

# Auf dem Weg zur Schadensabschätzung in Echtzeit

## Dezentralisierte regionale und Vor-Ort-Frühwarnung in ACROSS

Stefano Parolai<sup>1</sup>, Tobias Boxberger<sup>1</sup>, Marco Pilz<sup>2</sup>, Dino Bindi<sup>1</sup>, Massimiliano Pittore<sup>1</sup>, Marc Wieland<sup>1</sup>, Kevin Fleming<sup>1</sup>, Michael Haas<sup>1</sup>, Adrien Oth<sup>3</sup>, Claus Milkereit<sup>1</sup>, Torsten Dahm<sup>1</sup>, Jörn Lauterjung<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

<sup>2</sup> Schweizerischer Erdbebendienst (SED), ETH Zürich, Schweiz

<sup>3</sup> European Center for Geodynamics and Seismology, Luxembourg

*The possibility of seismic risk mitigation in high hazard region like Central Asia requires the availability of strong motion recordings. When available also in real time, they can be precious for enabling early warning systems and efficient rapid response procedure. The ACROSS project is implementing the installation of the first real time strong motion network for Central Asia. It offers the opportunity for developing, testing and implementing new methodologies for strong motion data analysis in real time, improving the transfer of knowledge from research to application.*



Trotz technologischer Fortschritte sind der Mensch und insbesondere die Infrastrukturen der technischen Zivilisation auch in heutiger Zeit durch Naturgefahren äußerst verwundbar. Zu den größten Naturgefahren für den Menschen zählen Erdbeben. So war etwa das Erdbeben in Haïti in 2010 mit 222 570 Todesopfern die größte Naturkatastrophe der letzten 35 Jahre (Munich Re, 2015). Erdbeben können nicht vorhergesagt werden, daher stellen Maßnahmen wie erdbebensicheres Bauen und die Installation von Frühwarnsystemen die derzeit einzigen Möglichkeiten dar, das Risiko von Verlusten zu verringern (Wenzel und Zschau, 2014).

Erdbebenfrühwarnsysteme sind momentan nur in Japan, Taiwan und Mexiko operationell. Weitere werden aktuell in Italien, USA (Kalifornien), Rumänien, Israel und Spanien installiert oder vorbereitet. Einen Überblick über existierende Systeme und Frühwarnaktivitäten in Europa gibt Clinton et al. (in press). Der Ansatz der sogenannten Vor-Ort-Frühwarnung zielt darauf ab, mit Hilfe lokal installierter Systeme innerhalb der ersten Sekunden nach einem Beben die nicht schadenbringenden, frühen Primär-(P-)Wellen zu detektieren, bevor die langsameren, schadenbringenden Sekundär-(S-)Wellen eintreffen. Die Entscheidung für eine Alarmierung basierte bis vor kurzem darauf, rasch die Erdbebenquelle und Größe abzuschätzen (Nakamura, 1984) oder die noch zu erwartenden Bodenbewegungen direkt aus den Maximalwerten von bereits in der Vergangenheit gemessenen Bodenverschiebungen abzuschätzen. Innerhalb der letzten zwei Jahrzehnte wurde zudem ein End-to-End-Ansatz vorgeschlagen, bei dem ein Frühwarnsystem alle erforderlichen Schritte von der Gefahrendetektion bis hin zum Bevölkerungsschutz abdeckt. Frühwarnung basiert

heute nicht nur auf der Abschätzung der Bodenbewegungen, sondern auch auf der zu erwartenden Reaktion der Gebäude auf die Bodenbewegung (z. B. Cornell und Krawinkler, 2000; Iervolino, 2011). Diesem Ansatz folgend, werden heute Frühwarnung, Gebäudestrukturanalysen sowie Schadens- und Verlustanalysen mit dem Ziel kombiniert, durch schnelle Warnung der Bevölkerung oder durch Abschaltung kritischer Systeme, z. B. Gasleitungen, Schäden zu minimieren (z. B. Cheng et al., 2014). Dank der Rechenleistung moderner Sensoreinheiten kann dieses Konzept nicht nur systemisch, sondern auf jedem einzelnen Sensor implementiert werden, was die Entwicklung eines dezentralisierten performanzbasierten Frühwarnsystems ermöglicht (Fleming et al., 2009; Picozzi et al., 2010a; Bindi et al., 2015; Parolai et al., 2015).

## ACROSS – Echtzeit-Messnetz für Zentralasien

Im Jahr 2013 initiierte das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ im Rahmen der Helmholtz-Investition „ACROSS, Advanced Remote Sensing – Ground Truth Demo and Test Facilities“ die Installation des ersten regionalen Echtzeit-Messnetzes in Zentralasien. In der tektonisch sehr aktiven Region ereigneten sich in der Vergangenheit starke Erdbeben (z. B. Verny 1887, Mw=7,3; Kemin 1911, Mw=8,0). Dass bei diesen Erdbeben trotz der großen Magnituden nur verhältnismäßig geringe Verluste von einigen hundert Todesopfern auftraten, war vor allem auf die geringe Bevölkerungsdichte zurückzuführen. Selbst die größte Stadt der Region (Almaty, früher Verny, Kasachstan) hatte zu dieser Zeit nur rund 30 000 Einwohner. Eine Wiederholung solcher Beben hätte heute aufgrund der Bevölkerungskonzentration in den Ballungsräumen (z. B. Bischkek, Kirgisistan, mit rund einer Million und Almaty mit fast zwei Millionen Einwohnern) katastrophale Folgen.

Die Installation eines Echtzeit-Messnetzes in dieser seismisch hoch gefährdeten Region (Abb. 1) kann existierende Lücken in der seismischen Überwachung schließen und schafft die Grundlage für ein erstes regionales Erdbebenfrühwarnsystem in Zentralasien.

Die Netzwerkkonfiguration wurde mit Blick auf Verlustminimierung optimiert, wobei die Detektionszeit von Erdbeben minimiert (Stankiewicz et al., 2013; 2015) und die Möglichkeiten bereits installierter Vor-Ort-Frühwarnsysteme (Bischkek) berücksichtigt wurden (Boxberger et al., 2013; Bindi et al., 2015). Die Standorte der Instrumente wurden unter Beachtung der Infrastrukturbedingungen in enger Zusammenarbeit mit lokalen Partnern wie dem ZAIAG (Zentralasiatisches Institut für angewandte Geowissenschaften in Bischkek) sowie den als Partner neugewonnenen Ministerien für Notfallsituationen

*Links: Jede Sekunde zählt – Zentralasien hat eine bewegte Vergangenheit, nicht nur tektonisch, auch politisch und ökonomisch. Dies wird deutlich, wenn man auf den äußerst heterogenen Gebäudebestand blickt, wie hier in Bischkek. Um dem hohen seismischen Risiko entgegenzutreten, werden Strukturen für ein Erdbeben-Frühwarnsystem in der Region aufgebaut, das im Ernstfall wertvolle Sekunden vor Eintreffen der schadenbringenden Erdbebenwellen warnt. (Foto: D. Bindi, GFZ)*

*Every second counts – Central Asia has a strained past, not just tectonically but also politically and economically. This can easily be seen also from the very heterogeneous building stock as here in Bishkek. To mitigate the high seismic risk scientists are continuously working on creating the infrastructure for an Earthquake Early Warning System that can yield precious seconds of warning ahead of the arrival of damaging seismic waves.*



**Kontakt:** S. Parolai  
(parolai@gfz-potsdam.de)

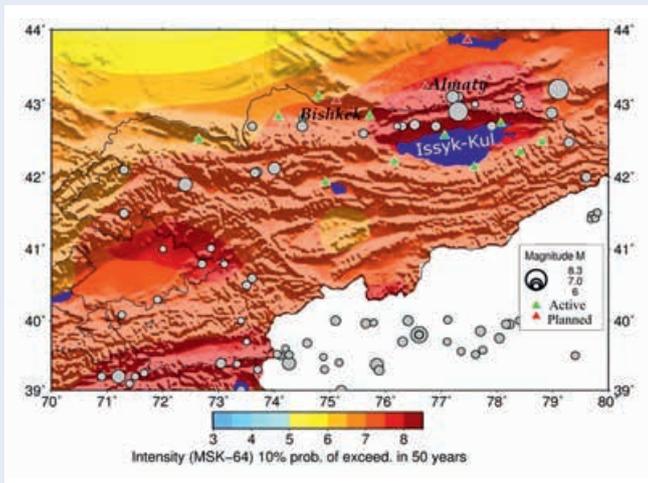


Abb. 1: Probabilistische seismische Gefährdung Kirgisistans und angrenzender Länder. Installierte (grüne Dreiecke) und geplante (rote Dreiecke) Stationen des ACROSS-Netzwerks. Grau gefüllte Kreise markieren Erdbeben mit einer Magnitude größer 6.

Fig. 1: Probabilistic seismic hazard in Kyrgyzstan and neighboring countries, already installed (green triangles) and planned (red triangles) for ACROSS network. Grey circles indicate the position of earthquakes with magnitude larger than 6.

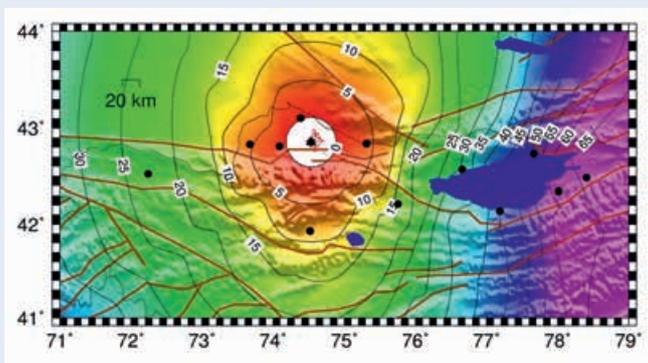


Abb. 2: Theoretische Alarmzeit (schwarze Linien, in Sekunden) durch Kombination des regionalen ACROSS-Netzwerks und des DOSEW-Systems (schwarze Punkte) für Bishkek, Kirgisistan. Ereignisse, die innerhalb des weißen Arealis geschehen, sind zu nahe, um einen Alarm vor dem Eintreffen der S-Wellen auszulösen.

Fig. 2: Theoretical alarm time (black lines) for a location in Bishkek, Kyrgyzstan, while considering the joint information coming from the regional ACROSS network and the DOSEW system (black dots). Events occurring in the white area would be too close to the site to trigger an alarm before the arrival of S-waves.

in Kirgisistan und Kasachstan ausgewählt. Beispielhaft für Bishkek zeigt Abb. 2 die aus der Datenanalyse des ACROSS-Netzwerks und einem existierenden Vor-Ort-Frühwarnsystem resultierende theoretische Alarmzeit. Die theoretische Alarmzeit ist die Zeit zwischen dem Alarm, der durch die P-Wellen eines Erdbebens (auf den in Abb. 2 gezeigten Isochronen) ausgelöst wurde, und dem Zeitpunkt des Eintreffens der S-Wellen. Für Erdbeben, z. B. am Issyk-Kul (See südlich von Almaty, vgl. Abb. 1) ermöglicht das System Alarmzeiten von 25 bis 60 Sekunden für Bishkek. Seismische Ereignisse innerhalb des weißen Gebiets auf Abb. 2 (alarmfreie Zone) wären zu nahe am Zielort, um einen Alarm auszulösen, bevor die S-Wellen eintreffen. *Parolai et al. (2015)* zeigen aber, dass diese Zone sich im Falle eines dezentralisierten Frühwarnsystems (DOSEW) erheblich verkleinert, wenn statt der Ankunftszeit der S-Wellen die Zeit bis zum Eintritt von ersten Gebäudeschäden berücksichtigt wird.

Die Messdaten aus dem ACROSS-Netzwerk werden am GFZ und am ZAIAG in Echtzeit automatisch visualisiert und analysiert; die wichtigsten Parameter werden daraus extrahiert und alle Daten werden in einer offen zugänglichen Datenbank abgelegt.

## Technische Neuerungen und Methodenentwicklung für ACROSS

Ergebnisse von GFZ-Projekten im Rahmen des EU-FP6 SAFER (Seismic eArly warning For EuRope) und des deutschen EDIM (Earthquake Disaster Information system for Marmara Region, Türkei) führten in Zusammenarbeit mit der Fakultät für Informatik der Humboldt-Universität Berlin zur Entwicklung der drahtlosen Sensoreinheit SOSEWIN (Self Organising Seismic Early Warning Information Network, *Fleming et al., 2009*). SOSEWIN-Einheiten bestehen aus Standardkomponenten und ermöglichen ein dezentralisiertes, selbst organisierendes, kabelloses Netzwerk, in dem jede Einheit unabhängig Messdaten analysiert. Diese Einheiten und deren Nachfolgemodell MPwise (Abb. 3) werden in verschiedenen Projekten eingesetzt. Zum Beispiel wurde das SOSEWIN-System im Rahmen des kürzlich abgeschlossenen REAKT-Projekts an mehreren Teststandorten, so beispielsweise in einem Krankenhaus in Thessaloniki, Griechenland, in einem Wohnhaus in Istanbul, Türkei, sowie in mehreren Gebäuden in Bishkek installiert.

Die nun in ACROSS durchgeführte Erweiterung der SOSEWIN-Einheiten für Multiparameterregistrierungen ermöglicht eine Erdrutschfrühwarnung und -überwachung, seismische Arraymessungen, Erfassung von Gebäudedaten und Ereignissen nach einem Erdbeben. Die drahtlos kommunizierenden Multi-



Abb. 3: MPwise-Einheit mit einer Demonstration der DOSEW-Software (Parolai et al., 2015)

Fig. 3: MPwise unit with a demonstration of the DOSEW software (Parolai et al., 2015)

parametersensoreinheiten MPwise werden dabei im Vergleich zum Vorgängermodell SOSEWIN durch folgende Funktionen ergänzt:

- Datenerfassung mit unterschiedlichen Sensoren für starke Bodenbewegung, Geschwindigkeit der Bodenbewegung, Temperatur und Luftfeuchtigkeit, sowie mit Mikrosystemen (MEMS), Kameras und preiswerten GNSS-Receivern,
- Datenübermittlung über LAN- und UMTS-Kommunikationsprotokolle sowie
- Auslösung von Alarmen (z. B. Sirenen) durch eine dezentralisierte, am GFZ entwickelte Software (Parolai et al., 2015).

Das GFZ hat gemeinsam mit der Firma Gempa, einer Ausgründung des GFZ, ein neues Verfahren und eine Software für dezentralisierte Erdbebenfrühwarnung entwickelt, die in Echtzeit auf den bereits installierten SOSEWIN- und MPwise-Einheiten (Parolai et al., 2015; Bindi et al., 2015) sowie auf den ACROSS-Sensoren läuft. Dieses Verfahren erhöht die Zuverlässigkeit des Systems, da das Auslösen des Alarms nicht primär auf der Detektion von Ereignissen, sondern auf der daraus vorhergesagten Bodenbewegung von S-Wellen beruht. Da gebäudetyabhängige Relationen zwischen Bodenbewegung und Gebäudeschäden auf jedem Sensorknoten verfügbar sind und somit für die dezentralisierte Echtzeitanalyse verwendet werden können, liefert die Software direkt auf dem Knoten eine auf den laufenden P-Wellenaufzeichnungen basierende erste Abschätzung des zu erwartenden Schadens (Bindi et al., 2015).

Abbildung 4 veranschaulicht beispielhaft die Ergebnisse einer Anwendung der Software auf Aufzeichnungen eines Bebens der Magnitude 7,2, das sich in 14,5 km Entfernung von der aufzeichnenden Station in Japan ereignet hat. Die Station würde auch im Falle von so geringen Entfernungen zum Epi-

zentrum (hier etwa 12,1 km) einen Alarm über eine Sekunde vor der schadenswirksamen Erschütterung auslösen. Trotz der Kürze reicht diese Zeit aus, um automatische Maßnahmen zu ergreifen (z. B. Sicherung von Pipelines) und die Zahl der verletzten Personen in einer speziell für diesen Katastrophenfall geschulten Bevölkerung zu reduzieren.

## Neue Generation von Frühwarnsystemen

Die schnelle Verfügbarkeit von Erdbebeninformationen und die Aufzeichnung der resultierenden Bodenbewegung in Echtzeit ermöglichen es, die Abschätzung der Folgen und eventueller Verluste mit einem Frühwarnsystem zu verbinden. Ein Alarm wird dann aufgrund des berechneten Ausmaßes der Bodenbewegung an einem Ort ausgelöst. Darüber hinaus schätzen moderne Systeme auch die mögliche räumliche Verteilung der Verluste ab.

Das am GFZ entwickelte Software-System CARAVAN, das sich aktuell in der Testphase befindet, ermöglicht eine Abschätzung der zu erwartenden Intensität der Bodenbewegung und deren Folgen in Form menschlicher Verluste, und zwar unmittelbar, nachdem globale seismische Messnetze (z. B. GEOFON des GFZ) erste Herdparameter eines Bebens berechnet haben. Derzeit stellt das System erst nach Ankunft der Erdbebenwellen am Standort die für das Katastrophenmanagement wichtige Verlustabschätzung bereit. Weitere Entwicklungsarbeiten sollen es ermöglichen, die Echtzeitdaten des ACROSS-Messnetzes in CARAVAN zu integrieren und so ein verlustbasiertes Frühwarnsystem für stark gefährdete Regionen zur Verfügung zu stellen.

Zusätzlich zur Fast-Echtzeit-Abschätzung menschlicher Verluste kann CARAVAN über ein webbasiertes, multilinguales Interface auf eine Nutzeranfrage hin Verlustrechnungen für historische oder hypothetische Ereignisse durchführen.

## Ausblick

Mit dem Einsatz dezentralisierter Frühwarnsysteme können die Alarmzeiten vergrößert werden. Zudem können durch verbesserte Berechnungsmethoden und durch die Berücksichtigung von Gebäudeparametern Fehlalarme reduziert werden. Des Weiteren ermöglichen es Systeme wie CARAVAN, bereits kurze Zeit nach einem Ereignis eventuelle Schäden abzuschätzen. Der Schritt hin zu verlustbasierten Frühwarnsystemen stellt trotz der hier beschriebenen Fortschritte eine große Herausforderung dar und es sind weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu dezentralisierten Frühwarnsystemen nötig. Zudem sollen die Frühwarnsysteme für multiple Gefahrenquellen weiterentwickelt werden; hierzu wird im Rahmen von CARAVAN derzeit die Integration von Verlustabschätzungen für erdbebeninduzierte Hangrutschungen getestet.

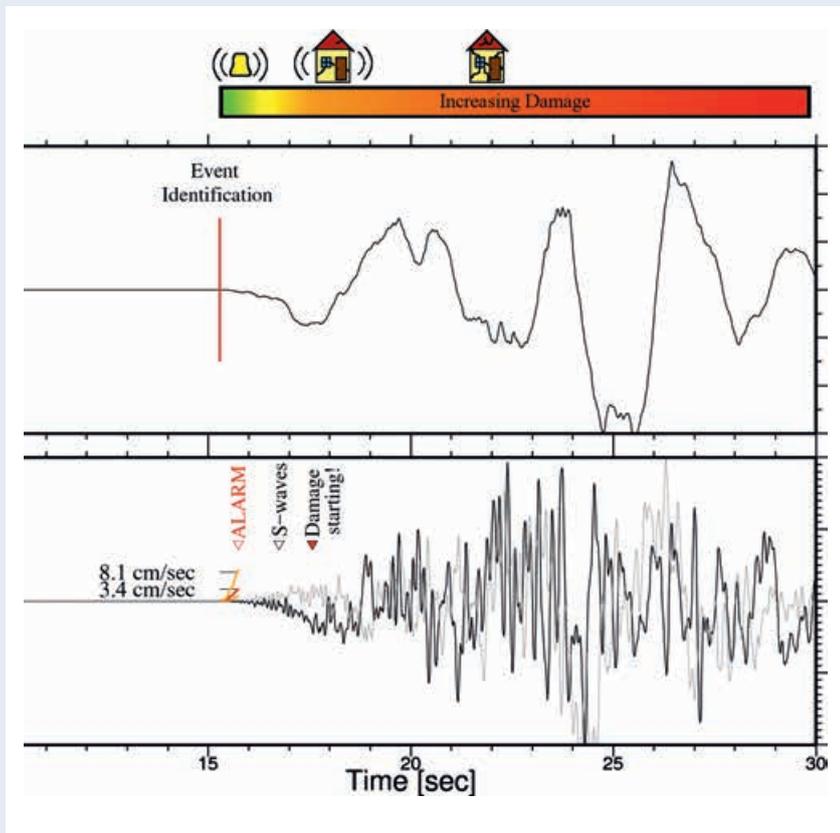


Abb. 4: Oben: Aus der Aufzeichnung starker Bodenbewegung und Identifikation der P-Wellenankunft (rote Linie) bestimmter Bodenversatz. Unten: Horizontale Komponenten (Nord-Süd und Ost-West) der aufgezeichneten Geschwindigkeit (schwarze und graue Linie) und die aus dem kurz nach Identifikation der P-Wellenankunft aufgezeichneten Bodenversatz geschätzten Geschwindigkeiten (gelb und orange). Die berechneten Werte überschreiten die für eine Alarmierung festgelegten Schwellwerte (Zahlen über Aufzeichnung bzw. kurze graue Linien) weniger als eine Sekunde nach der P-Wellenankunft, kurz vor Ankunft der S-Wellen und vor Eintreten der ersten Schäden am Gebäude.

Fig. 4: Top: Ground displacement estimated from the strong motion recording and identification of P-wave arrival (red line). Bottom: Horizontal components (North-South and East-West) of the recorded velocity (black and gray line), and the forecasted estimation of their velocities (yellow and orange) using the displacement values just after the P-wave arrival identification. The estimated values are overstepping pre-fixed thresholds (numbers above the recording/ short grey lines) less than one second after the P-wave arrival identification, just before the S-wave arrival and before the structure experiences damage.

Realisierung, Unterhalt und effiziente Nutzung von Infrastrukturen wie ACROSS lassen sich nur in enger Kooperation mit den lokalen Partnern aus Wissenschaft und Behörden umsetzen. Während die Kooperation mit ZAIAG eine erfolgreiche technische Umsetzung ermöglicht, garantiert die enge Zusammenarbeit mit dem kirgisischen Ministerium für Notfallsituationen (vgl. Rubrik „Netzwerk“, Internationale Zusammenarbeit des GFZ, S.85) die nachhaltige Nutzung der Infrastruktur.

Im Rahmen der über viele Jahre gebildeten lokalen Netzwerke soll in Zukunft die in Zentralasien aufgebaute Infrastruktur als Entwicklungs- und Testumgebung für zukunftsweisende Multi-Hazard-Echtzeitanwendungen genutzt werden und mit den lokalen Partnern daran gearbeitet werden, Erkenntnisse aus der Forschung in die Praxis zu übertragen und technologisch sowie methodisch weiterzuentwickeln. Zudem ist es das Ziel, die Entscheidungsträger dabei zu unterstützen, mit Hilfe der Technologien das Risikobewusstsein in der Bevölkerung zu verbessern und so zu einer effizienten Risikominimierung beizutragen.

## Literatur

- Bindi, D., Boxberger, T., Orunbaev, S., Pilz, M., Stankiewicz, J., Pittore, M., Iervolino, I., Ellguth, E., Parolai, S. (2015): On-site early-warning system for Bishkek (Kyrgyzstan). - *Annals of Geophysics*, 58, 1, So112.
- Boxberger, T., Pilz, M., Orunbaev, S., Pittore, M., Fleming, K., Milkereit, C., Parolai, S., Bindi, D. (2013): Noch Sekunden bis zu Erschütterung: ein Erdbebenfrühwarnsystem für Bischkek. - *System Erde*, 3, 2, pp. 18–23.
- Cheng, M. H., Wu, S., Heaton, T. H., Beck, J. L. (2014): Earthquake early warning application to buildings. - *Engineering Structures*, 60, pp. 155–164.
- Clinton, J., Zollo, A., Marmureanu, A., Zulfikar, C., Parolai, S. (in press): State-of-art and future of EEW applications in Europe. - *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Cornell, C. A., Krawinkler, H. (2000): Progress and challenges in seismic performance assessment. - *Peer Center Newsletter*, 3, 2, pp. 1–4.
- Fleming, K., Picozzi, M., Milkereit, C., Kühnlenz, F., Lichtblau, B., Fischer, J., Zulfikar, C., Özel, O., SAFER and EDIM working groups (2009): The Self-organizing Seismic Early Warning Information Network (SOSEWIN). - *Seismological Research Letters*, 80, 5, pp. 755–771.
- Iervolino, I. (2011): Performance-based earthquake early warning. - *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 2, pp. 209–222.

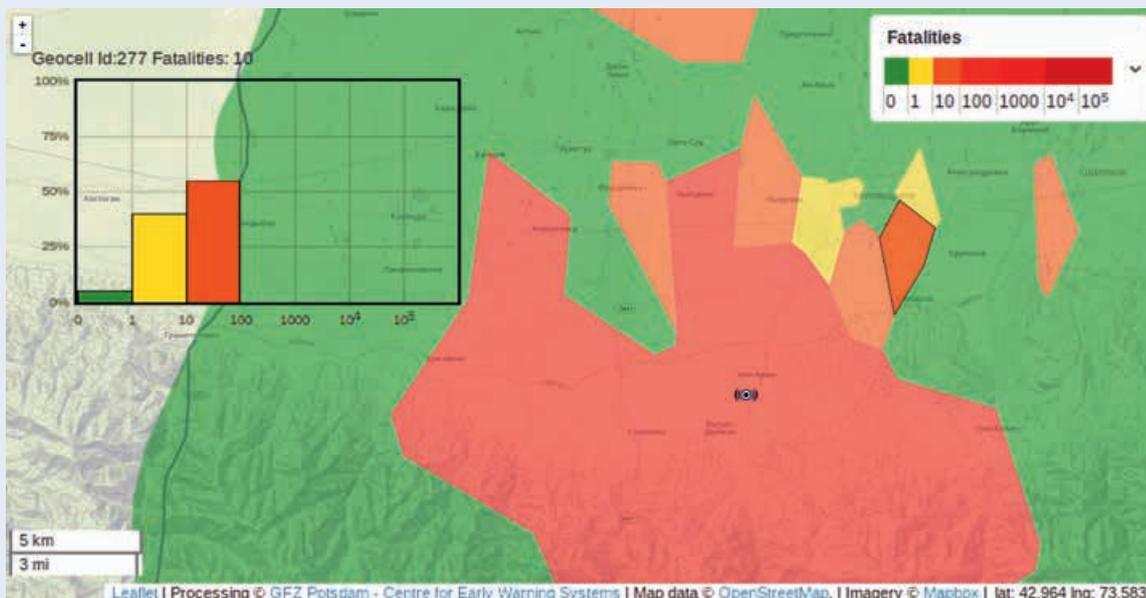


Abb. 5: Beispiel einer mit CARAVAN abgeschätzten Verteilung von Todesfällen für eine Wiederholung des Belovodosk-Kirgizstan-Bebens von 1885 (schwarzer „vibrierender“ Marker) mit  $M_w=6,8$ . Die Farben der mit der Bevölkerungsdichte skalierten Geozellen repräsentieren den wahrscheinlichsten Wert für die Größenordnung (Zehnerpotenzen) der zu erwartenden Todesfälle pro Zelle. Oben links beispielhaft die Verteilung für eine orange (10 bis 100) eingefärbte Zelle (schwarze Umrahmung)

Fig. 5: Example of a loss assessment distribution for a repetition of the  $M_w=6.8$  Belovodosk, Kyrgyzstan event (black “vibrating” marker) estimated by CARAVAN. Losses are in terms of fatalities, where the colors of the geocells, whose size depend on population density, indicate the most probable magnitude (powers of 10) of expected fatalities for each geocell. The distribution for an orange (10 to 100) cell (black contoured) is shown in the upper left corner.

- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Geo Risks Research, NatCat-SERVICE (2015): Loss events worldwide 1980-2014: 10 deadliest events, verfügbar unter [https://www.munichre.com/site/touch-naturalhazards/get/documents\\_E-1260878433/mr/assetpool.shared/Documents/5\\_Touch/\\_NatCatService/Significant-Natural-Catastrophes/2014/10-deadliest-events-worldwide.pdf](https://www.munichre.com/site/touch-naturalhazards/get/documents_E-1260878433/mr/assetpool.shared/Documents/5_Touch/_NatCatService/Significant-Natural-Catastrophes/2014/10-deadliest-events-worldwide.pdf)
- Nakamura, Y. (1984): Development of earthquake early-warning system for the Shinkansen, some recent earthquake engineering research and practical in Japan. – In: The Japanese National Committee of the International Association for Earthquake Engineering, pp. 224–238.
- Parolai, S., Bindi, D., Boxberger, T., Milkereit, C., Fleming, K., Pittore, M. (2015): On Site Early Warning and Rapid Damage Forecasting Using Single Stations: Outcomes from the REAKT Project. - Seismological Research Letters, 86, 5, pp. 1393–1404.
- Picozzi, M., Milkereit, C., Parolai, S., Jaeckel, K.-H., Veit, I., Fischer, J., Zschau, J. (2010): GFZ Wireless Seismic Array (GFZ-WISE), a Wireless Mesh Network of Seismic Sensors: New Perspectives for Seismic Noise Array Investigations and Site Monitoring. - Sensors, 10, 4, pp. 3280–3304.
- Stankiewicz, J., Bindi, D., Oth, A., Parolai, S. (2013): Designing efficient earthquake early warning systems: case study of Almaty, Kazakhstan. - Journal of Seismology, 17, 4, pp. 1125–1137.
- Stankiewicz, J., Bindi, D., Oth, A., Parolai, S. (2015): Toward a cross-border early-warning system for Central Asia. - Annals of Geophysics, 58, 1, S0111.
- Wenzel, F., Zschau, J. (Eds.) (2014): Early Warning for Geological Disasters: Scientific Methods and Current Practice, (Advanced Technologies in Earth Sciences), Berlin [u. a.]: Springer, 379 p.