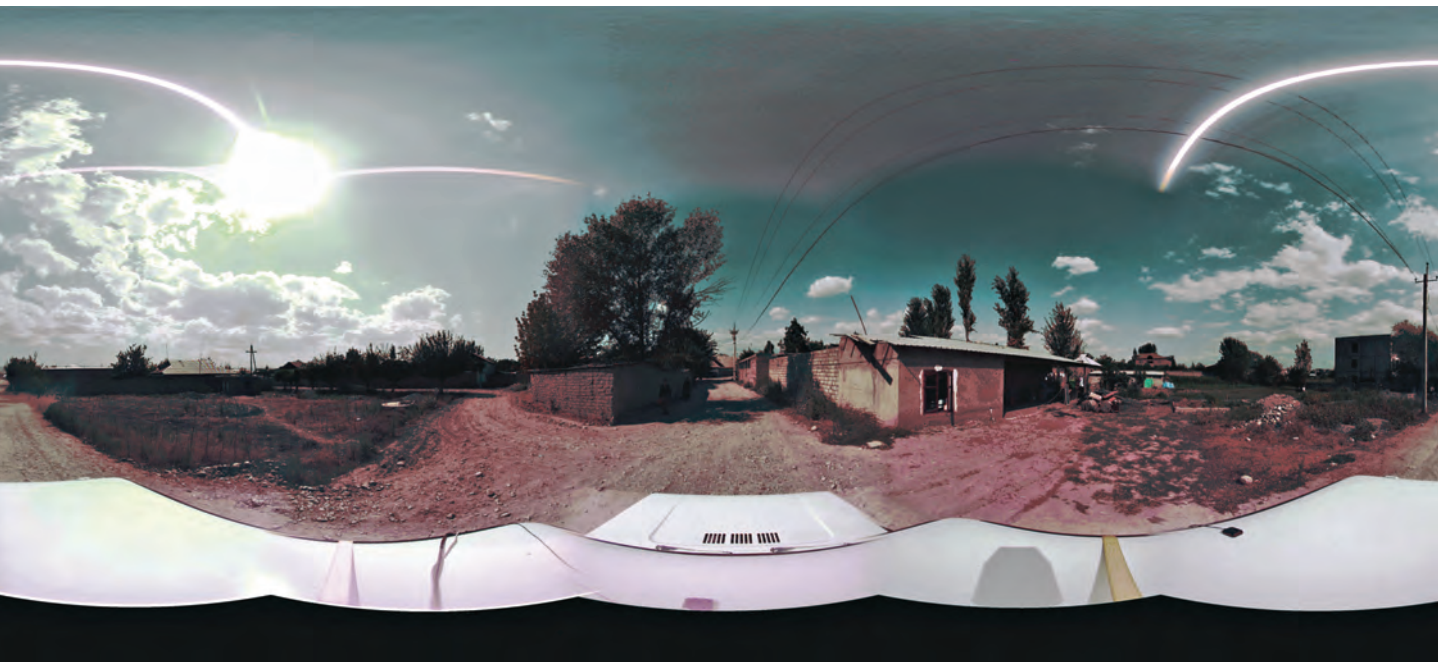


# Risikoanalysen in Zentralasien

*Massimiliano Pittore, Marc Wieland, Dino Bindi, Shahid Ullah, Marco Pilz, Kevin Fleming, Stefano Parolai  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam*

*The threat to human society arising from earthquakes should never be underestimated, especially in those regions of the world more exposed to this natural hazard. The complex geodynamics of Central Asia make it a natural research laboratory for the geoscience community, but also present a source of serious concern for local populations and their administrations who have already dealt with the devastating consequence of earthquakes in the past. Evaluating expected seismic risk for the exposed communities is a great challenge that calls for a strong, unified effort by researchers and decision makers. The nature of this challenge requires holistic, multidisciplinary approaches and the development of innovative solutions and methodologies, especially in countries where few resources are available for disaster prevention and mitigation. Within several projects the GFZ Centre for Early Warning currently focuses on different components of risk in Central Asia. This article, therefore, provides a brief overview of these research activities, along with a description of an application in the framework of Early Warning and Rapid Response.*



*Omnidirektionale Kameraaufnahme des Gebäudebestands in Osh, Kirgisistan*

*Omnidirectional camera survey of the building stock in Osh, Kyrgyzstan*

Die Länder Zentralasiens (Kasachstan, Kirgisistan, Tadschikistan und Turkmenistan) teilen nicht nur eine lange und faszinierende kulturelle Geschichte, sondern auch einen hohen Grad an Exposition gegenüber seismischer Gefährdung und anderen Naturgefahren, wie beispielsweise Überschwemmungen oder gravitativen Massenbewegungen.

Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ ist an mehreren Projekten im Bereich der Katastrophenvorsorge in Zentralasien beteiligt. Das vom GFZ koordinierte Projekt EMCA (Erdbebenmodell Zentralasien), eine regionale Komponente des Projekts GEM (Globales Erdbebenmodell), zielt darauf ab, eine umfassende und grenzüberschreitende Risikoanalyse der gesamten Region durchzuführen. Die Forschungsgruppe des GFZ kann hierbei auf einer langjährigen Kooperation mit lokalen Instituten aufbauen und verwendet bei seiner Arbeit globale Standards, Werkzeuge und Ansätze, welche im Rahmen des GEM-Projekts entwickelt werden. Auch PROGRESS (Potsdam Research Cluster for Georisk Analysis, Environmental Change and Sustainability) befasst sich mit seismischen Risikoanalysen, wobei der Fokus hierbei auf der Expositionsanalyse im weiteren Kontext von Frühwarnsystemen liegt. Das kürzlich gestartete, am GFZ koordinierte EU-Projekt SENSUM (Framework to integrate Space-based and in-situ sENSing for dynamic vUlnerability and recovery Monitoring) befasst sich mit der Optimierung von Verwundbarkeitsanalysen und der Überwachung von Regenerierungsprozessen nach einem Erdbeben durch die Anwendung von Fernerkundung sowie räumlich-zeitlichem Informationsmanagement.

## Risiko verstehen

Seismisches Risiko beschreibt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines bestimmten Schadensausmaßes an einem bestimmten Ort und innerhalb eines definierten Zeitraums als Ergebnis eines seismischen Ereignisses. Nach dieser Definition werden drei grundlegende Risikokomponenten unterschieden: Gefährdung, Exposition und Verwundbarkeit. Die Gefährdung beschreibt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines bestimmten Grads an Bodenbewegung an einem bestimmten Ort innerhalb eines definierten Zeitraums. Exposition umfasst die Elemente (Gebäude, Bevölkerung, Infrastruktur), die der Bodenbewegung ausgesetzt sind, und Verwundbarkeit beschreibt die Schadensanfälligkeit der exponierten Elemente bei einem bestimmten Grad an Bodenbewegung.

Es ist wichtig die einzelnen Komponenten separat zu behandeln, um eine realistische Einschätzung der potenziellen Konsequenzen eines Erdbebens zu ermitteln. Diese Information ist von

besonderem Interesse für Entscheidungsträger in der Katastrophenvorsorge, da sie es ermöglicht, verfügbare Ressourcen gezielter einzusetzen und effiziente Präventions- und Reduktionsmaßnahmen zu ergreifen. Seismische Gefährdungsmodelle werden als Grundlage für die Entwicklung von Baustandards für erdbebensicheres Bauen verwendet und generell dafür genutzt, die seismische Gefährdung innerhalb verschiedener Stadien der Stadtentwicklung zu berücksichtigen. Ein detailliertes Inventar der exponierten Elemente und deren Verwundbarkeit ist hingegen essentiell für verlässliche Abschätzungen potenzieller Verluste im Sinn von Gebäudeschäden, menschlichen Verlusten oder wirtschaftlichen Schäden. Diese Abschätzungen können wiederum als Entscheidungsbasis für spezifische Vorsorgemaßnahmen, wie beispielsweise die seismische Umrüstung von Schulen, Krankenhäusern oder Wohnhäusern verwendet werden.

Jeder Schritt einer Risikoanalyse ist mit Unsicherheiten verbunden. Manche sind von aleatorischer Natur, das heißt, sie reflektieren die natürliche Variabilität des physikalischen Phänomens; andere Unsicherheiten sind epistemischer Natur, was sich auf das wissenschaftliche und technische Wissen bezieht, welches den Modellen zugrunde liegt. Während aleatorische Unsicherheiten nicht reduziert werden können, lassen sich epistemische Unsicherheiten durch eine bessere Datengrundlage und verbesserte Modelle reduzieren. Im Kontext der Katastrophenvorsorge kommt es darauf an, alle diese Unsicherheiten zu berücksichtigen, um verlässliche Risikoabschätzungen zu ermöglichen und eine vertrauensvolle Basis für die Kommunikation zwischen wissenschaftlichen Institutionen und Verantwortungsträgern zu schaffen.

## Seismische Gefährdungsanalyse

Zentralasien zählt weltweit zu den Regionen mit der höchsten seismischen Gefährdung. Erste Ansätze für eine seismische Zonierungskarte reichen zurück bis ins Jahr 1933. Nach dem Zerfall der Sowjetunion und der langsamen Öffnung der Region gab es erste Ansätze für eine einheitliche, verbesserte, wahrheitsbasierte Gefährdungsanalyse für Zentralasien. Zwischen 1991 und 1997 wurde vom GFZ, als Beitrag zu GSHAP (Global Seismic Hazard Assessment Program), eine neue seismische Zonierung Nordeurasiens realisiert (GFZ-97). In dieser Studie wurde die probabilistische Gefährdung für Zentralasien in Intensitätswerten ermittelt und dann in maximale Bodenbeschleunigung (PGA) konvertiert (Ulomov, 1999).

Im Rahmen von EMCA werden unter Federführung des GFZ neue seismische Gefährdungsanalysen für Zentralasien auf Basis



Kontakt: M. Pittore  
(pittore@gfz-potsdam.de)

der Intensitätsskala MSK64 durchgeführt. Die für die Region entwickelten Gleichungen für die räumliche Verteilung der makroseismischen Intensität (Bindi et al., 2011) wurden dafür verwendet, die Wahrscheinlichkeit der Überschreitung jedes Intensitätswerts über eine fixe Zeitperiode zu ermitteln. Die Analysen basieren auf Untersuchungen vergangener seismischer Ereignisse; dies umfasst Informationen, die für verschiedene Orte verfügbar sind, ohne dabei weitere *A-priori*-Annahmen über die seismische Zonierung zu treffen. Das erlaubt es, den Einfluss der seismischen Zonierung zu überprüfen, wenn standardmäßige wahrnehmlichkeitsbasierte seismische Gefährdungsanalysen (PSHA) angewendet werden. Der entsprechende Katalog seismischer Ereignisse wurde im Rahmen des EMCA-Projekts vom nationalen Datenzentrum Kasachstans in Almaty (KNDC) erstellt. Abb.1 zeigt die aus dem Projekt resultierende Gefährdungskarte mit Intensitäten für eine Wiederholperiode von 475 Jahren (10 % Wahrscheinlichkeit der Überschreitung in 50 Jahren). Die Karte unterstreicht die hohe Gefährdung der Region, insbesondere in Kirgisistan (Intensität VII), Tadschikistan (Intensitäten VIII und IX), dem westlichen Teil der Gazli-Region in Usbekistan (VIII und IX) und dem westlichen Turkmenistan (Intensitäten VIII und IX nahe Aschgabat).

## Modellierung des exponierten Gebäudebestands

Mit einer sogenannten Expositionsanalyse kann das Inventar von Gebäudetypen einer Stadt erfasst werden, inklusive ihrer strukturellen Merkmale, Anzahl und räumlicher Verteilung. Dies ist eine wichtige Grundlage für die seismische Risikoanalyse. Angesichts hoher Urbanisierungsraten und zunehmend wachsender räumlich-zeitlicher Dynamik in vielen Städten, ist es lokalen Verantwortungsträgern oft nicht möglich, den exponierten Gebäudebestand zu quantifizieren. Um eine harmonisierte regionale Beschreibung der geläufigsten Gebäudetypen für Zentralasien zu ermitteln und einen Wissenstransfer im Bereich der Expositions- und Verwundbarkeitsanalyse zu befördern, hat das GFZ im April 2013 einen Workshop in Bischkek am Zentralasiatischen Institut für angewandte Geowissenschaften (ZAIAG) organisiert. Der Workshop brachte Expertinnen und Experten aus dem Projekt EMCA aus Kirgisistan, Tadschikistan, Usbekistan, Turkmenistan und Kasachstan zusammen mit internationalen Expertinnen und Experten des Projekts GEM. Existierende Gebäudetypen der verschiedenen Länder wurden ausgewertet und repräsentative Gebäudetypklassen ermittelt, die durch detaillierte strukturelle Gebäudemerkmale

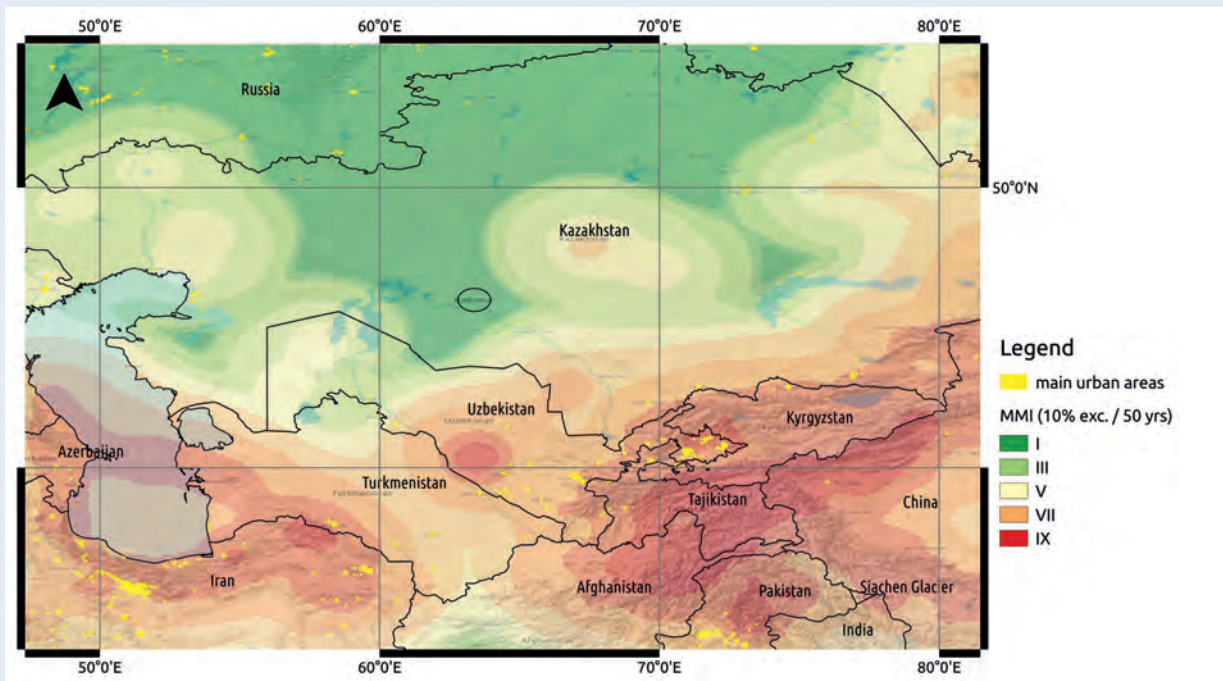


Abb. 1: Seismische Gefährdung in Zentralasien, modelliert nach dem Ansatz der geglätteten Seismizität. Verteilung der makroseismischen Intensität (MMI) mit 10 % Wahrscheinlichkeit der Überschreitung in 50 Jahren. Die urbanen Zentren sind gelb markiert.

Fig. 1: Seismic hazard in Central Asia modeled after the smoothed seismicity approach. Distribution of Macroseismic Intensity (MMI) with 10 % exceedance probability in 50 years. The areas with a higher degree of urbanization are shown marked in yellow.

Tab. 1: Identifizierte Gebäudetypen in Zentralasien und deren Beschreibung auf unterschiedlichen Detailebenen

Tab. 1: Proposed two-levels description of buildings stock in Central Asia

| code   | Description                              | subcode | Description  |
|--------|--|---------|--|
| EMCA-1 | Load bearing masonry wall buildings      | 1.1     | Unreinforced masonry - buildings with walls of brick masonry, stone, or blocks in cement or mixed mortar (no seismic design) - wooden floors           |
|        |  | 1.2     | Unreinforced masonry - buildings with walls of brick masonry, stone, or blocks in cement or mixed mortar (no seismic design) - precast concrete floors |
|        |  | 1.3     | Confined masonry   |
|        |  | 1.4     | Masonry with seismic provisions (e.g. seismic belts)   |
| EMCA-2 | Monolithic reinforced concrete buildings | 2.1     | Buildings with monolithic concrete moment frames   |
|        |  | 2.2     | Buildings with monolithic concrete frame and shear walls (dual system)   |
|        |  | 2.3     | Buildings with monolithic concrete frames and brick infill walls   |
|        |  | 2.4     | Buildings with monolithic reinforced concrete walls  |
| EMCA-3 | Precast concrete buildings               | 3.1     | Precast concrete large panel buildings with monolithic panel joints - Seria 105  |
|        |  | 3.2     | Precast concrete large panel buildings with panel connections achieved by welding of embedment plates - Seria 464                                      |
|        |  | 3.3     | Precast concrete flat slab buildings (consisting of columns and slabs) - Seria KUB   |
|        |  | 3.4     | Prefabricated RC frame with linear elements with welded joints in the zone of maximum loads or with rigid walls in one direction - Seria 111, IIS-04   |
| EMCA-4 | Non-engineered earthen buildings         | 4       | Buildings with adobe or earthen walls  |
| EMCA-5 | Wooden buildings                         | 5.1     | Buildings with load-bearing braced wooden frames   |
|        |  | 5.2     | Building with a wooden frame and mud infill  |
| EMCA-6 | Steel buildings                          | 6       | Steel buildings  |

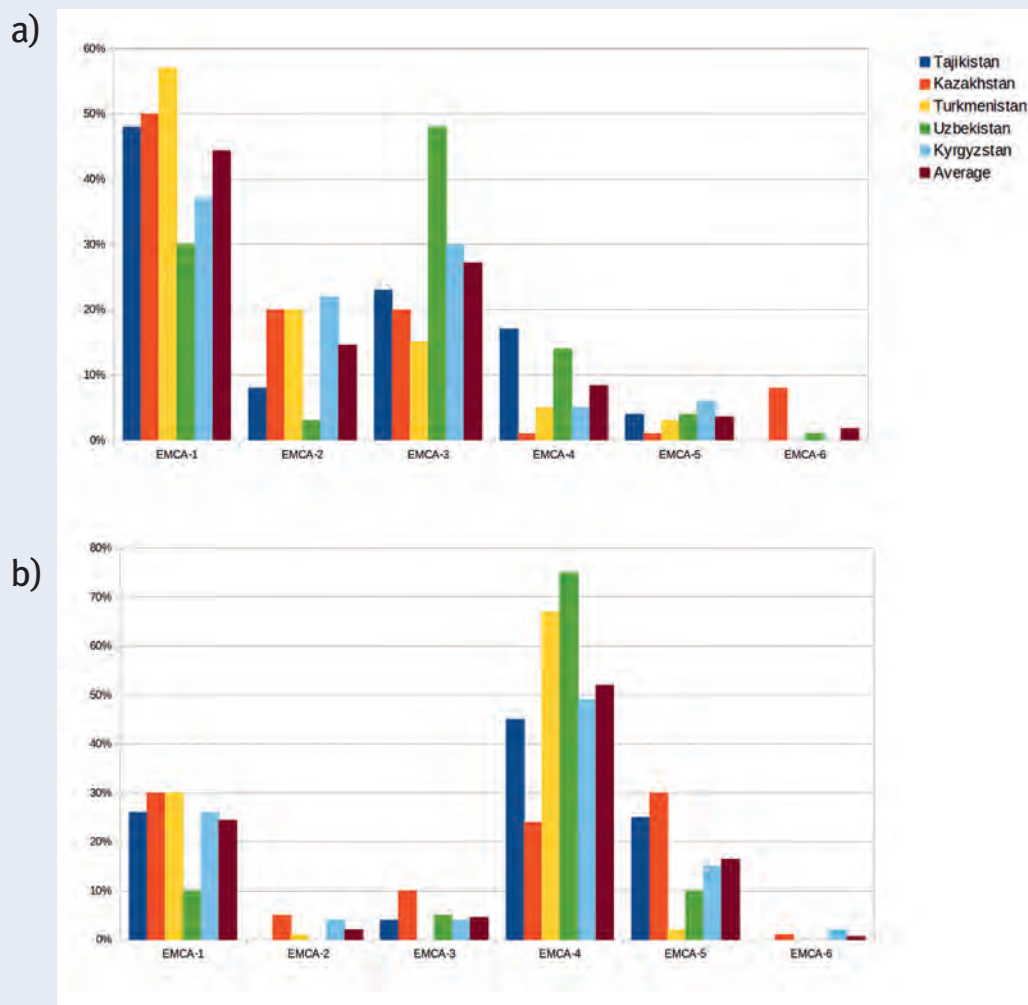


Abb. 2: Geschätzte Verteilung der Gebäudetypen der EMCA-Taxonomie für a) städtische Räume und b) ländliche Räume der verschiedenen zentralasiatischen Länder

Fig. 2: Estimated composition of a) urban and b) rural buildings stock in the different Central Asian countries, in terms of EMCA taxonomy, based on expert assessment

gekennzeichnet sind. Die Gebäudemerkmale wurden nach dem neuen globalen Taxonomiestandard, der im Rahmen von GEM entwickelt wurde, festgelegt. Tab.1 zeigt die identifizierten Gebäudetypen und deren Beschreibung auf unterschiedlichen Detailebenen. Die auf Expertenwissen basierende geschätzte Verteilung der Gebäudetypen für ländliche und städtische Räume der verschiedenen Länder ist in Abb.2 dargestellt. Durchschnittlich annähernd die Hälfte des exponierten Gebäudebestands (44 %) in städtischen Gebieten besteht aus meist nicht verstärktem Mauerwerk. Etwa 30% der Gebäude bestehen aus

Betonplatten-Fertigbau. In ländlichen Regionen dominieren Gebäude aus Erdmaterialien, welche üblicherweise einen hohen Grad an seismischer Verwundbarkeit aufweisen.

Ein neuartiger Ansatz zur Charakterisierung exponierter Elemente auf mehreren Maßstabsebenen, der auf einem mehrstufigen Analyseverfahren verschiedener Bilddatenquellen aufbaut und Stichprobenverfahren nutzt, wurde entwickelt, um aufwendige Vor-Ort-Untersuchungen effizient zu planen und durchzuführen (Abb. 3). In einer Top-down-Analyse werden

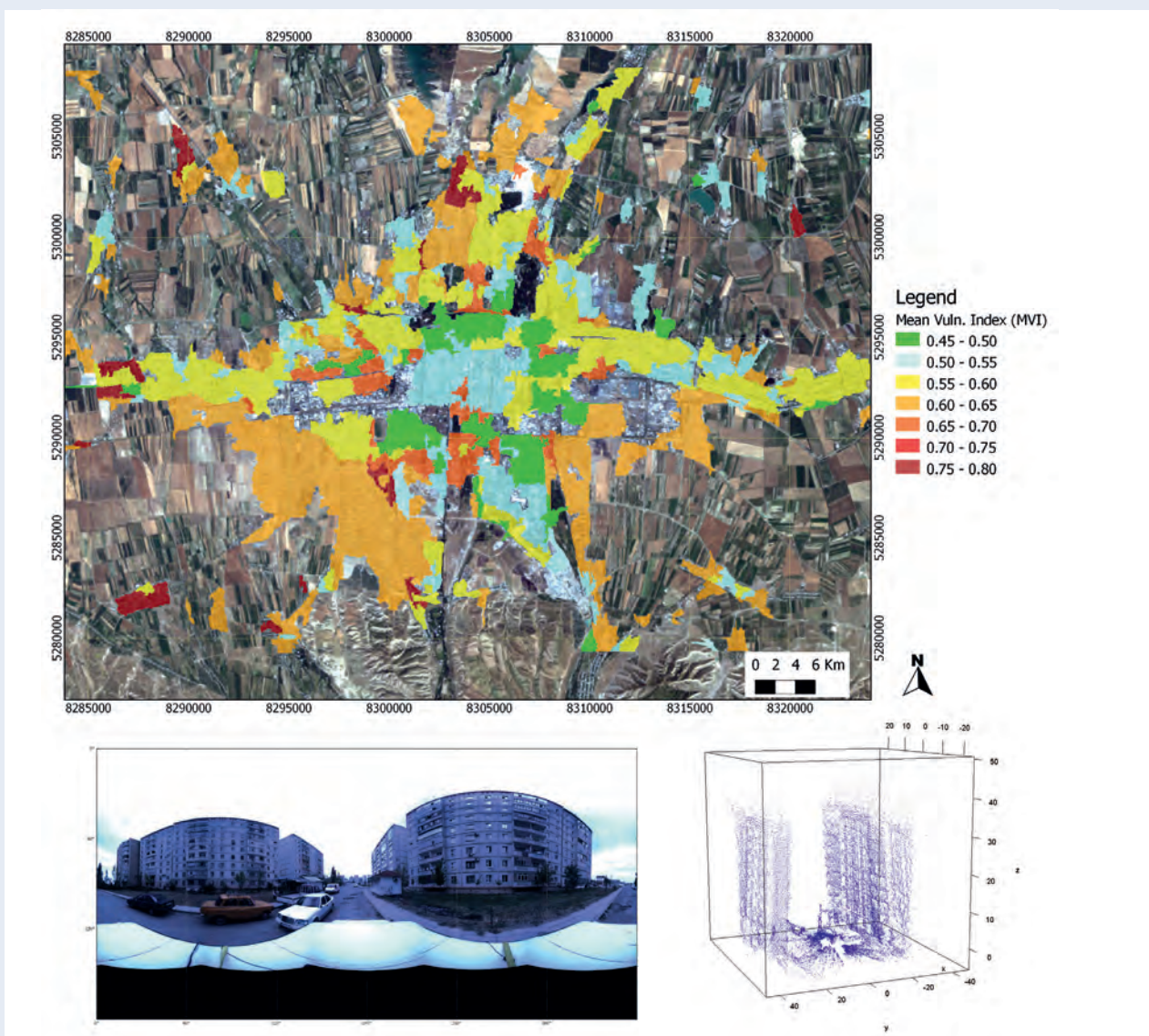


Abb. 3: Räumliche Verteilung der Gebäudeverwundbarkeit in Bishkek (oben). Beispiel eines omnidirektionalen Bilds (unten links) und einer 3D-Gebäuderekonstruktion mittels omnidirektionaler Bildverarbeitung (unten rechts)

Fig. 3: Spatial distribution of vulnerability in Bishkek (upper). In the lower part (left), example of omnidirectional image and (right) three-dimensional reconstruction based on omnidirectional image processing

dabei zunächst frei verfügbare multi-spektrale Satellitendaten analysiert, um eine Stadt großflächig in relativ homogene Stadtstrukturtypen zu unterteilen. Die resultierende Zonierung wird als räumliche Analysebasis für ein geschichtetes Zufallsstichprobenverfahren genutzt, um repräsentative Bereiche für eine detaillierte Vor-Ort-Untersuchung zu identifizieren. Um die Vor-Ort-Untersuchungen des Gebäudebestands schnell und effektiv zu gestalten, wird ein mobiles omnidirektionales Kamerasystem verwendet. Für eine automatische Bildauswertung wurde ein neuartiges Remote Rapid Visual Screening (RRVS)-Verfahren zur manuellen Bildauswertung im Hinblick auf strukturelle Gebäudemerkmale entwickelt. Diese Methode wurde bereits erfolgreich auf verschiedene urbane Räume in Kirgisistan (Bischkek, Osch, Jalalabad) und Tadschikistan (Duschanbe, Khorog) angewandt (Wieland et al., 2012).

### Vulnerabilitätsanalyse

Im Rahmen von EMCA wurden Bayesische Netzwerke für die Informationsintegration und eine neuartige wahrscheinlichkeitsbasierte Verwundbarkeitsabschätzung aus Bilddaten verwendet. Für jedes Gebäude, das erfolgreich durch die Satellitendatenanalyse oder durch die Auswertung der omnidirektionalen Kameradaten charakterisiert wurde, kann automatisch *a posteriori* die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Verwundbarkeitsklassen nach der Europäischen Makroseismischen Skala 1998 (EMS-98) ermittelt werden (Pittore und Wieland, 2013). Ausgehend von der Annahme, dass die Stadtstrukturtypen relativ homogen zusammengesetzt sind, kann die Stichprobeninformation in einer Bottom-up-Analyse von einem detaillierten Gebäudemassstab zurück

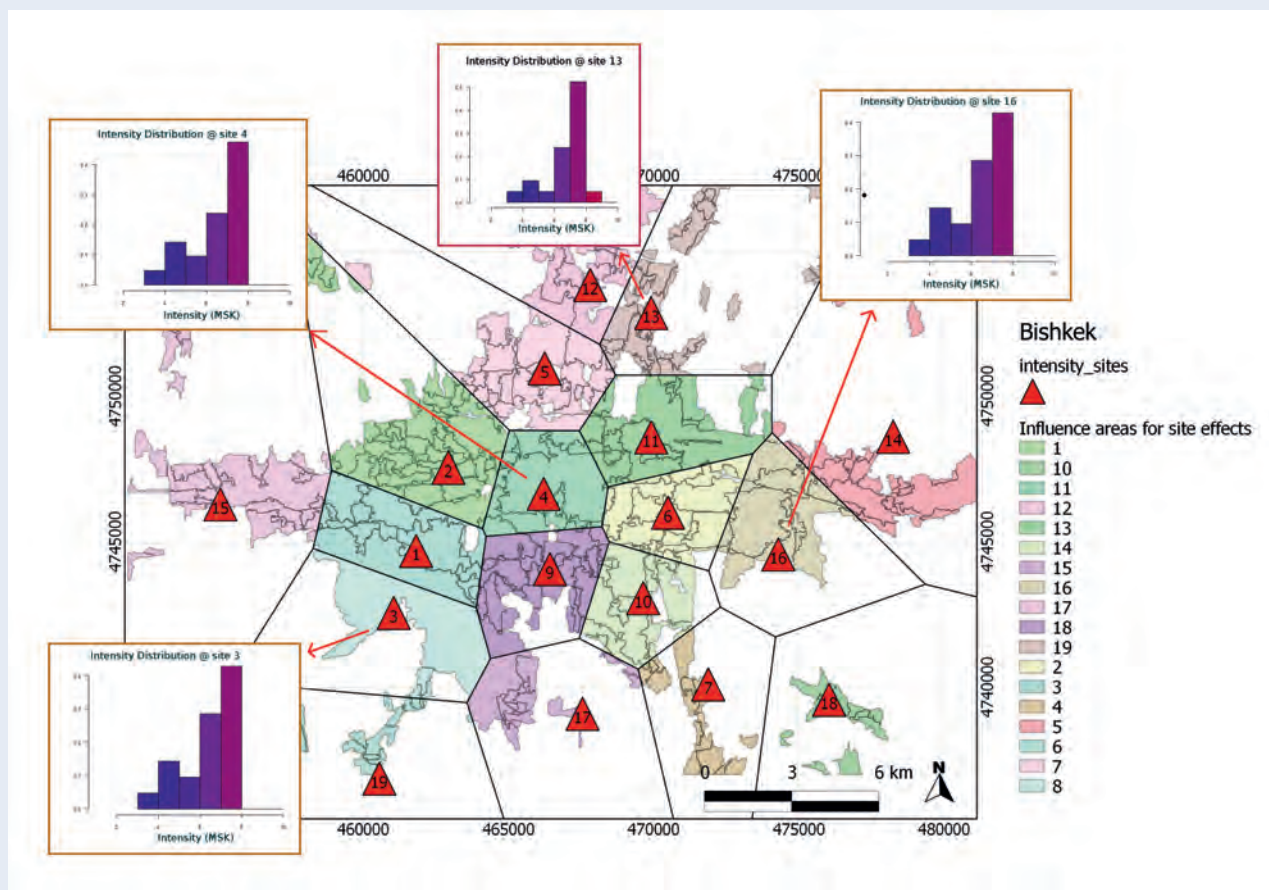


Abb. 4: Zu erwartende Intensitätsverteilung in Bischkek für ein Szenarioerdbeben in der nahegelegenen Issik-Ata-Verwerfung mit einer Magnitude von 7,5

Fig. 4: Expected distribution of macroseismic intensities in Bishkek due to a M7.5 scenario earthquake located on the nearby Issik-Ata fault

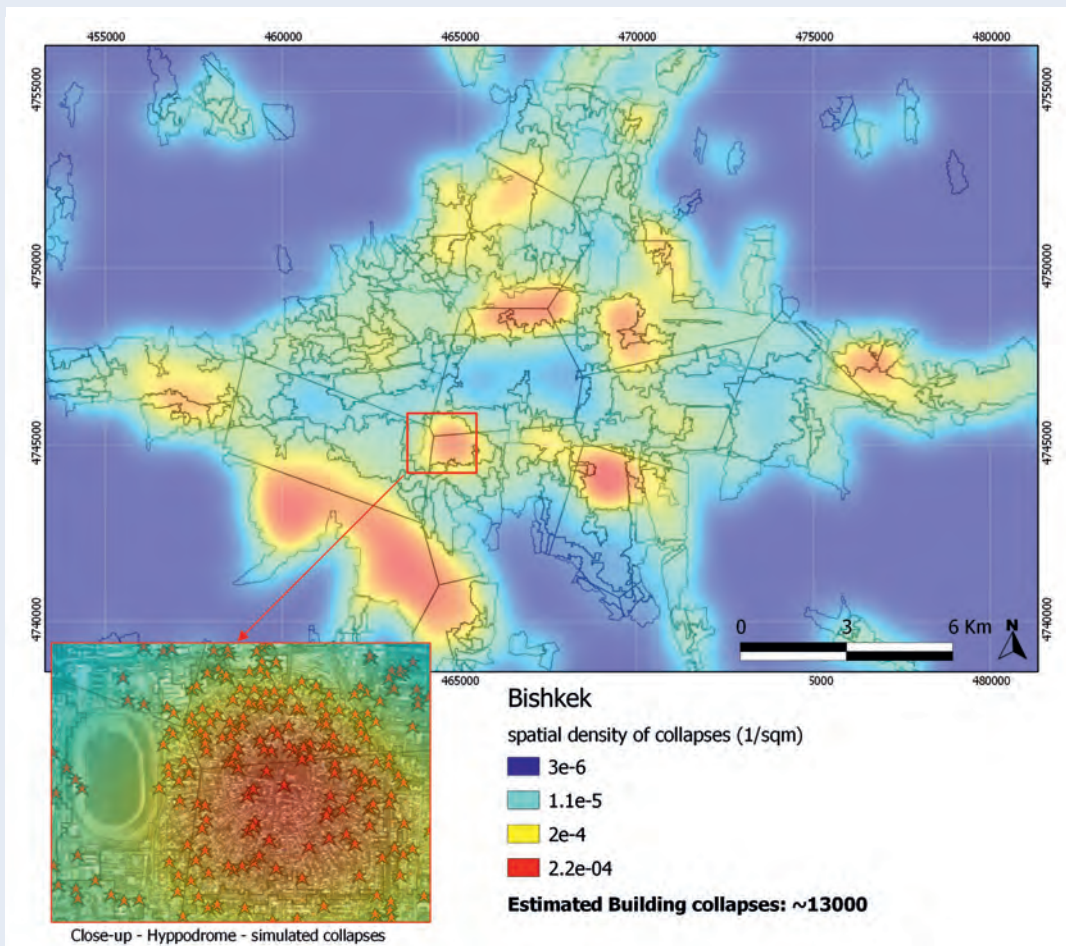


Abb. 5: Zu erwartende räumliche Dichte von Gebäude-einstürzen (Einstürze/m<sup>2</sup>) für das in Abb. 4 illustrierte Szenarioerdbeben. Mehr als 10 000 Einstürze werden für das Szenario erwartet. Das kleine Fenster zeigt die Simulation der räumlichen Verteilung der Einstürze für eine sehr dicht besiedelte Gegend in Bishkek.

Fig. 5: Expected spatial density of building collapses (collapses/m<sup>2</sup>) due to the scenario intensities depicted in Fig. 4. More than 10 000 collapses are expected in this scenario. The small inset in the figure shows a spatial simulation of collapse locations in a very populated area of Bishkek.

zu einem aggregierten Nachbarschaftsmaßstab propagiert werden, um flächendeckend für eine ganze Stadt den exponierten Gebäudebestand und dessen Verwundbarkeit zu ermitteln (Abb. 3). Verschiedene Aktivitäten wurden ferner gestartet, um die Entwicklung von analytischen Fragilitätskurven des Gebäudebestands in Zentralasien in Kooperation mit internationalen Partnerinstitutionen voranzutreiben.

### Anwendung im Bereich der Frühwarnung und des Rapid Response

Die maximal erzielbare Frühwarnzeit eines Frühwarnsystems ist durch regionale Gegebenheiten limitiert. Dies trifft besonders für Zentralasien zu, da sich hier eine Vielzahl seismischer Verwerfungen relativ nah an urbanen Räumen befinden und dadurch begründet nur sehr kurze Frühwarnzeiten möglich sind. In einem solchen Fall ist entsprechend ein On-site-Anwendungsschema zu empfehlen, bei dem Frühwarnsysteme eher in die Richtung eines Rapid Response ausgerichtet sind (mehr zu

diesem Thema siehe Beitrag von Boxberger et al. in diesem Heft). Innerhalb eines solchen operationalen Kontextes können räumlich detaillierte Schadensszenarien direkt vor bzw. im unmittelbaren Anschluss an ein Erdbeben ausgegeben werden (Picozzi et al., 2013). Die schnelle Bereitstellung wahrscheinlicher Schadensverteilungen liefert nützliche Informationen für die Optimierung der Koordination des Katastrophenmanagements. Die Entwicklung eines Katalogs von Schadensszenarien für die wichtigsten urbanen Räume in Zentralasien wird derzeit ausgearbeitet und konzentriert sich vorerst auf die Landeshauptstädte Bishkek, Duschanbe, Almaty, Taschkent und Aschgabat. Für jede Stadt wird dabei eine Reihe seismischer Ereignisse simuliert, die mit dem ermittelten lokalen Gefährdungspotenzial vergleichbar sind. Die Ereignisse werden als Basis für eine stochastische Simulation für die zu erwartende räumliche makroseismische Intensitätsverteilung (Abb. 4) verwendet (unter Berücksichtigung von lokalen Amplifizierungseffekten, soweit möglich). Die stochastischen Simulationen dienen als Grundlage für eine Berechnung der räumlichen Verteilung der physikalischen Schäden (Abb. 5).

## Ausblick

Zentralasien ist eine der seismisch gefährdetsten Regionen der Welt. Aufgrund der besonderen geologischen und geophysikalischen Bedingungen ist diese Region sehr gut geeignet, Methoden für seismische Risikoanalysen zu optimieren und Frühwarnsysteme zum Schutz der Bevölkerung zu testen und zu installieren. Eine enge Zusammenarbeit mit lokalen Forschungsinstituten und Verantwortungsträgern des Katastrophenmanagements ist hierbei von besonderer Bedeutung, ebenso wie das Capacity Building und die Wissens- und Informationsvermittlung der wissenschaftlichen Erkenntnisse bezüglich der zu erwartenden Risiken. Die Forschungsarbeiten im „Zentrum für Frühwarnung“ am GFZ zielen daher darauf ab, die komplexe Natur des seismischen Risikos der Region besser zu verstehen sowie innovative Lösungen für die verlässliche und effiziente Risikoabschätzung zu entwickeln. Vorliegende Ergebnisse im Bereich der Erdbebenfrühwarnung und des Rapid Response sind vielversprechend und die bisherigen Rückmeldungen der lokalen Partner und Endnutzer bestätigen den Forschungsansatz des GFZ. Eine Erweiterung der Forschungsarbeiten in Richtung einer Multi-Gefährdungsanalyse ist vorgesehen.

## Literatur

- Bindi, D., Abdrakhmatov, K., Parolai, S., Mucciarelli, M., Grünthal, G., Ischuk, A., Mikhailova, N., Zschau, J. (2012): Seismic hazard assessment in Central Asia: Outcomes from a site approach. - *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 37, 84-91, 10.1016/j.soildyn.2012.01.016.
- Picozzi, M., Bindi, D., Pittore, M., Kieling, K., Parolai, S. (2013): Real-time risk assessment in seismic early warning and rapid response: a feasibility study in Bishkek (Kyrgyzstan). - *Journal of Seismology*, 17, 2, 485-505, 10.1007/s10950-012-9332-5.
- Pittore, M., Wieland, M. (2013): Towards a rapid probabilistic seismic vulnerability assessment using satellite and ground-based remote sensing. - *Natural Hazards*, 68, 1, 115-145, 10.1007/s11069-012-0475-z.
- Ulomov V. I., The GSHAP Region 7 Working Group (1999): Seismic hazard of Northern Eurasia. - *Annali di Geofisica*, 42, 6, 1023-1038, 10.4401/ag-3785.
- Wieland, M., Pittore, M., Parolai, S., Zschau, J., Moldobekov, B., Begaliev, U. (2012): Estimating building inventory for rapid seismic vulnerability assessment: Towards an integrated approach based on multi-source imaging. - *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 36, 70-83, 10.1016/j.soildyn.2012.01.003.