter durchzuführen.

Vollständige Erdbebenkataloge bilden die Grundlage für die Untersuchung ihrer statistischen Eigenschaften, die letztendlich zu einer Vorhersage der Eintrittswahrscheinlichkeit für ein Erdbeben in einer bestimmten Zeit und in einem bestimmten Gebiet benutzt werden. Klassische Vorhersagemodelle beruhen auf dem Poissonmodell, also darauf, dass Erdbeben voneinander unabhängig mit konstanter Rate auftreten. Dies ist weltweiter Standard für die langfristigen Gefährdungsaus-

Links: Zerstörte Häuser nach Erdbeben und Tsunami in Japan am 11. März 2011 (Foto: Daniel Pierce, aufgenommen 2. Mai 2011, CC BY 2.0, <https://www.flickr.com/photos/daniel-pierce/5709200331/>)

Left: Destroyed homes after earthquake and Tsunami in Japan of 11 March 2011



Kontakt: D. Schorlemmer
(ds@gfz-potsdam.de)

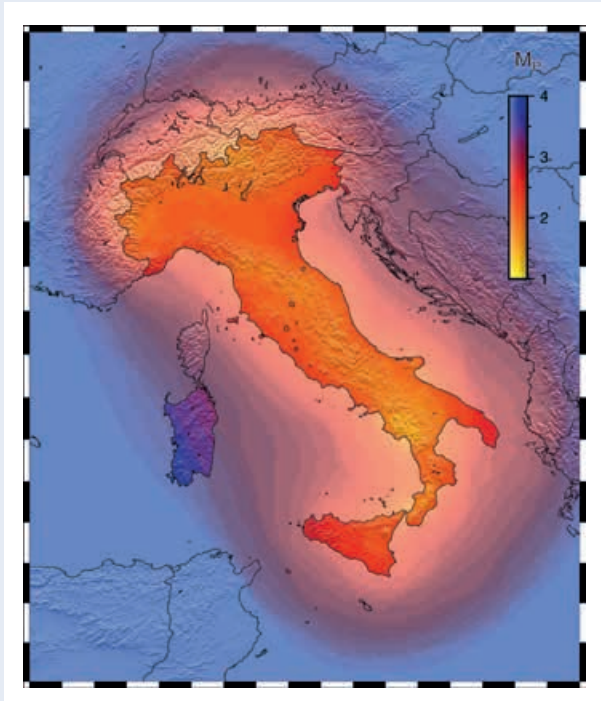


Abb. 1: Aufzeichnungsqualität des italienischen seismologischen Netzwerks des Istituto Nazionale di Geofisika e Vulcanologia. Farblich kodiert ist die kleinste Magnitude, die vollständig erfasst wird.

Fig. 1: Detection ability of the Italian seismic network of the Istituto Nazionale di Geofisika e Vulcanologia. Color-coded is the smallest magnitude which is completely recorded.

sagen (mehrere Jahrzehnte), die als seismische Lastannahmen das Rückgrat von Baunormen zum erdbebengerechten Konstruktionsentwurf bilden (Grünthal et al., 2013). Für Aktivitätsprognosen kürzerer Zeiträume ist aber zu berücksichtigen, dass zeitlich benachbarte Erdbeben innerhalb von Serien von Vor- und Nachbeben in vielfältiger Weise miteinander interagieren und somit nicht als unabhängige Ereignisse behandelt werden können. Jedes Erdbeben erzeugt in seiner Umgebung Spannungsänderungen, die das Auftreten von nachfolgenden Erdbeben beschleunigen oder verzögern. Dieses Zusammenspiel von Erdbeben kann zu Phasen seismischer Ruhe oder zu raumzeitlichen Erdbebenanhäufungen (Schwärme und Nachbebensequenzen) führen. Insbesondere Nachbeben dominieren häufig die gemessene Erdbebenaktivität in instrumentellen Erdbebenkatalogen und werden hauptsächlich durch die von Erdbeben induzierten statischen Spannungsänderungen ausgelöst (Hainzl et al., 2014). Die Nachbebenrate nimmt zeitlich mit dem bekannten Omori-Gesetz, einem Potenzgesetz, ab, während die genaue Charakterisierung der räumlichen Abnahme erst kürzlich unter Beteiligung des GFZ gelungen ist (Moradpour et al., 2014). Die Vernachlässigung der Zeitabhängigkeit des Erdbebenprozesses kann somit nicht nur zu fehlerhaften

Einschätzungen des zukünftigen Aktivitätsniveaus, sondern auch seiner räumlichen Verteilung führen. Ein wichtiger Teil der Forschungsarbeiten am GFZ zielt deshalb auf eine verbesserte Charakterisierung der Interaktionen von Erdbeben ab, um Abschätzungen der Erdbebengefährdung zu verbessern.

Für kurz- und mittelfristige Vorhersagen der Seismizitätsraten eignet sich das ETAS (Epidemic Type Aftershock Sequence)-Modell. Dieses Modell beschreibt das raumzeitliche Auftreten der Erdbeben als Summe einer zeitlich konstanten tektonischen Hintergrundaktivität und erdbebeninduzierter Nachbebensequenzen. Die Parameter dieses empirischen Modells können aufgrund limitierter Erdbebenkataloge häufig nicht zufriedenstellend aus den Daten abgeschätzt werden. Deshalb werden Teile des Modells durch physikalische Beziehungen bestimmt. So wurden modifizierte ETAS-Modelle entwickelt, in denen die räumliche Nachbebenverteilung bzw. die Nachbebenproduktivität durch die Berechnung der erdbebeninduzierten statischen Spannungsänderungen in der Erdkruste bestimmt wird (Bach und Hainzl, 2012; Zakharova et al., 2013). Neben dem raumzeitlichen Auftreten, konnte auch gezeigt werden, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der Größenverteilung und dem Spannungszustand besteht (Schorlemmer et al., 2005; Schorlemmer und Wiemer, 2005). Dieser Zusammenhang kann durch das Kartieren der Stressfeldvariationen für verbesserte raumzeitliche Abschätzung der Nachbebenaktivität verwendet werden.

Um die Vorhersagekraft existierender Seismizitätsmodelle zu ergründen, wurde eine internationale Plattform, das „Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability“ (CSEP) ins Leben gerufen. Sie hat sich als Ziel gesetzt, objektive und reproduzierbare Tests von Seismizitätsmodellen durchzuführen. Dabei wird die Modellberechnung unabhängig von den Modellierern in einem der vier weltweit existierenden Testzentren durchgeführt und gegen Erdbeben getestet, die nach der Modellberechnung aufgetreten sind. Seismizitätsmodelle, die sich in diesen Tests bewähren, können dann mit größerem Vertrauen in seismischen Gefährdungsanalysen verwendet werden. Besonders hervorzuheben ist das hochauflösende globale Experiment, bei dem statistische Vorhersagen für mehr als 250 Mio. Zellen (definiert in Longitude, Latitude und Magnitude) täglich getestet werden. Das GFZ trägt zu dieser Initiative sowohl mit der Entwicklung geeigneter Testverfahren, als auch als Modellentwickler maßgeblich bei (z. B. Schorlemmer et al., 2007; Schorlemmer und Gerstenberger, 2007).

Die größten Erdbeben treten auf existierenden Verwerfungen auf und bauen die dort angestaute Spannung schlagartig ab. Die Berechnung der Wiederkehr dieser Beben spielt für die Abschätzung der Erdbebengefährdung eine große Rolle, aber deren relativ seltenes Auftreten macht es nahezu unmöglich, innerhalb von wenigen Jahren aussagekräftige Testresultate für die entsprechenden Vorhersagemodelle zu erhalten. Daher werden als Anhaltspunkte geologische und historische Indikatoren für eine Abschätzung der Häufigkeit von Erdbeben her-

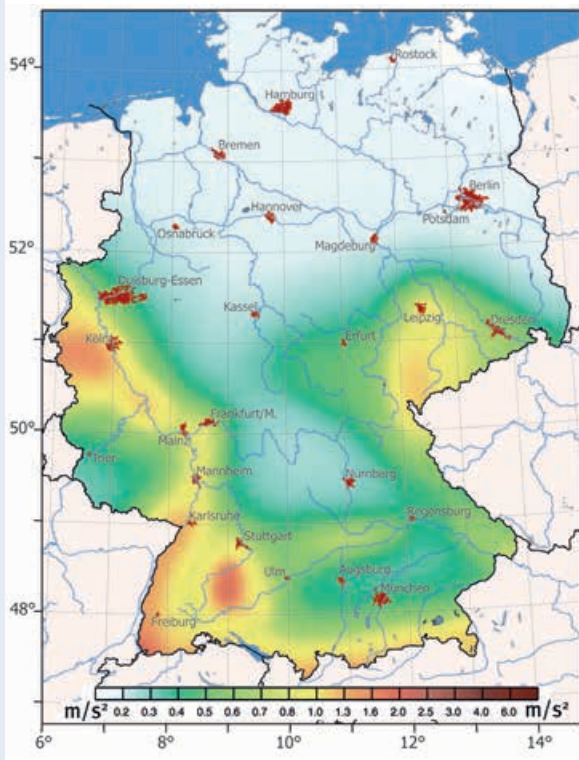


Abb. 2: Karte der Spitzenbodenbeschleunigungen PGA (Felsuntergrund, 50 %-Fraktile) für 4 % Überschreitenswahrscheinlichkeit in 100 Jahren bzw. einer jährlichen Überschreitenswahrscheinlichkeit $P=4 \times 10^{-4}$. Dem entspricht eine mittlere Wiederholungsperiode $T=2500$ Jahre (Abb. aus Grünthal et al., 2009).

Fig. 2: Map of peak ground acceleration PGA (rock, 50 % fractile) for an exceedance probability of 4 % in 100 years, respectively an annual exceedance probability of $P=4 \times 10^{-4}$, which corresponds to an average recurrence period of $T=2500$ years.

angezogen. Diese sind z. B. geomorphologische Analysen, wie der Versatz von Bachläufen oder der Versatz von Schichten, der durch Grabungen an den Verwerfungen erfasst werden kann. In manchen Regionen, wie z. B. in Italien, können zusätzlich auch lang zurückreichende historische Aufzeichnungen verwendet werden. Basierend auf diesen Daten werden einfache statistische Modelle angepasst, mit deren Hilfe die Auftretswahrscheinlichkeit und ihre Variabilität festgelegt werden.

Von der Aktivitätsprognose zur Gefährdung

Gesellschaftlich relevant ist nicht die Aktivitätsprognose selbst, sondern die Abschätzung der Erdbebengefährdung, welche die Wahrscheinlichkeiten des Überschreitens bestimmter Größen

von Bodenbewegungen beschreiben. Diese Wahrscheinlichkeiten hängen neben der Häufigkeit, Magnitude und Lage der Hypozentren auch von dem Bruchtyp und von lokalen Bodeneigenschaften ab. Zwei Arten der Beschreibung werden hierbei verwendet: Intensitäten und physikalische Größen, wie Bewegungsgeschwindigkeit oder -beschleunigung.

Intensitäten beschreiben die örtlichen Effekte von Erdbeben auf die Umwelt. Dies umfasst den gesamten Bereich von der Spürbarkeit des Bebens über verschiedene Stufen der Beschädigung von Gebäuden bis hin zu deren vollständiger Zerstörung. Diese Form der Beschreibung muss an die Verletzbarkeit von Gebäuden kalibriert werden, um allgemeingültige Intensitätswerte liefern zu können. Obwohl heute direkt physikalische Größen der Bodenbewegung gemessen werden können, bleiben Intensitäten wichtig, da für historische Beben nur Intensitäten aus Beschreibungen von Zeitzeugen abgeleitet werden können (Schellbach und Grünthal, 2016). So können heutige Beben mit historischen verglichen oder Auswirkungen möglicher Wiederholungen historischer Beben besser verstanden werden. Intensitäten werden mit Hilfe von Gleichungen vorhergesagt, die im Wesentlichen die Magnitude und Entfernung zum Erdbeben als Parameter benötigen. Solche Gleichungen werden aus vorhergehenden Intensitätsbeobachtungen hergeleitet. Vergleichbar mit den Tests für Erdbebenvorhersagemodelle wurden am GFZ Tests durchgeführt, die die Vorhersagequalität von Intensitätsvorhersagegleichungen für Italien untersuchen (Mak et al., 2015). Dabei konnte festgestellt werden, dass Gleichungen, die auf physikalischen Prinzipien basieren, eine größere Vorhersagekraft haben, als die, welche die Daten rein statistisch anpassen. Diese Testverfahren können in der Zukunft helfen, aus der Vielzahl solcher Gleichungen diejenigen auszuwählen, deren Vorhersagekraft am größten ist.

Intensitäten sind sehr gut zur Kommunikation geeignet, gleichwohl werden Gefährdungsanalysen meistens in physikalischen Größen angegeben, da diese für die Entwicklung von Gebäudevorschriften notwendig sind und insgesamt eine genauere Beschreibung der Bodenbewegung liefern. In der Regel werden Bodenbewegungsgleichungen für die tektonischen Hauptgruppen (z. B. Subduktionszone) aus möglichst vielen vorhergehenden Beobachtungen abgeleitet. Beobachtungen legen jedoch nahe, dass regionale Eigenheiten der Verwerfungen, Erdbeben und Krusteneigenschaften signifikanten Einfluss auf die Bodenbewegungen haben und diese berücksichtigt werden müssen. Daher werden in dieser interdisziplinären Forschung am GFZ Regionalisierungen von Bewegungsgleichungen durch datenbasierte Charakterisierungen von regionalen Eigenschaften, Wellenausbreitungssimulationen und direktes Beobachten von Bodeneigenschaften an kritischer Infrastruktur vorangetrieben, so z. B. in hochaktiven Gebieten (Kotha et al., 2016) oder stabilen Teilen Europas (Drouet und Cotton, 2015). Insbesondere aber werden die exponentiell wachsende Menge an Bodenbewegungsbeobachtungen und neue Methoden im maschinellen Lernen zur Entwicklung vollständig datenbasier-

ter Bewegungsgleichungen genutzt (Derras et al., 2014). Damit wird es möglich, die Abhängigkeit der Bodenbewegungen von der Charakteristik der Erdbeben (Faltungstyp, Tiefe) und des lokalen/regionalen Untergrunds (Boden-/Gesteinstypen, Lage) zu ermitteln. Innerhalb von EPOS (European Plate Observing System) leitet das GFZ die Gruppe für regionale Bewegungsgleichungen für Europa.

Gefährdungsanalysen verknüpfen Aktivitätsprognosen mit Bodenbewegungsgleichungen. Hierbei wird zwischen deterministischen und probabilistischen Analysen unterschieden. Eine deterministische Analyse beschreibt ein konkretes Erdbebenszenario und die dabei zu erwartenden Bodenbewegungen. Im Gegensatz dazu basieren probabilistische Analysen auf Wahrscheinlichkeitsverteilungen unterschiedlicher Szenarien und liefern daher ein vollständigeres Bild der zu erwartenden Bewegungen. Das GFZ ist sowohl an weltweiten Analysen (z. B. SHAREP; Woessner et al., 2015), als auch an regionalen oder nationalen Gefährdungseinschätzungen beteiligt (siehe Abb. 2, Grünthal et al., 2009). Gleichzeitig wurde in Zusammenarbeit mit dem Global Earthquake Model (GEM) am GFZ ein Kompetenzzentrum für das Testen aller an Gefährdungsanalysen benötigten Komponenten aufgebaut.

In einer Pilotstudie wurden sowohl japanische Bodenbewegungsgleichungen als auch Gefährdungsmodelle des United States Geological Survey (USGS) getestet (Mak und Schorlemmer, in press).

Crowd-sourced Daten, citizen science und dynamische Risikoabschätzung

Gefährdungsanalysen beschreiben die physischen Auswirkungen von Erdbeben und dienen als Grundlage für Vorschriften für erdbebensicheres Bauen. Obwohl solche Vorschriften für viele Erdbebengebiete existieren, entspricht ihnen nur ein Bruchteil der Häuser. Da bei jedem größeren Beben mit Schäden und Opfern zu rechnen ist, ist es sinnvoll, sogenannte Risikomodelle zu berechnen, um die Auswirkungen von Erdbeben auf die Bevölkerung und die Gebäude abschätzen zu können. Dazu werden Modelle entwickelt, die die Verteilung von Gebäuden und ihre Verwundbarkeit beschreiben. Mit diesen Modellen können aus den Gefährdungsanalysen Risikoberechnungen erstellt werden und die potenziellen Zahlen der beschädigten und zerstörten Gebäude sowie der verletzten und getöteten Menschen abgeschätzt werden. Diese Modelle sind nicht nur für staatliche Akteure wichtig, sondern dienen auch der (Rück-)Versicherungswirtschaft zur Abschätzung der Versicherungsprämien.

Am GFZ wird ein Ansatz zur Erschließung einer völlig neuen Datenquelle erprobt. Diese Idee basiert auf offenen Daten und aktiver Bürgerbeteiligung (citizen science). Als Grundlage wird OpenStreetMap (OSM, www.openstreetmap.org), eine

offene geographische Datenbank, quasi eine Wikipedia der Geodaten, verwendet. Da OSM auf der Arbeit von Freiwilligen basiert, ist die Datenvollständigkeit sehr heterogen. Dennoch gibt es bereits intensiv erfasste Gebiete, in denen jedes Gebäude mindestens als Grundriss enthalten ist. Gegenwärtig hat OSM mehr als 175 Mio. Gebäudegrundrisse und diese Zahl wächst um rund 100 000 Gebäude täglich. Das System berechnet für jedes Gebäude so viele Expositionsindikatoren, wie es die Datenausgangslage in OSM erlaubt (siehe Abb. 3). Dieses neue Konzept dient nicht nur der möglichst schnellen Erfassung der urbanen Expansion in dynamisch wachsenden Städten, sondern ebenfalls der Einbindung lokaler Akteure mithilfe neuartiger Erfassungshilfen. Dazu wird eine Applikation für Tabletcomputer und Smartphones entwickelt, mit der einfach und schnell vor Ort Gebäudeparameter erfasst werden können. Dadurch könnte bei lokalen Akteuren, die bei der Erfassung risikorelevanter Daten mithelfen, ein stärkeres Bewusstsein für Erdbebenrisiko und ein besseres Verständnis der Risikolage der eigenen Gemeinde geschaffen werden. Zwei Pilotprojekte in Griechenland und Japan mit lokalen Experten und Akteuren, darunter die Stadtverwaltungen und Nichtregierungsorganisationen, sind geplant.

Zudem wird ein neues Konzept erarbeitet, in dem die gesamte hier vorgestellte Berechnungskette von Seismizitätsmodellen bis zur Risikoberechnung in einem rein daten- und testbasierten System automatisiert wird, um die zahlreichen ungeprüften Expertenannahmen aus diesen Berechnungen zu eliminieren und nur die Informationen zu verwenden, die in den Beobachtungen enthalten sind. Jede Modellkomponente soll permanent auf ihre Vorhersagequalität getestet werden und ggf. durch bessere Komponenten ersetzt werden. Ferner sollen Komponenten entwickelt werden, die sich dynamisch an die Beobachtung anpassen, um eine verbesserte Vorhersage zu ermöglichen. Das resultierende Gefährdungs- und Risikomodell wird dadurch hochdynamisch sein, da sowohl die Modellkomponenten je nach Testergebnis ausgetauscht werden, als auch alle Vorhersagen sich mit der Dynamik der Erdbebenverteilung sowie der Infrastruktur verändern.

Literatur

- Bach, C., Hainzl, S. (2012): Improving empirical aftershock modeling based on additional source information. - *Journal of Geophysical Research*, 117, B04312.
- Derras, B., Bard, P. Y., Cotton, F. (2014): Towards fully data driven ground-motion prediction models for Europe. - *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12, 1, pp. 495–516.
- Drouet, S., Cotton, F. (2015): Regional Stochastic GMPEs in Low Seismicity Areas: Scaling and Aleatory Variability Analysis—Application to the French Alps. - *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105, 4, pp. 1883–1902.
- Giardini, D., Grünthal, G., Shedlock, K. M., Zhang, P. (1999): The GSHAP global seismic hazard map. - *Annali di Geofisica*, 42, 6, pp. 1225–1230.

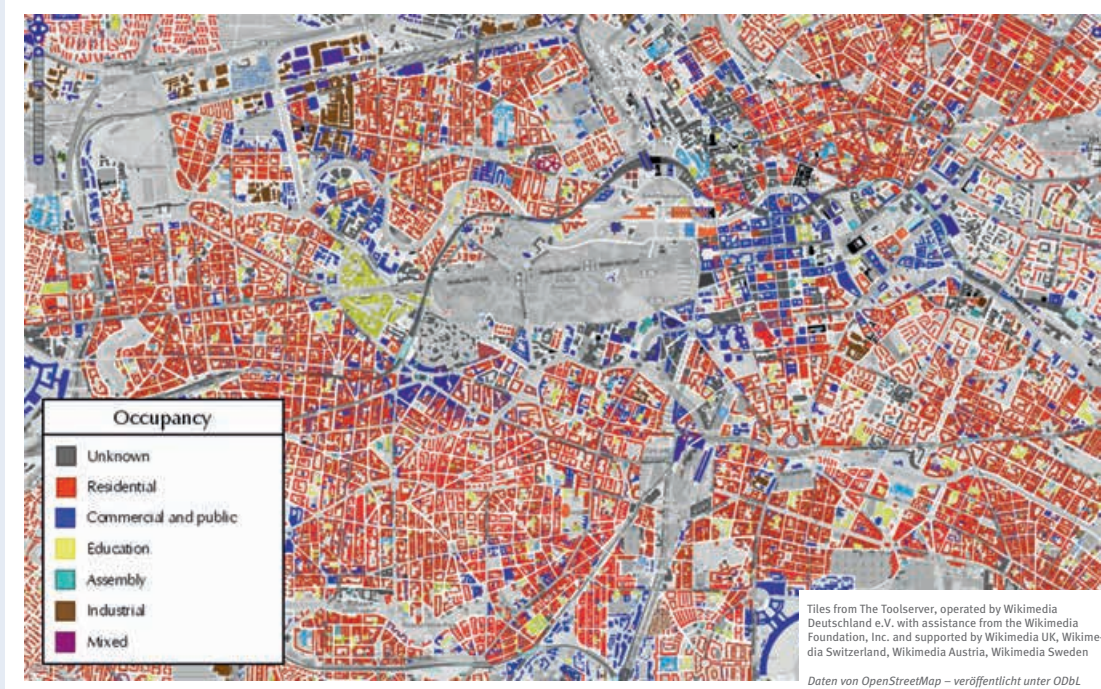


Abb. 3: Aus OpenStreetMap-Daten abgeleitete Gebäudenutzung in Berlin. Die Legende gibt nur eine grobe Klassifizierung wieder.

Fig. 3: Building occupancy types in Berlin derived from OpenStreetMap data. The legend only refers to a rough classification.

- Grünthal, G., Bosse, C., Stromeier, D. (2009): Die neue Generation der probabilistischen seismischen Gefährdungseinschätzung der Bundesrepublik Deutschland: Version 2007 mit Anwendung für die Erdbeben-Lastfälle der DIN 19700:2004-07 „Stauanlagen“, (Scientific Technical Report STR; 09/07), Potsdam: Deutsches GeoForschungszentrum GFZ, 81 p.
- Grünthal, G., Stromeier, D., Heidbach, O. (2013): Probabilistische seismische Gefährdungsabschätzungen. - System Erde, 3, 1, pp. 54–61.
- Hainzl, S., Moradpour, J., Davidsen, J. (2014): Static stress triggering explains the empirical aftershock distance decay. - Geophysical Research Letters, 41, 24, pp. 8818–8824.
- Kotha, S. R., Bindi, D., Cotton, F. (2016): Partially non-ergodic region specific GMPE for Europe and Middle-East. - Bulletin of Earthquake Engineering, 14, 4, pp. 1245–1263.
- Mak, S., Clements, R., Schorlemmer, D. (2015): Validating Intensity Prediction Equations for Italy by Observations. - Bulletin of the Seismological Society of America, 105, 6, pp. 2942–2954.
- Mak, S., Schorlemmer, D. (in press): A comparison between the forecast by the United States National Seismic Hazard Maps with recent ground motion records. - Bulletin of the Seismological Society of America.
- Moradpour, J., Hainzl, S., Davidsen, J. (2014): Nontrivial decay of aftershock density with distance in Southern California. - Journal of Geophysical Research, 119, 7, pp. 5518–5535.
- Schellbach, K., Grünthal, G. (2016): Historische Seismologie – Schlüssel für verlässlichere Daten zur Abschätzung der Erdbebengefährdung. - System Erde, 6, 1, pp. 44–49.
- Schorlemmer, D., Wiemer, S. (2005): Microseismicity data forecast rupture area. - Nature, 434, 7037, p. 1086.
- Schorlemmer, D., Wiemer, S., Wyss, M. (2005): Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes. - Nature, 437, 7058, pp. 539–542.
- Schorlemmer, D., Gerstenberger, M. C. (2007): RELM Testing Center. - Seismological Research Letters, 78, 1, pp. 30–36.
- Schorlemmer, D., Gerstenberger, M. C., Wiemer, S., Jackson, D. D., Rhoades, D. A. (2007): Earthquake Likelihood Model Testing. - Seismological Research Letters, 78, 1, pp. 17–29.
- Schorlemmer, D., Woessner, J. (2008): Probability of Detecting an Earthquake. - Bulletin of the Seismological Society of America, 98, 5, pp. 2103–2117.
- Schorlemmer, D., Mele, F., Marzocchi, W. (2010): A Completeness Analysis of the National Seismic Network of Italy. - Journal of Geophysical Research, 115, B4, B04308.
- Woessner, J., Laurentiu, D., Giardini, D., Crowley, H., Cotton, F., Grünthal, G., Valensise, G., Arvidsson, R., Basili, R., Demircioglu, M. B., Hiemer, S., Meletti, C., Musson, R. W., Rovida, A. N., Sesetyan, K., Stucchi, M. (2015): The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results. - Bulletin of Earthquake Engineering, 13, 12, pp. 3553–3596.
- Zakharova, O., Hainzl, S., Bach, C. (2013): Seismic moment ratio of aftershocks with respect to main shocks. - Journal of Geophysical Research, 118, 11, pp. 5856–5864.