

Noch Sekunden bis zu Erschütterung: Ein Erdbebenfrühwarnsystem für Bischkek

Tobias Boxberger¹, Marco Pilz¹, Sagynbek Orunbaev², Massimiliano Pittore¹, Kevin Fleming¹, Claus Milkereit¹, Stefano Parolai¹, Dino Bindi¹

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² Zentralasiatisches Institut für angewandte Geowissenschaften, Bischkek, Kirgisistan

Central Asia belongs to the regions of the world most exposed to high levels of seismic hazard. After the collapse of Soviet Union, the seismic monitoring in this area decreased significantly in quality and quantity since the maintenance of previous analog networks dealt with serious economic difficulties. Moreover, the installation of modern digital network was limited to few cases (e.g. stations in Kazakhstan or the KNET deployed in Kyrgyzstan). In the last decade the situation improved but still the new networks are concentrated in a few regions and devoted mainly to weak-motion seismology. In this article, we describe the installation of a small strong-motion network in the Kyrgyz capital Bishkek, intended for earthquake early warning and rapid response purposes. Low cost strong-motion stations developed at GFZ have been installed in seven buildings spread over the town, each one monitored by several sensing units to accomplish also the task of structural health monitoring. The stations communicate via wireless link and the streams collected by one specific station are communicated to the data management center via internet. Each unit has computational power, allowing for decentralized operations related to on-site early warning. An extension of this network to a regional early warning network for real time risk assessment is expected in the near future.



Frühwarnsysteme leisten weltweit wichtige Dienste im Bereich des Risikomanagements und der Risikominimierung in Regionen, die großen Gefahren durch Naturkatastrophen ausgesetzt sind. So wurden beispielsweise umfangreiche Frühwarnsysteme für Erdbeben in Japan, Mexiko und Taiwan installiert sowie Tsunami-Frühwarnsysteme im Pazifik und – unter Federführung des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ – im Indik in Betrieb genommen. In weiteren gefährdeten Ländern und Regionen wie z. B. Kalifornien, Rumänien und Italien werden aktuell Erdbebenfrühwarnsysteme entwickelt.

Bereits während vergangener katastrophaler Ereignisse haben solche Frühwarnsysteme ihre Notwendigkeit unter Beweis gestellt: So konnte anlässlich des Ometepec-Erdbebens in Mexiko am 20. März 2012 die Zivilbevölkerung frühzeitig gewarnt und die Untergrundbahnen in Mexiko Stadt gestoppt werden. Auch in Japan kommen Erdbebenfrühwarnsysteme seit 2007 erfolgreich zum Einsatz; ihre Wirksamkeit haben sie zuletzt während des Tōhoku-Erdbebens am 11. März 2011 gezeigt: weite Teile Japans waren einer makroseismischen Intensität von 7 (der höchsten Stufe auf der japanischen Intensitätsklassifizierung) ausgesetzt, und auch für große Entfernungen von über 300 km vom Erdbebenherd wurden hohe Bodenbeschleunigungen von über 1g gemessen. Obwohl eine erste, nach wenigen Sekunden berechnete Abschätzung der Magnitude mit 7,2 deutlich zu niedrig lag, konnte bereits nach 8,6 Sekunden, und damit noch bevor die zerstörerischen Scherwellen an der ersten Station des japanischen Netzwerks an Land gemessen wurden, eine Frühwarnung herausgegeben werden und beispielsweise die Shinkansen-Hochgeschwindigkeitszüge rechtzeitig gestoppt werden (Hoshihara und Ozaki, 2012).

In vielen Regionen weltweit kommen trotz einer hohen Gefährdung und eines hohen Risikos keine Frühwarnsysteme zum Einsatz. Ein Beispiel hierfür stellen die zentralasiatischen Staaten Kasachstan, Kirgisistan, Tadschikistan, Turkmenistan und Usbekistan dar. Mit dem Zerfall der früheren Sowjetunion ging ein Niedergang vieler wichtiger Infrastruktureinrichtungen und damit auch die Auflösung einer Vielzahl seismischer Stationen für die Überwachung starker Bodenbewegungen einher.

Links: Installation einer SOSEWIN-Station im Archiv für analoge Seismogramme, Seismologisches Institut, Bischkek, Kirgisistan (Foto: D. Bindi, GFZ)

Left: SOSEWIN installation inside the room where the analog seismograms are archived, Institute of Seismology, Bishkek, Kyrgyzstan

Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken, hat das GFZ in enger Kooperation mit dem Zentralasiatischen Institut für Angewandte Geowissenschaften (ZAIAG) in Bischkek, Kirgisistan, Anstrengungen unternommen, ein Überwachungsnetzwerk in der kirgisischen Hauptstadt zu installieren, das sowohl für die Frühwarnung als auch für eine schnelle, koordinierte Reaktion nach einem katastrophalen Ereignis geeignet ist.

Regionale und lokale Frühwarnung

Bei den Erdbebenfrühwarnsystemen muss im Wesentlichen zwischen regionalen und lokalen Konfigurationen unterschieden werden. Für den regionalen Aufbau wird ein dichtes Netzwerk von seismischen Stationen nahe der Erdbebenherdzone installiert, mit denen ein Beben hinsichtlich Ort und Magnitude frühzeitig registriert und eine Warnung herausgegeben werden kann. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass Erdbeben unterschiedliche Arten von seismischen Wellen erzeugen: Raum- und Oberflächenwellen. Die einzelnen Wellentypen eines Erdbebens breiten sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten vom Erdbebenherd aus. An einem bestimmten Punkt auf der Erde kommen sie daher nicht zur selben Zeit an, sondern mit wachsender Entfernung in zunehmend größerem zeitlichen Abstand. Zuerst treffen die relativ harmlosen Primärwellen ein, dann die zerstörerischen Scherwellen und schließlich als letzte die Oberflächenwellen. Die Vorlaufzeit, d. h. die Zeit, die für die Alarmierung der Bevölkerung bleibt, wird dabei definiert als die Zeit, die nötig ist, um das Beben möglichst genau zu charakterisieren, plus der Zeit bis zum Eintreffen der Scherwellen.

Wenn allerdings die Herdzone sehr nahe an einer gefährdeten Stadt liegt, bleibt nur eine sehr kurze Vorlaufzeit. Die Frühwarnung basiert dann nur auf vereinfachten Berechnungen für die Bodenbewegung auf Grundlage weniger Kenngrößen, die aus den ersten Sekunden der Primärwellen berechnet werden. Trotzdem kann diese Zeit genutzt werden, um spezielle, für den Erdbebenfall aufgestellte Verhaltensmaßnahmen der Katastrophenschutzbehörden umzusetzen. Nachweisbar kann so die Wahrscheinlichkeit eine Erdbebenkatastrophe zu überleben deutlich erhöht werden.

Neben den regionalen haben insbesondere auch die lokalen Frühwarnsysteme vom technologischen Fortschritt während der letzten Jahrzehnte profitiert. Seit den 1980er-Jahren fand eine kontinuierliche Entwicklung kostengünstiger seismischer Sensoren statt, die heute in Verbindung mit hoher Rechenleistung und kabelloser Datenübertragung den Aufbau räumlich dichter Netzwerke erlaubt, die sowohl für die Frühwarnung als auch für die permanente Überwachung des strukturellen Zustands wichtiger Gebäude genutzt werden können.



Kontakt: T. Boxberger
(tobias.boxberger@gfz-potsdam.de)

SOSEWIN – ein modernes Sensorsystem

Einer der ersten kabellosen Sensoren für die Überwachung von Gebäuden wurde schon 1998 von Straser und Kiremidjian vorgestellt. Heutzutage ist es möglich, solche Sensoren mit Mikrosteuerbausteinen und Rechnerbauteilen auszustatten und damit ihr Leistungsvermögen deutlich zu erhöhen, um eine dezentrale Schadensanalyse für die überwachten Gebäude durchzuführen.

Im Rahmen der Projekte SAFER (www.saferproject.net) und EDIM (www.cedim.de/EDIM.php) und in Kooperation mit dem Institut für Informatik der Humboldt-Universität Berlin wurden am GFZ neuartige kabellose Sensoreinheiten entwickelt, die zu einem Netzwerk mit dem Namen SOSEWIN (Self Organising Seismic Early Warning Information System) verdichtet werden können (Fleming et al., 2009; Picozzi et al., 2010). Mehrere Hauptziele lagen der Entwicklung dieser Sensoreinheiten zugrunde:

- SOSEWIN steht für ein dezentrales, selbstorganisierendes, vermaschtes, kabelloses Netzwerk, in dem jeder Netzwerkknoten mit einem oder mehreren anderen verbunden ist. Die Informationen werden von Knoten zu Knoten weitergereicht, bis sie das Ziel erreichen.
- Jeder Sensorknoten ist aus kostengünstigen Massenartikeln aufgebaut.
- Jeder Sensorknoten führt eine eigene, einfache Verarbeitung der seismischen Daten durch, übernimmt deren Archivierung und gibt gegebenenfalls selbst eine Warnmeldung heraus.

- Die Entscheidung über das Aussenden einer Frühwarnung wird intern innerhalb des Sensornetzwerks gefällt, wobei man sich die Kommunikation zwischen den einzelnen Sensorknoten des Netzwerks zunutze macht. Das Auslösen eines Alarms kann sowohl innerhalb des Netzwerks erfolgen (d. h. der Alarm wird an jedem Netzwerkstandort ausgelöst) als auch außerhalb (d. h. der Alarm wird über eine Schnittstelle nach außen an ein Lagezentrum übertragen).
- Aufgrund der Selbstorganisationsfähigkeit kann sich das Netzwerk kontinuierlich auf die sich verändernden äußeren Bedingungen einstellen (z. B. Hinzuschaltung/Ab-schaltung/Ausfall einzelner Netzwerkknoten oder ganzer Netzwerkeile nach einem katastrophalen Ereignis, Interferenzprobleme usw.).

Die einzelnen Sensoreinheiten sind dabei aus drei Hardwarekomponenten aufgebaut: ein Digitalumsetzer, ein kabelloser vermittelnder Netzwerkknoten und ein seismischer Sensor. Mit Ausnahme der am GFZ entwickelten Leiterplatte für den Digitalumsetzer sind alle Bauteile Massenartikel, wodurch sich die Anschaffungskosten im Vergleich zu anderen am Markt erhältlichen Seismometern deutlich reduzieren. Abb.1 zeigt eine solche Sensoreinheit und ihren schematischen Aufbau. Die Installation aller Platinen erfolgt in einem kleinen, wasserdichten Metallbehälter (Größe 220 x 140 x 71 mm; 1,75 kg). Allseitige Dualbandantennen mit entgegengesetzter vertikaler Polarisierung garantieren eine optimale Kommunikation mit

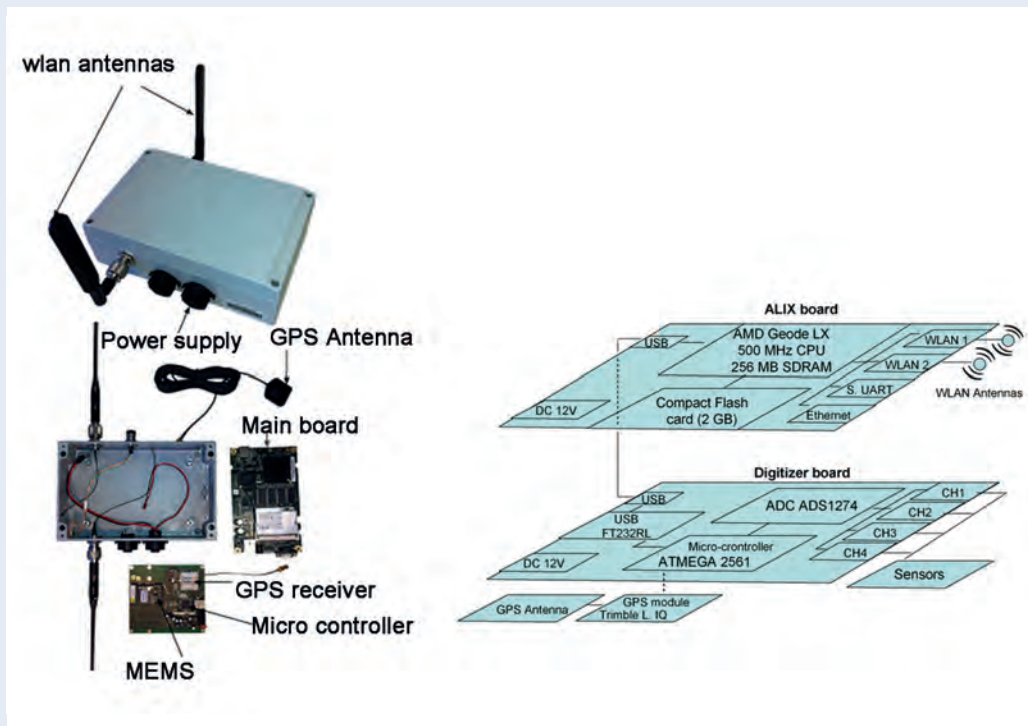


Abb. 1: Eine am GFZ entwickelte, kabellose Sensoreinheit. Die linke Abbildung zeigt das gesamte Bauteil (eine genaue Beschreibung findet sich im Text). Die rechte Seite zeigt einen schematischen Überblick über die interne Netzwerkarchitektur.

Fig. 1: The GFZ-Wireless Sensing Unit. In the left panel, the complete unit is shown (a detailed description can be found in the text). In the right panel, a schematic overview of the internal architecture is shown.

benachbarten Sensoreinheiten. Eine GPS-Antenne ist für eine genaue Zeitsynchronisierung aller Sensorknoten erforderlich. Einschließlich der Aufzeichnung und Echtzeitübertragung der Daten liegt die Leistung einer Sensoreinheit bei rund 4,5 W.

Die Übertragung seismischer Daten zwischen den einzelnen Sensoreinheiten eines Netzwerks basiert auf dem Prinzip der Leitweglenkung, d. h. die Übermittlung erfolgt entlang spezieller Pfade von einer Datenquelle zu einem Empfänger. Im vorliegenden Fall wird die Leitweglenkung dadurch erschwert, dass alle Netzwerkknoten gleichzeitig als Datensender, -übermittler und -empfänger arbeiten können. Hierzu arbeiten die selbstorganisierenden Sensoreinheiten auf Grundlage der OLSR (Optimized Link State Routing)-Protokolle; dies sind proaktive Protokolle, bei denen für jeden Netzwerkknoten ein Überblick über die gesamte Netzwerkarchitektur vorliegt, wodurch die Daten unmittelbar und auf dem effizientesten Weg zu jedem beliebigen Netzwerkknoten und damit zu den Netzwerkschnittstellen und zum Endnutzer übertragen werden können. Die seismischen Daten werden zwischen den Stationen standardmäßig mit einer sogenannten Multi-hop-Strategie mit dem SeedLink-Protokoll übertragen. SeedLink ist ein robustes Protokoll, bei dem die Verbindung zwischen den einzelnen Netzwerkknoten ohne Datenverlust getrennt und wieder verbunden werden kann, da die Datenübertragung genau an dem Punkt wiederaufgenommen werden kann, an dem die Trennung erfolgte.

Darüber hinaus wurde vor kurzem ein weiterer Sensorprototyp in Zusammenarbeit mit der Firma GEMPA fertiggestellt, bei dem jede Sensoreinheit mit einem neuen Datenaquisitionsserver ausgestattet ist (sogenannte Common Acquisition Protocol Server). Gegenüber der Verwendung des SeedLink-Protokolls können damit Daten von mehreren Stationen mittels eines vereinheitlichten Protokolls übertragen werden (z. B. sowohl seismische Daten mit einer hohen Abtastrate als auch Bilder mit einer geringeren Abtastrate). Dies ist ein entscheidender Vorteil für zukünftige Anwendungen im Bereich der gemeinsamen seismischen und bildlichen Überwachung.

Automatische Berechnung der Parameter

Das in jedem Netzwerkknoten installierte Softwarepaket ist identisch mit dem von Fleming et al. (2009) Beschriebenen. In jeder Sensoreinheit werden grundlegende Rechenschritte durch die Frühwarnsoftware durchgeführt. Dies umfasst die Erkennung von Erdbeben, die Vorausberechnung einiger wichtiger Parameter zur Bodenbewegung für die später eintreffenden Scherwellen sowie eine ständige Aktualisierung der Daten in Echtzeit. Der Nachweis, dass ein starkes Beben aufgetreten ist, erfolgt kontinuierlich und rekursiv mittels eines Vergleichs des Kurzzeit-/Langzeitmittelwerts der Amplitude der Bodenbewegung. Für den Fall eines starken Bebens liegt der Kurzzeitmittelwert naturgemäß deutlich höher. Wird ein bestimmter Grenzwert zwischen Kurzzeit- und Langzeitmittelwert

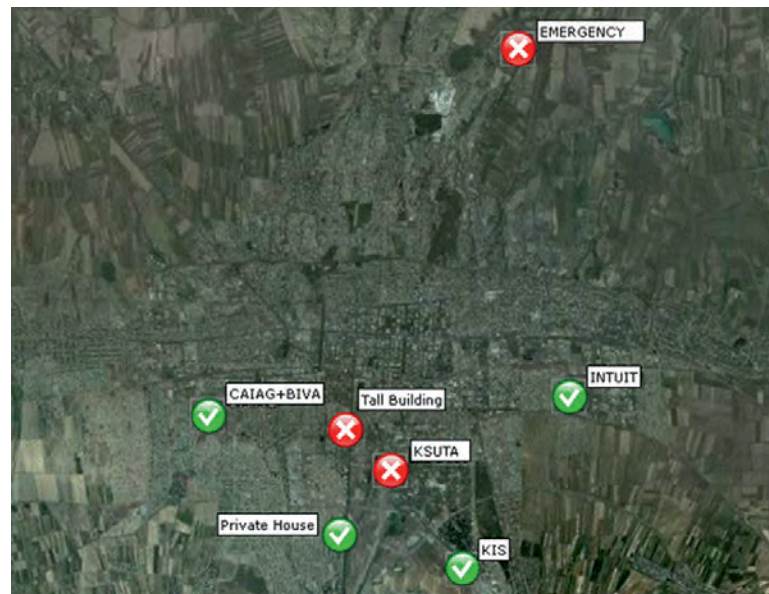


Abb. 2: Standort der Gebäude in Bischkek, in denen Sensoren installiert wurden. Ein grüner Kreis signalisiert, dass alle Sensoren in dem entsprechenden Gebäude und die Kommunikation störungsfrei arbeiten; ein roter Kreis signalisiert, dass derzeit Probleme für mindestens einen Sensor vorliegen.

Fig. 2: Location of the buildings in Bishkek where the wireless sensing units are installed. A green circle indicates that all instruments and the communication work properly. A red circle indicates that there are problems for at least one sensor unit

überschritten, werden die erwarteten maximalen Bodenbewegungsparameter berechnet. Die genaueste Charakterisierung des Bebens basiert auf einer ständigen Aktualisierung der wichtigsten Bodenparameter (dies umfasst die maximale Bodenbeschleunigung, die maximale Bodengeschwindigkeit und den maximalen Bodenversatz).

Der Algorithmus, der die Ausgabe einer sensorspezifischen Frühwarnung steuert, basiert auf den Daten der ersten Sekunden der (relativ ungefährlichen) Primärwellen; daraus wird mittels empirischer Beziehungen die erwartete, maximale standortspezifische Bodengeschwindigkeit für die wenige Zeit später eintreffenden zerstörerischen Scherwellen berechnet. Die Berechnung basiert auf einer möglichst exakten Lokalisierung des Bebens, seiner Magnitude und einer charakteristischen Abschwächung der Bodenbewegung mit zunehmender Entfernung vom Bebenherd. Da nicht nur das Verhalten des Untergrunds allein, sondern auch der physische Zustand des Gebäudes für eventuelle Schäden verantwortlich ist, kann darüber hinaus auch eine Beschreibung der Vulnerabilität des Gebäudes in jeden Netzwerkknoten eingelesen werden, der die Schadensklasse mit Parametern der maximalen Bodenbewegung in Verbindung bringt. Diese sogenannte „fragility curve“ liegt angepasst an den Gebäudetyp als Tabelle vor und wird

von der Auswertesoftware, die auf jedem Sensorknoten läuft, verarbeitet.

Weiterhin wurde in Zusammenarbeit mit der Firma GEMPA ein aktualisiertes Benachrichtigungsverfahren eingeführt, mit dessen Hilfe die Ausgabe von Warnmeldungen der einzelnen Netzwerkknoten gesteuert werden kann, sobald ein gewisser Grenzwert für die Primärwellenbodenbewegung überschritten wird. Die Meldungen werden beim Eingang neuer Informationen fortlaufend aktualisiert. Sind weitergehende Informationen über das möglicherweise instabile Verhalten des Gebäudes verfügbar, beinhalten die ausgegebenen Meldungen auch Informationen über möglicherweise eintretende Gebäudeschäden.

Rund 30 Sensoreinheiten in Bischkek

Die erste Realisierung eines solchen Erdbebenfrühwarnsystems erfolgt seit dem Jahr 2012 unter Leitung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des GFZ in der kirgisischen Hauptstadt Bischkek. Rund 30 der oben beschriebenen Sensoreinheiten wurden in sieben verschiedenen, öffentlichen und privaten Gebäuden im gesamten Stadtgebiet installiert (Abb. 2 und 3). Jedes Gebäude wurde mit mehreren Sensorknoten (zwischen drei und zehn Einheiten pro Gebäude) ausgestattet, die in verschiedenen Stockwerken eingerichtet wurden. Beispielsweise wurden in unserem Partnerinstitut ZAIAG sieben Sensoren installiert. Eine detaillierte Übersicht

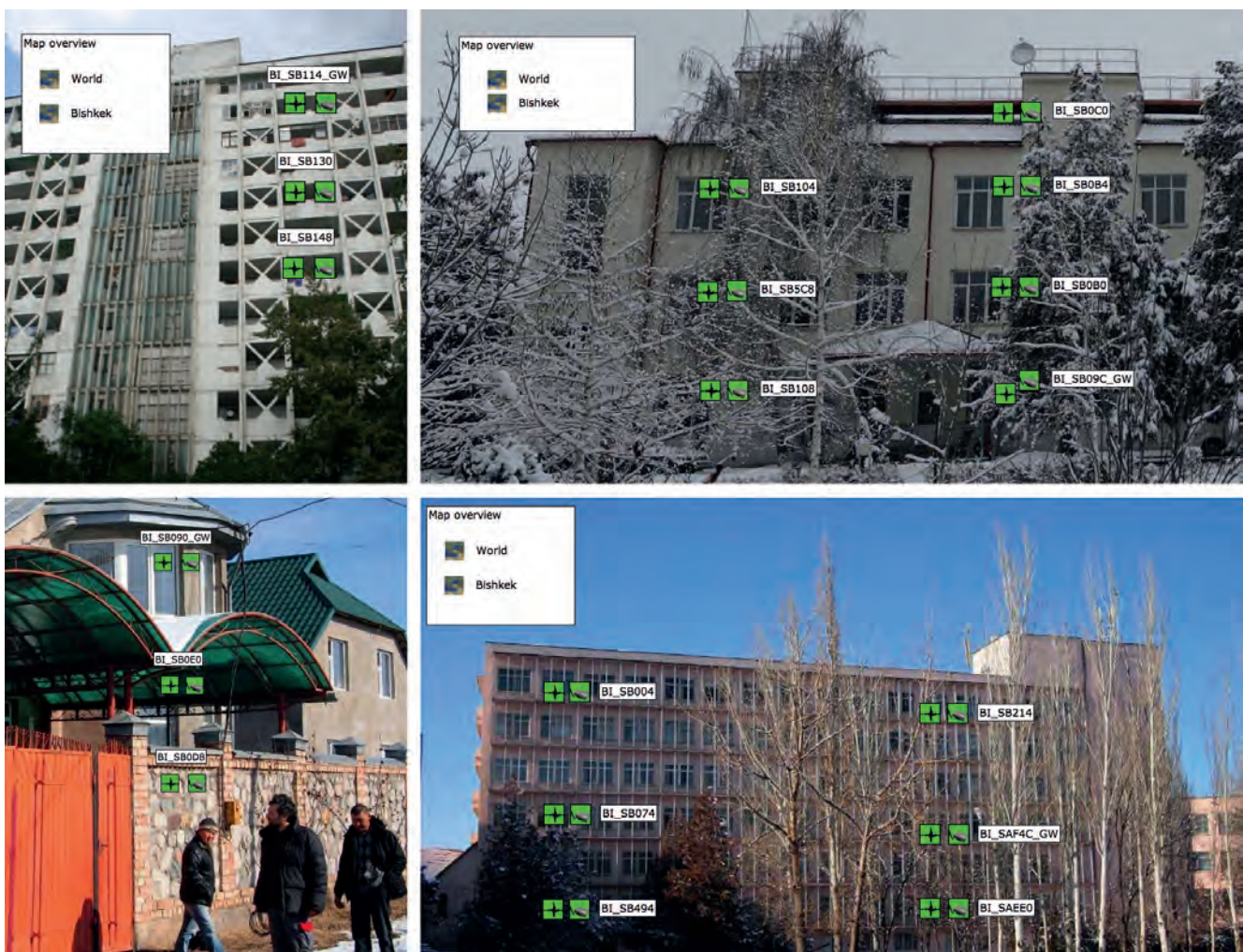


Abb 3.: Frontalaufnahmen von Gebäuden in Bischkek, in denen Teile des Netzwerks installiert wurden (links: Wohngebäude, rechts: öffentliche Gebäude). Die Icons sind Teil der Statusmeldung; Grün: Station ist online, Rot: Station ist offline. Das Fenster mit der Kartenübersicht dient der Navigation zu Detailansichten.

Fig. 3: Example of buildings in Bishkek hosting the sensing units (left: residential buildings; right: public building). The icons are part of the status message, green symbol means the station is online and red respectively the station is offline. The map overview window allows to navigate to the different detail views.

über den Funktionsstatus für die einzelnen Gebäude kann unter <http://lhotse21.gfz-potsdam.de/nagvis> abgerufen werden. Über einen einzigen Netzwerkknoten in jedem Gebäude, der mit dem Internet verbunden ist, werden die Daten von allen Sensoren an das GFZ und das ZAIAG übermittelt. Die Software, die über das Ausgeben einer Frühwarnung entscheidet, befindet sich noch in einer Testphase, so dass in der gegenwärtigen Realisierung nur Datenübertragung in Echtzeit erfolgt.

Ausblick

Dieses lokale Netzwerk stellt den Grundbaustein für ein wesentlich umfangreicheres regionales Netzwerk dar, das in den nächsten Jahren vom GFZ in Zusammenarbeit mit den zentralasiatischen Partnern aufgebaut werden soll. Die Tatsache, dass viele Großstädte in Zentralasien sowohl durch Erdbeben von nahen (d. h. in einer Entfernung von wenigen Zehner Kilometern) als auch von weiter entfernten Verwerfungen gefährdet sind, zeigt, wie wichtig eine Realisierung von sowohl lokalen als auch regionalen Erdbebenfrühwarnsystemen ist. Insbesondere soll auf Grundlage der Ergebnisse von Stankiewicz et al. (2013) in Kürze ein regionales Netzwerk für Bischkek realisiert werden, das optimale Ergebnisse sowohl für die Frühwarnung als auch für eine Schadensabschätzung in Echtzeit liefern soll. Damit kann auch überprüft werden, ob die bestehenden Risikokartierungen gültig sind oder ob gegebenenfalls Aktualisierungen erforderlich sind.

Literatur

- 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, 755-771, 10.1785/gssrl.80.5.755.
- Hoshiba, M., Ozaki, T. (2012): Earthquake Early Warning and Tsunami warning of JMA of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. - *Zisin - Journal of the Seismological Society of Japan*, 64, 3, 155-168, 10.4294/zisin.64.155.
- Picozzi, M., Ditommaso, R., Parolai, S., Mucciarelli, M., Milkereit, C., Sobiesiak, M., Di Giacomo, D., Gallipoli, M. R., Pilz, M., Vona, M., Zschau, J. (2010): Real time monitoring of structures in task force missions: the example of the $M_w=6.3$ Central Italy Earthquake, April 6, 2009. - *Natural Hazards*, 52, 2, 253-256, 10.1007/s11069-009-9481-1.
- 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, 1125-1137, 10.1007/s10950-013-9381-4.
- Straser, E. G., Kiremidjian, A. S. (1998): A modular, wireless damage monitoring system for structures, (Report / John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil Engineering, Stanford University; 129), Stanford CA, 154 p., https://blume.stanford.edu/sites/default/files/TR128_Straser.pdf.



Abb. 4: Installation einer SOSEWIN-Station an der Fassade eines Gebäudes der KSUCTA-Universität in Bischkek (Foto: J. Stankiewicz, GFZ, jetzt ECGS)

Fig. 4: SOSEWIN installation at the facade of the KSUCTA university building in Bishkek