

Massenbewegungen in Zentralasien – Lawinen aus Boden und Gestein

Marco Pils, Sigrid Roessner, Christoph Janssen, Robert Behling, Stefano Parolai, Annamaria Saponaro, Maike Schäbitz
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

The strong topographic relief and the presence of weakly consolidated sediments create favorable conditions for the development of mass movements in large areas of Central Asia. At the GFZ German Research Centre for Geosciences we are studying such gravitational mass movements in a multidisciplinary and both process-oriented and application-based way, focusing on better understanding of the triggering and motion-controlling factors. Development of automated remote sensing methods for spatial mapping and monitoring of mass movements using optical and radar remote sensing as well as Bayesian statistics and Geographic Information System (GIS) technology for regional hazard assessment are complemented by temporal monitoring of mass motion processes using seismological methods. The combination of novel passive seismic imaging technologies and the use of wireless sensors allows the rapid construction of inexpensive, spatially dense and self-organizing communication networks that can respond flexibly to changes and continuous data acquisition and transmission over long distances. In addition, geological field data can be used to identify potential shear zones and characterize their structural inventory, focusing on the question if climatic changes (i.e. changes in the mineralogical composition, microstructure and the pore water chemistry) will have effects on the shear strength of the rock and might, in consequence, trigger rapid mass movements.



Gravitative Massenbewegungen wie z. B. Hangrutsche finden im Vergleich zu anderen Naturkatastrophen wie Erdbeben und Überschwemmungen in der Regel keinen breiten Eingang in unsere Medien; jedoch wurden allein in den Jahren zwischen 2004 bis 2010 weltweit insgesamt 2620 Massenbewegungen registriert, die Menschenleben forderten, ein Großteil davon in Asien (Petley, 2012). Hierzu hat das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ im Rahmen seines Erdsystem-Observatoriums Zentralasien einen regionalen Schwerpunkt zur Erforschung der Mechanismen gravitativer Massenbewegungen, der dadurch ausgelösten Gefahren und Risiken sowie der damit einhergehenden Wechselwirkungen eingerichtet.

Die gebirgigen Regionen des Tien Shan und die eingeschlossenen Becken sind als Untersuchungsgebiet bestens geeignet, da sie eine große Bandbreite geodynamischer und klimatischer Rahmenbedingungen aufweisen. Das Gebiet ist als Teil der indisch-asiatischen Plattenkollisionszone nicht nur geodynamisch äußerst aktiv, was im häufigen Auftreten von Erdbeben zum Ausdruck kommt, sondern auch durch klimatische Übergänge von Wüstengebieten zu Gletscherregionen im Einflussbereich von Westwinden und Monsun sowie durch starke topographische Gegensätze (Übergang vom Pamir-Tien Shan-Hochland zu den Tiefländern der Becken von Tadschikistan und Fergana) geprägt. Zudem ist der Siedlungsraum stark begrenzt, was zu einer hohen Bevölkerungsdichte in den fruchtbaren, niedriger gelegenen Gebieten geführt hat. So leben beispielsweise mehr als zehn Millionen Menschen, d. h. rund 20% der gesamten Bevölkerung Zentralasiens, im rund 300 km langen und bis zu 110 km breiten Ferganabecken, das sich über die Territorien von Kirgisistan, Tadschikistan und Usbekistan erstreckt.

Eine hohe Erdbebengefährdung, relativ ertragreiche Niederschläge, wenig verfestigte Sedimente sowie – insbesondere im östlichen Bereich des Ferganabeckens (Abb. 1) – massive Ton- und Lössablagerungen tragen zu einer hohen Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen bei, die häufig Volumina von hunderttausenden bis mehreren Millionen Kubikmeter umfassen. Seit den 1950er-Jahren wurden mehr als

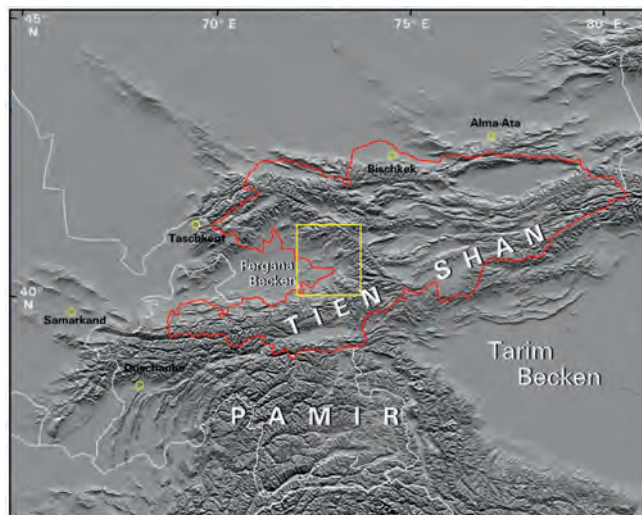


Abb. 1: Topographie von Zentralasien. Die rote Linie kennzeichnet die Landesgrenze Kirgisistans. Gelb markiert ist das stark durch Massenbewegungen gefährdete Gebiet am östlichen Rand des Ferganabeckens.

Fig. 1: Topography of Central Asia. The country border of Kyrgyzstan is outlined in red. The yellow line depicts the area of high landslide hazard along the Eastern rim of the Fergana Basin.

3000 Hangrutsche in diesem Gebiet registriert. Die meisten dieser Massenbewegungen treten in Form von Rotations- und Translationsrutschungen innerhalb wenig verfestigter quaritärer, tertiärer und kreidezeitlicher Sedimente auf. Dabei gibt es grundsätzliche Unterschiede im Bewegungsverhalten der Rutschungen. Besonders gefährlich sind die lawinenartig und in Sekundenschnelle abgehenden Rutschungen, die sich im Bereich von Lössakkumulationen bilden, während Rutschungen in stärker tonhaltigen Sedimenten ein eher kriechendes Bewegungsverhalten aufweisen (Roessner et al., 2005).

Automatische Erfassung von Hangrutschen

Eine genaue, großräumige Erfassung solcher Massenbewegungen bildet einen Forschungsschwerpunkt am GFZ, wobei sich diese im Bereich der Fernerkundung durchgeführten Arbeiten auf die Entwicklung von automatischen Methoden zur Inventarisierung von Massenbewegungen auf der Basis multitemporaler Satellitendaten konzentrieren. Bis zum heutigen Zeitpunkt

Links: Hangrutsch bei der Ortschaft Nasridin im Südwesten Kirgisistans (Foto: M. Schäbitz, GFZ)

Left: Landslide near Nasridin in south-west Kyrgyzstan



Kontakt: M. Pilz
(pilz@gfz-potsdam.de)

erfolgte in Kirgisistan keine systematische raum-zeitliche Inventarisierung dieser Ereignisse, welche jedoch eine wesentliche Voraussetzung für eine objektive Gefährdungs- und Risiko-einschätzung bildet. Somit sind optische Satellitendaten die einzige, großräumig über einen längeren Zeitraum verfügbare, konsistente Datenquelle, auf deren Grundlage eine Inventarisierung von Massenbewegungen auf regionalem Maßstab vorgenommen werden kann. Für die methodischen Entwicklungen nehmen die räumlich und zeitlich hochauflösenden RapidEye-Satellitendaten eine Schlüsselstellung ein. Eine hohe zeitliche Wiederholungsrate ermöglicht eine genaue Erfassung des Oberflächenzustands in seiner saisonalen Veränderlichkeit; die daraus resultierende multitemporale Datenbasis bildet die Grundlage für die Entwicklung automatischer Methoden zur Identifizierung von Massenbewegungen. Zur längerfristigen Erfassung wurde die Datenbasis darüber hinaus durch Daten anderer optischer Satellitensysteme erweitert, die bis in das

Jahr 1986 zurückreichen und damit eine systematische, raumbezogene Erfassung von Hangrutschereignissen während der letzten 25 Jahre erlauben.

In Verbindung mit weiteren raumbezogenen Datensätzen (z.B. Höhenmodelle und geologische Daten) konnte ein automatisches Verfahren entwickelt werden, um Massenbewegungen detailliert räumlich zu identifizieren. Dabei ermöglicht die computergestützte Analyse von spezifischen zeitlichen Verläufen von Vegetationsänderungen eine genaue Identifizierung der Massenbewegungen und zugleich ihre Unterscheidung von durch andere Landnutzungen (z.B. Landwirtschaft) hervorgerufenen Veränderungen. Dieses Verfahren ist auch in der Lage, Artefakte zu minimieren, die durch radiometrische und geometrische Unterschiede zwischen den multitemporalen Datensätzen bedingt sind. Hierzu wurden entsprechende Methoden zur radiometrischen und geometrischen Korrektur in das automatische Identifizierungsverfahren integriert. Im Ergebnis ermöglicht das Verfahren somit eine automatische Identifizierung von Massenbewegungen und deren Integration in eine GIS-Datenbank (Abb. 2). Für das gesamte Untersuchungsgebiet am östlichen Rand des Ferganabeckens (rund 12 000 km²) konnten für einen Untersuchungszeitraum von 2009 bis 2012 rund 250 Hangrutsche automatisch detektiert werden, die in ihrer Mehrheit durch nachfolgende Feldbegehungen im September 2012 verifiziert werden konnten (Abb. 2).



Abb. 2: Beispielhaftes Ergebnis der automatischen Identifizierung von Massenbewegungen. Die Grenzen der detektierten Hangrutschobjekte sind in schwarz und rot dargestellt und der perspektivischen Satellitenbildansicht überlagert. Die Punkte A und B markieren den Standort und die Blickrichtung der Geländefotos (Fotos: R. Behling, GFZ).

Fig. 2: Exemplary result of automated identification of mass movements. The detected landslide objects are outlined in black and red and overlaid on the perspective satellite data view. The points A and B mark the position and the view direction while taking the field pictures.

Um eine Gefährdungseinschätzung auch für das Auftreten zukünftiger gravitativer Massenbewegungen machen zu können, verfolgt ein neuer Ansatz das Ziel, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten solcher Hangrutsche auf regionalen, länderübergreifenden Skalen in Beziehung mit dem Vorliegen bestimmter, diese Massenbewegungen auslösende Faktoren zu bringen. Dieser am GFZ entwickelte Ansatz kombiniert neueste Entwicklungen in der GIS-Technologie mit dem schon in anderen Bereichen der Geowissenschaften erfolgreich angewandten Weight-of-evidence-Verfahren auf Grundlage der Bayesschen Konzepte. Die zentrale Annahme ist, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten gravitativer Massenbewegungen höher ist, wenn dieselben Bedingungen bereits in der Vergangenheit zu Hangrutschen geführt haben.

Hierzu werden auf regionaler Ebene für jeden einzelnen Hangrutsch die möglichen, für diese Massenbewegung verantwortlichen Faktoren in dem Maß gewichtet, wie häufig in der Vergangenheit solche gravitativen Massenbewegungen in diesem Gebiet aufgetreten sind. Damit ist es möglich, genau diejenigen Parameter zu identifizieren, die als die Hauptursache für das Abgehen solcher Hanginstabilitäten angesehen werden können. Werden darüber hinaus die einzelnen Faktoren zu einem einzelnen Modell zusammengeführt, so hat sich beispielsweise für den kirgisischen Teil um das Ferganabecken gezeigt, dass insbesondere nach Westen ausgerichtete, flach ansteigende Hänge jüngerer Datums außerordentlich stark gefährdet sind (Abb. 3).

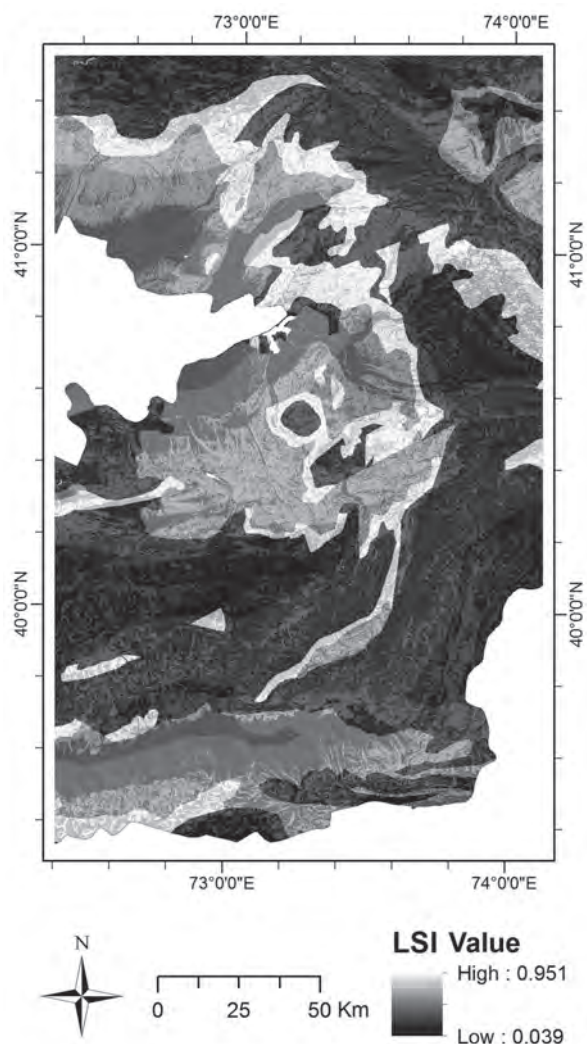


Abb. 3: Mit Bezug auf Gefälle, Hangneigungsrichtung, Stratigraphie, seismische Intensität und Abstand zu seismischen Verwerfungen normierter Suszeptibilitätsindex für Hangrutsche (LSI) für den südwestlichen Teil Kirgisistans um das Ferganabecken

Fig. 3: Normalized Landslide Susceptibility Index (LSI) map for the south-western part of Kyrgyzstan around the Fergana basin with respect to slope gradient, slope aspect, geo-stratigraphy, seismic intensity and distance from faults factors

Im Vergleich zu anderen Verfahren kann diese Methode leicht auch auf andere Regionen übertragen werden. Sie bietet somit eine einfache Möglichkeit, den Einfluss der einzelnen Hangrutsche auslösenden Faktoren zu überprüfen. Es wurde nachgewiesen, dass mit dieser Methodik gefährdete Gebiete mit mehr als achtzigprozentiger Genauigkeit identifiziert werden können.

Bildgebende Verfahren – eine Alternative

Nicht nur auf der regionalen Ebene, auch auf lokaler Ebene gibt es eine Vielzahl geophysikalischer Verfahren zur Charakterisierung potentiell instabiler Hänge; jedoch sind diese lokalen Verfahren oftmals zeitaufwendig und teuer. Weiterhin

kann, insbesondere für lockere Sedimente, die Gleitfläche aufgrund des mangelnden Auflösungsvermögens mit vielen dieser Methoden nur sehr ungenau lokalisiert werden. Neben detaillierten mikrostrukturellen und geochemischen Analysen für die basalen Gleitflächen bieten neuartige bildgebende Verfahren, die im Vergleich zu klassischen Verfahren eine größere laterale und Tiefenausdehnung haben und nur auf dem ständig vorhandenen natürlichen Umgebungsrauschen basieren, eine Alternative, die interne Struktur eines Hangrutsches zu erfassen. Im Gegensatz zu den Erschütterungen eines Erdbebens, dessen Ursprung gewöhnlich in großer Tiefe liegt, sind natürliche und anthropogene Ereignisse an der Erdoberfläche für das Umgebungsrauschen verantwortlich. Die dabei entstehenden Wellen laufen durch den Untergrund – geräuschlos und nicht wahrnehmbar, aber begleitet von minimalen Erschütterungen. Wird dieses Umgebungsrauschen zeitgleich von mehreren seismischen Stationen aufgezeichnet und miteinander verglichen, können Rückschlüsse auf laterale Variationen der Untergrundstruktur gezogen werden, da lokale Heterogenitäten im Untergrund die Ausbreitung dieser kleinsten Erschütterungen beeinflussen können. Bereits seit den 1970er-Jahren ist dieses Verfahren für viele geowissenschaftliche Fragestellungen auf unterschiedlichen räumlichen Skalen eingesetzt worden.

Zur genauen Lokalisierung solcher Heterogenitäten auf kleinen, lokalen Skalen wurde am GFZ ein neuartiges Inversionsverfahren entwickelt, mit dessen Hilfe dreidimensionale Scherwellengeschwindigkeitsmodelle des oberflächennahen Untergrunds nahezu in Echtzeit berechnet werden können. Es eignet sich insbesondere zur Charakterisierung von instabilen Hängen, da es auch bei einer ausgeprägten Geländestruktur anwendbar ist (Pilz et al., 2013). Die Scherwellengeschwindigkeit ist ein wichtiger ingenieurseismologischer Parameter, der zur Bewertung von Standorteffekten, d.h. zur Einschätzung der Verstärkung seismischer Wellen, herangezogen wird. Für das Verfahren machen wir uns die Tatsache zu Nutze, dass die an der Erdoberfläche laufenden Wellen des seismischen Rauschens dispersiv sind, d.h. unterschiedliche Wellenlängen pflanzen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten fort und verhelfen uns zu Informationen über Heterogenitäten in unterschiedlichen Tiefenbereichen.

Abb. 4 zeigt beispielhaft das Scherwellengeschwindigkeitsprofil, das nach nur dreistündiger Aufzeichnung des seismischen Rauschens für einen Hangrutsch in Südkirgisistan am südöstlichen Rand des Ferganabeckens erhalten wurde. Es wird deutlich, dass die Dynamik und interne Struktur von potenziell instabilen Hängen auch auf kleinen Skalen sehr komplex sein kann. Sowohl oberflächennahe als auch tiefer liegende Schichten können so zeitgleich und mit großer Genauigkeit abgebildet werden.

Neben der ausgeprägten Geländestruktur wird aus Abb. 4 deutlich, dass die Dicke der potentiell instabilen Bereiche, unabhängig von der Oberflächentopographie, starke laterale Varia-

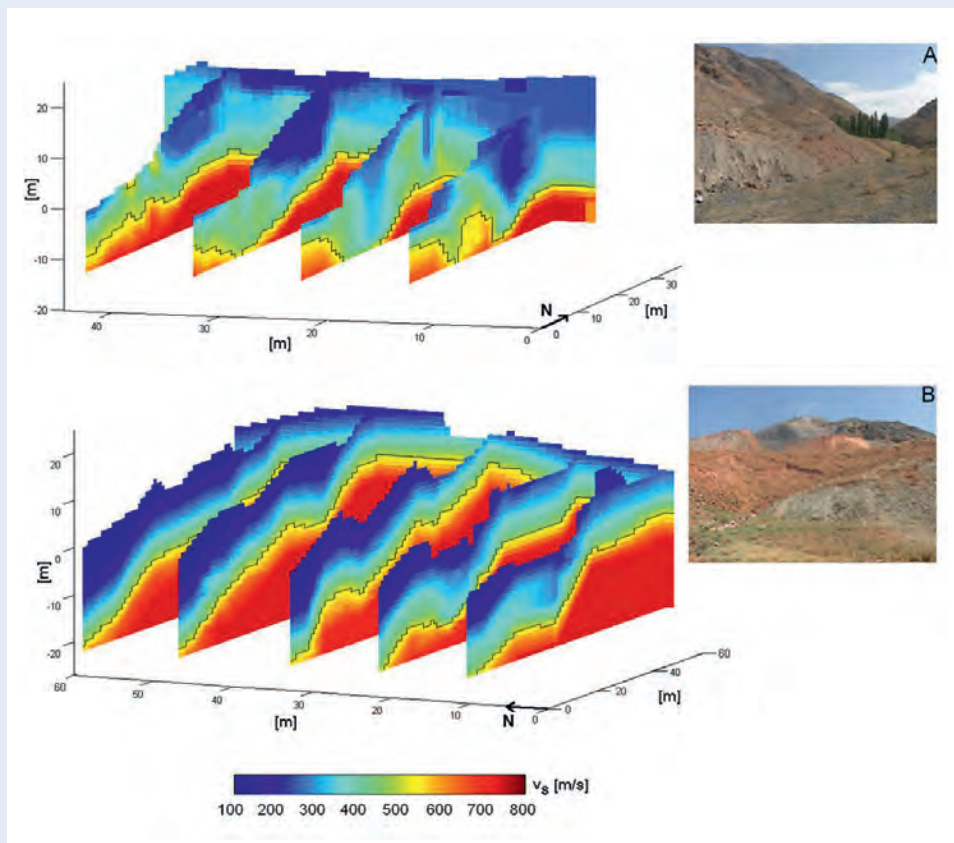


Abb. 4: Links: 3D-Scherwellengeschwindigkeitsmodelle für zwei Messungen auf einem Hangrutsch in Südkirgisistan. Die schwarzen Linien markieren jeweils die ungefähre Grenze zwischen den lockeren Sedimenten mit S-Wellengeschwindigkeiten geringer als 500 m/s und dem harten Gestein. Rechts: Aufnahmen der entsprechenden Meßorte (Fotos: M. Pilz, GFZ)

Fig. 4: Left: 3D shear wave velocity models for two measurements on a landslide in southern Kyrgyzstan. The black line represents the approximate border between the low-velocity sediments with S-wave velocities less than 500 m/s and the high-velocity bedrock. Right: Corresponding images of the respective measurement sites

tionen aufgrund unterschiedlicher Festigkeit und Witterungsbeständigkeit zeigen. Diese Bereiche sind tendenziell durch eine geringe Scherwellengeschwindigkeit gekennzeichnet. Diese obersten, hochaufgelösten, instabilen Bereiche streben beständig hangabwärts. Da sich die einzelnen Bereiche des Hangs in ihrer Fließgeschwindigkeit unterscheiden, kann es zu einem markanten Spannungsaufbau innerhalb der obersten Schichten kommen. Üblicherweise verringert sich vor dem Rutschvorgang an einem Hangrutsch die Scherfestigkeit des Oberflächenmaterials, d. h. im Bereich der Gleitfläche übersteigen die treibenden Kräfte die haltenden. Das macht sich in der Regel in einem signifikanten Abfall der Scherwellengeschwindigkeit bemerkbar. Das vom GFZ neu entwickelte Verfahren kann diese Veränderungen nahezu in Echtzeit erfassen und eignet sich daher als Frühwarnsystem für Hangrutsche.

Alterationsprozesse in Scherzonen

Für die Verminderung der Scherfestigkeit ist eine Reihe von inneren Faktoren verantwortlich, welche die stabilisierenden Kräfte schwächen können. Nach Selby (1982) zählen hierzu unter anderem die Gefügekomponenten wie glatte Kornformen und eine eng gestufte Korngrößenverteilungen sowie Änderungen

des (Mikro-)Gefüges infolge langandauernder Kriechvorgänge und physikalisch-chemischer Reaktionen (z. B. die Hydratation von Tonen oder die Lösung von Bindemitteln und Zementen).

Untersuchungen zur Neuentstehung, Transformation und Verteilung von Tonmineralen in Myloniten aus Scherzonen und in Gleitflächen von Hangrutschen in Tuffen (Shuzui, 2001) belegen, dass mit dem Prozess der Fragmentierung des Ausgangsmaterials die Alteration des Materials durch einsickerndes Wasser stark zunimmt. Durch diese Alterationsprozesse wird lokal die Genese von Tonmineralen gefördert. Die fortschreitende Tonmineralentstehung führt schließlich zu einer Abnahme von Porosität und Permeabilität und zur Entstehung von quellfähigen Tonmineralen, welche die Scherfestigkeit der Gleitflächen herabsetzen.

Zu einer genauen Untersuchung wurden daher mehrere Profile durch Hangrutsche aufgenommen und für verschiedene Stellen dieser Profile Sedimentproben analysiert (Abb. 5). Umfangreiche geochemische und mikroskopische Untersuchungen lassen einen signifikanten Einfluss von Alterationsprozessen auf die Festigkeit des Gesteins erkennen. In Ton eingewickelte Quarz und Feldspatkörner (sogenannte Kern-Mantelstrukturen) können als ein deutliches Anzeichen für schnelle Gleitbewegungen

des Oberflächenmaterials angesehen werden. Darüberhinaus belegen mikrostrukturelle Analysen mittels Transmissionselektronen-Mikroskopie die Existenz neu gewachsener Tonminerale im Mikrobereich. Insbesondere auf lange Frist können klimatisch bedingte Veränderungen in der mineralogischen Zusammensetzung, im Gefüge und in der Porenwasserchemie Auswirkungen auf die Scherfestigkeit des Gesteins haben. Ein mineralogisches Monitoring gefährdeter Hänge könnte daher helfen, die Ursachen eines Hangrutschs besser einzuschätzen.

Ausblick

Komplexe natürliche Systeme wie Hanginstabilitäten, deren Abrutschen im schlimmsten Fall verheerende Auswirkungen auch auf regionaler oder nationaler Ebene haben kann, erfordern eine große Bandbreite an Forschungsansätzen. Ganz allgemein lassen sich durch den parallelen Einsatz der hier geschilderten Monitoring- und Analyseverfahren exakte Gefährdungseinschätzung und Frühwarnung für von Hangrutschs bedrohte Regionen verbinden. Dies gilt insbesondere auch für Regionen wie Zentralasien, die bisher nicht im Fokus des öffentlichen Interesses stehen. Vor allem die Echtzeitmessung mechanischer Untergrundeigenschaften und ihrer Änderungen bietet lokalen Behörden die Möglichkeit, selbst in dichtbesiedelten Gebieten oder in der Nähe sensibler Einrichtungen schnell zu reagieren. Somit kann – gerade in Zeiten des globalen Wandels und der sich verändernden Umweltbedingungen – das Risiko, das von einem möglichen Hangrutsch ausgeht, für die in allen Staaten Zentralasiens immer noch stark anwachsende Bevölkerung minimiert werden.

In enger Zusammenarbeit mit den Partnern und Behörden vor Ort konzentrieren wir uns in einem nächsten Schritt auf die Übertragung der hier vorgestellten Methoden zur Gefährdungseinschätzung für das Auftreten zukünftiger gravitativer Massenbewegungen auf andere Regionen, um eine grenzüberschreitende, regionale Gefährdungskarte für den Großraum Zentralasien zu entwickeln. Durch mehrere Trainingskurse sollen die Methoden und Forschungsergebnisse auch mit den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern vor Ort geteilt werden, so dass sie in der Lage sind, Gefährdungspotentiale frühzeitig zu erkennen und die erworbenen Kenntnisse selbständig und anwendungsorientiert umzusetzen.

Literatur

- Pilz, M., Parolai, S., Bindi, D. (2013): 3D passive imaging of complex seismic fault systems: evidence of surface traces of the Ikkyk-Ata fault (Kyrgyzstan). - *Geophysical Journal International*, 194, 3, 1955-1965, 10.1093/gji/ggt214.
- Petley, D. (2012): Global patterns of loss of life from landslides. – *Geology*, 40, 10, 927-930, 10.1130/G33217.1.
- Roessner, S., Wetzels, H.-U., Kaufmann, H., Samagoev, A. (2005): Potential of satellite remote sensing and GIS for landslide hazard assessment in Southern Kyrgyzstan (Central Asia). - *Natural Hazards*, 35, 3, 395-416, 10.1007/s11069-004-1799-0.
- Selby, M. J. (1982): *Hillslope materials and processes*, Oxford, 264 p.
- Shuzui, H. (2001): Process of slip-surface development and formation of slip-surface clay in landslides in Tertiary volcanic rocks, Japan. - *Engineering Geology*, 61, 4, 199-220, 10.1016/S0013-7952(01)00025-4.



Abb. 5: Hangrutsch im Süden der Provinz Gansu (Zentralchina), der durch langandauernde Kriechprozesse gekennzeichnet ist. Deutlich trennt die Gleitfläche anstehendes Gestein (Phyllit) vom darüberliegenden Löss (Foto: M. Schäbitz, GFZ).

Fig. 5: Landslides located in the south of the province Gansu (Central China) characterized by long term creeping processes. The sliding surface separates the bedrock (phyllite) from the overlying loess.