

Untersuchung der Rutschungssuszeptibilität im tektonisch aktiven Hochgebirge mit der InfoVal Methode – eine Fallstudie aus Maily-Say, Kirgistan

Investigation of the landslide susceptibility in the tectonically active high mountains using the InfoVal method – a case study from Maily-Say, Kyrgyzstan

Anika Braun¹, Tomás M. Fernández-Steeger¹, Hans-Balder Havenith², Almaz Torgoev²

¹ M.Sc. Anika Braun, Dr. Tomás M. Fernández-Steeger Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, RWTH Aachen, Aachen, Deutschland, braun@lih.rwth-aachen.de

² Prof. Dr. Hans-Balder Havenith, Georisiken und Umwelt, Institut für Geologie, Universität Lüttich, Lüttich, Belgien

Zusammenfassung

Für das stark hangrutschungsgefährdete Gebiet um die ehemalige Bergbaustadt Maily-Say in Kirgistan wurde eine Suszeptibilitätskartierung mit der „Information Value“ (InfoVal) Methode durchgeführt. Durch die Lage zwischen einem tektonisch aktiven Hochgebirge und dem Fergana Becken ergeben sich für Maily-Say verschiedene Hangrutschungen begünstigende Faktoren, wie z.B. ein ausgeprägtes Relief (Höhen von 700 bis 4000 m über NN), Gesteine welche überwiegend aus jungen, lockeren Sedimenten zusammengesetzt sind, ein Klima mit starken Abflüssen durch Schneeschmelze und hohe Niederschläge im Frühjahr sowie eine hohe Seismizität. Zudem ist in Maily-Say die Landnutzung, insbesondere durch den Uranbergbau von 1946 bis 1968 ein erheblicher Faktor bei der Destabilisierung von Hängen. Auf der Grundlage eines multitemporalen Rutschungsverzeichnisses und eines Datensatzes mit Einflussfaktoren wurde eine Suszeptibilitätskarte für Maily-Say erstellt. Zusätzlich konnte durch die Analyse das Verständnis für das Zusammenspiel verschiedener Faktoren verbessert sowie zeitliche Trends bezüglich klimatischer Bedingungen, tektonischer Aktivität und des Bergbaus erkannt werden.

Schlüsselworte: Hangrutschungen, Suszeptibilität, GIS

Abstract

A landslide susceptibility analysis was carried out for Maily-Say, a former uranium mining town in Kyrgyzstan. Numerous. Several large scaled landslides have already claimed fatalities, caused severe damage to housing and infrastructure or induced floods along the main river in the Maily-Say valley. Landslides also threaten radioactive tailing ponds which are distributed around the town. Destabilisation of those tailings by landslides or flooding bears the potential of a major environmental catastrophe. The location of Maily-Say within the foothills of the seismically active Tien Shan high Mountains close to the Fergana Basin favours landslide generation, due to the steep slopes, the high seismicity, the presence of soft sedimentary rocks and climatic conditions causing high runoff due to snow melt and intense precipitations in spring. Additionally, in Maily-Say land use is an important factor for destabilisation of slopes due to mining activities between 1946 and 1968. For the prediction of landslide susceptibility, GIS-based statistical Information Value (InfoVal) Method was applied using a multitemporal landslide inventory. In this method the occurrence of landslides in relation to different factors like slope angle, geology and hydrology is analysed. The basis for the analysis is besides the landslide inventory which covers different years between 1962 and 2007 a digital elevation model and a geological map. The objective of this approach was to use a simple dataset to generate a maximum of information and hence carry out a hazard zonation without extensive field work. Comparing the result of the susceptibility mapping to landslides that occurred later, shows that many endangered slopes were identified by this method, while other failures, like shallow loess landslides were not recognized. In addition to the prediction of landslide susceptibility, the comprehension of the interplay between different factors as well as temporal trends regarding climatic conditions and seismic activity were recognised.

Keywords: landslides, susceptibility, GIS

1 Einleitung

In der ehemaligen Uranbergbaustadt Maily-Say in Kirgistan (siehe Abb. 1) gibt es ein massives Hangrutschungsproblem. Im Jahr 2007 gab es dort mehr als 200 Hangrutschungen die eine Gesamtfläche von mindestens 6,4 km² einnehmen. Neben erheblichen Schäden an Gebäuden und Infrastruktur haben die Hangrutschungen bereits mehrere Todesopfer gefordert. Durch Hangrutschungen, die während der

Schneeschmelze und dem damit verbundenem erhöhten Abflussaufkommen im Frühjahr den Hauptfluss im Tal von Maily-Say blockiert haben, kommt es sowohl im Oberstrom durch Aufstauen des Flusses als auch im Unterstrom durch plötzlich auftretende Ausbruchfluten zu gefährlichen Überflutungen. Die Situation wird weiter verschärft durch zahlreiche Abraumbalden aus den Uranabbau- und Uranverhüttungsprozessen, welche teilweise radioaktives Material enthalten.

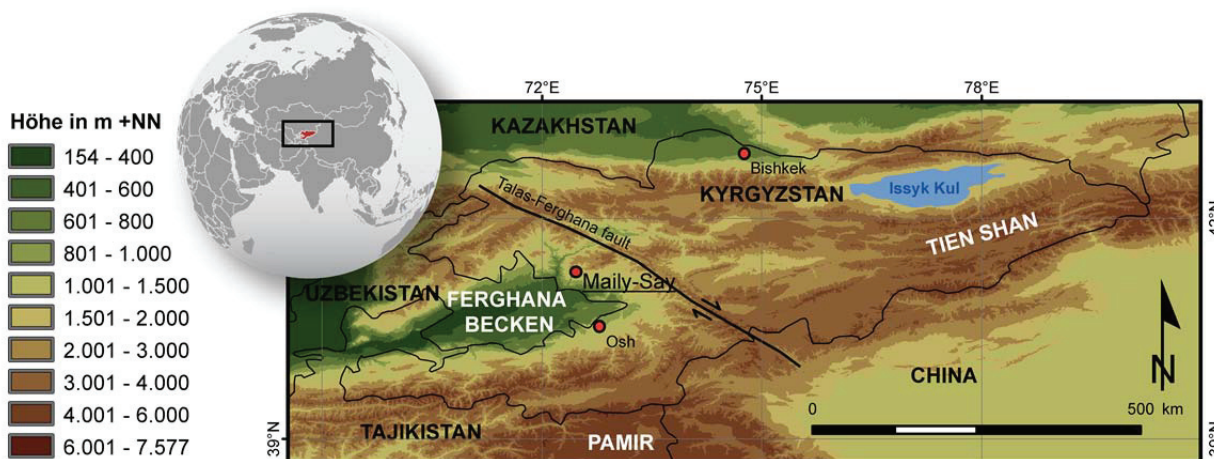


Abb. 1: Übersichtskarte von Kirgistan mit Höhenlagen und Lage des Arbeitsgebietes Maily-Say. SRTM-Daten von REUTER et al. (2007).
Fig. 1: Overview of Kyrgyzstan with elevation and location of working area Maily-Say. SRTM data from REUTER et al. (2007).

Sollte eine solche Abraumhalde durch eine Hangrutschung oder durch Überflutungen destabilisiert und in den Fluss gespült werden, droht eine Umweltkatastrophe erheblichen Ausmaßes, da der Fluss in das relativ dicht besiedelte und landwirtschaftlich genutzte Ferghana Becken entwässert.

Laut VARNES (1986) ist es möglich die Prozesse und Faktoren, die zur Entstehung von Hanginstabilitäten führen zu identifizieren und basierend auf dem Prinzip, die Vergangenheit und die Gegenwart sind Schlüssel zur Zukunft, sogar vorhergesagt werden. Schon durch eine räumliche Eingrenzung von Gebieten mit einer hohen Anfälligkeit für das Auftreten von Hangrutschungen (Suszeptibilität), kann durch angepasste Landnutzungsplanung einiger Schaden vermieden werden (FELL 1994). Zur Analyse der Rutschungssuszeptibilität wurden nicht zuletzt seit der Entwicklung von Geoinformationssystemen (GIS) und der zunehmenden

Verfügbarkeit von digitalen Geodaten zahlreiche qualitative und quantitative Methoden entwickelt, welche z.B. bei ALEOTTI & CHOWDURY(1999), GUZZETTI et al. (1999) und SAHA et al. (2005) besprochen werden.

Eine relativ einfache anzuwendende GIS-basierte Methode ist die „Information Value“ (InfoVal) Methode, welche unter anderem bei YIN & YAN (1988), GUPTA & JOSHI (1990), VAN WESTEN (1997), AYALEW et al. (2004) und YALCIN (2008) verwendet wurde. Hierbei wird im Prinzip der Zusammenhang zwischen verschiedenen Einflussfaktoren und dem Auftreten von Hangrutschungen analysiert. So kann unter der Annahme, dass sich zukünftige Hangrutschungen unter den gleichen Bedingungen ereignen wie bisherige, eine Prognose bezüglich zukünftiger Hangrutschungen getroffen werden.

Mithilfe dieser Methode wurde für das Untersuchungsgebiet Maily-Say eine Suszeptibilitätsanalyse durchgeführt. Für die Analyse standen ein umfangreicher Datensatz mit Parametern und ein multitemporales Hangrutschungsverzeichnis für fünf Jahrgänge zwischen 1962 und 2007 zur Verfügung. Dies ermöglichte nicht nur die Vorhersage der Rutschungssuszeptibilität sondern auch eine Kontrolle der Vorhersagen welche auf den älteren Rutschungsverzeichnissen basieren sowie die Identifikation zeitlicher Trends bezüglich der Wichtigkeit der verschiedenen Parameter. Letztendlich soll mit dieser Studie gezeigt werden, dass auch mit einfachen Mitteln und wenigen zur Verfügung stehenden Daten im Gelände eine Gefahrenkartierung vorgenommen werden kann. Gerade in schwer zugänglichen oder strukturschwachen Regionen ist es manchmal nicht möglich, erweiterte Kartierungen im Gelände vorzunehmen.

2 Untersuchungsgebiet

Maily-Say liegt am westlichen Fuß des tektonische aktiven Tien Shan Hochgebirges. Das Tien Shan Gebirge ist ein altes Orogen aus der variszischen Gebirgsbildungsphase welches vor 55 Ma während der Kollision von Indien und Eurasien reaktiviert wurde (MOLNAR & TAPPONIER 1975; BULLEN et al. 2001), siehe auch Abb. 2. Die höchsten Gipfel des Gebirges übersteigen 7000 m. Die lokale Geologie in Maily-Say wird durch seine Lage im Übergangsbereich

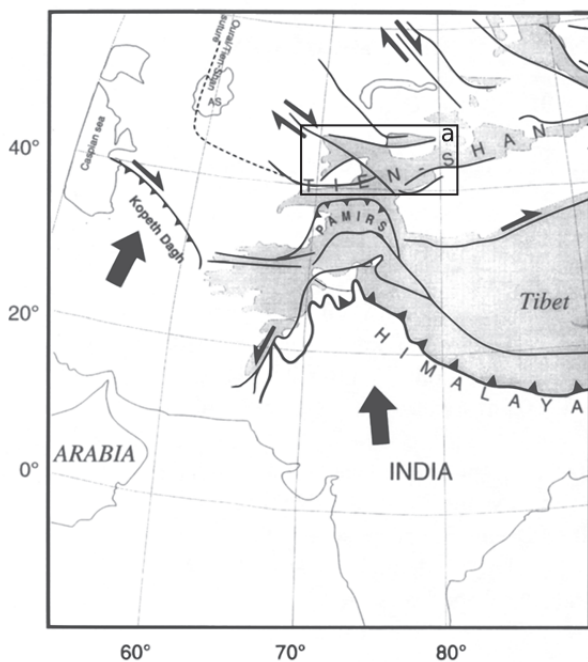


Abb. 2: Schematische tektonische Karte von Süd-Zentralasien, aus BOSSU et al. (1996) mit Lage von Abb. 1 (a).
Fig. 2: Schematic tectonic map of Southern Central Asia from BOSSU et al. (1996) with location of fig. 1 (a).

zwischen Hochgebirge und Sedimentbecken charakterisiert, wodurch vor allem lockere Sedimentgesteine aus Jura, Kreide und Paläogen vorherrschen, siehe Abb. 3. Eine relativ verwitterungsresistente und somit reliefbildende Formation ist ein Kalkstein (Soloth Formation), welcher auch das hier abgebaute Uran führt. Die Landschaft wird durch ein ausgeprägtes Relief mit Höhen von 700 bis 4000 Metern charakterisiert. In Maily-Say herrscht ein trockenes Kontinentalklima mit Schneefall im Winter und starker Abflussbildung durch Schneeschmelze und hohe Niederschläge im Frühjahr.

Aufgrund der tektonischen, geologischen, geomorphologischen und klimatischen Bedingungen ist die Region um Maily-Say generell sehr anfällig für Hangrutschungen (ROESSNER et al. 2005). Hinzu kommen die Bergbauaktivitäten zwischen 1946 und 1968 welche wahrscheinlich einen starken Einfluss auf die Destabilisierung von Hängen hatte. Laut HAVENITH et al. (2006b) gab es vor 1946 nur wenige Hangrutschungen in dem Tal. Mit Aufnahme der Bergbauaktivitäten stieg die Anzahl der Hangrutschungen an (TORGOEV et al. 2002). Im Jahr 1962 waren es bereits ca. 157 Hangrutschungen. Die direkte Verbindung zwischen Bergbauaktivitäten und Rutschungsaktivität ist zu erklären durch Felschwächung durch die Abbauarbeiten, Einstürzen von Stollen und Grundwasseranstieg in den verlassenen Stollen (HAVENITH et al. 2006b). Auch indirekte Prozesse wie Landnutzungsänderung durch den Bevölkerungsanstieg und erhöhtes Verkehrsaufkommen können eine Rolle spielen. Nachdem die Bergbauaktivitäten im Jahr 1968 beendet wurden ging der Anstieg der Hangrutschungsaktivität weiter und verstärkte sich in den 90er Jahren sogar noch. Während dieser späten Periode bildeten sich besonders große Hangrutschungen, wie die Koytash, die Tektonik und die Soloth Hangrutschung im Zentrum des Arbeitsgebietes, welche bis zu 5 Millionen m³ Gestein und Boden umfassen (MINETTI 2004). Dabei ist nicht klar, ob es sich bei den späteren Entwicklungen um Spätfolgen des Bergbaus handelt oder ob andere Faktoren, wie seismische Events oder klimatische Trends diese Entwicklung beeinflusst haben. So kam es z.B. 1992 sieben Wochen nach einem Ms 6,2 Erdbeben 20 km von Maily-Say entfernt bei der Tektonik Hangrutschung zu einem massiven Kollaps (HAVENITH et al. 2006b). Leider gibt es kaum Aufzeichnungen zu Schäden durch das Erdbeben, daher ist es nicht möglich eine klare Verbindung zwischen dem Erdbeben und der Hangrutschung zu ziehen.

3 Datengrundlage und Methodik

3.1 Datengrundlage

Zur Analyse der Hangrutschungssuszeptibilität mit der InfoVal Methode werden grundsätzlich eine Hangrutschungskarte und ein Datensatz mit thematischen Karten bzw. Parametern, welche im Zusammenhang zur Entstehung von Hangrutschungen steht, benötigt.

Zu ersterem Punkt standen für diese Studie Hangrutschungsverzeichnisse für die Jahre 1962, 1984, 1996, 2002 und 2007 zur Verfügung. Diese Verzeichnisse beinhalten jeweils Polygone der Rutschungskörper und Linien für die Abrisszonen. Sie wurden mit Hilfe von alten Luftbildauf-

nahmen, Satellitenbildern, einer sowjetischen geologischen Karte und Geländebeobachtungen erstellt.

Tab. 1: Übersicht über die Eingangsparameter für die Analyse der Hangrutschungssuszeptibilität mit der InfoVal Methode.

Tab. 1: Overview of input parameters for the analysis of landslide susceptibility with the InfoVal method.

Parameter	Reichweite	Klassen- größe	Klassen- anzahl
Alluvium	0/1	-	2
Kolluvium	0/1	-	2
Loess	0/1	-	2
Loess Ränder	0/1	-	2
Geologie	1-8	-	8
Entfernung zu Störungen	0 - 4000 m	500 m	8
Entfernung zu Flüssen	0 - 1700 m	100 m	18
Höhenlage	924 - 1640 m	50 m	15
Hangausrichtung	-1 – 365°	45°	9
Hangform	-2,75 – 5,5	Var.	5
Hangneigung	0-45°	5°	10

Der Datensatz mit den Parametern wurde aus der geologischen Karte (Abb. 3), dem Gewässernetz und einem digitalen Geländemodell (DGM) mit 20 m Zellgröße abgeleitet. Die geologische Karte wurde 2010 im Rahmen einer Masterarbeit erstellt (de Marneffe, 2010). Mit ihrer Hilfe wurden die Parameter Geologie, Alluvium, Kolluvium, Entfernung zu Störungen, Lössverbreitung sowie Ränder der Lössverbreitungen extrahiert. Der letzte Parameter wurde untersucht, da wie in Abb. 3 ersichtlich viele Hangrutschungen an den Rändern der Lössablagerungen entstehen. Die weiteren Parameter, Höhenlage, Hangneigung, Landform (Krümmung) und Ausrichtung wurden mit Hilfe des DGMs erstellt, während aus der Gewässernetzkarte der Parameter Entfernung zu Flüssen extrahiert wurde. Eine Übersicht über die untersuchten Parameter ist in Tabelle 1 gegeben.

3.2 Die InfoVal Methode

Bei der von YIN & YAN (1988) entwickelten InfoVal Methode wird für die einzelnen Klassen eines Parameters nach folgender von VAN WESTEN 1997 vereinfachter Formel ein Wichtungswert bezüglich der Auftretswahrscheinlichkeit von Rutschungen berechnet:

$$\ln W_i = \ln \left(\frac{\text{Densclass}}{\text{Densmap}} \right) = \ln \left(\frac{N_{\text{pix}}(S_i) / N_{\text{pix}}(N_i)}{\sum_{i=1}^n N_{\text{pix}}(S_i) / \sum_{i=1}^n N_{\text{pix}}(N_i)} \right) \quad (1)$$

Dabei ist W_i der Wichtungswert, Densclass die Rutschungsdichte je Klasse, Densmap die Rutschungsdichte der gesamten Karte, $N_{\text{pix}}(S_i)$ die Anzahl der Pixel mit Hangrutschungen innerhalb der i-ten Parameterklasse und $N_{\text{pix}}(N_i)$ die Gesamtanzahl der Pixel der i-ten Klasse. Der W_i für die einzelnen Parameter verrät nun schon etwas darüber, welche Parameterklassen im Zusammenhang mit dem Auftreten von

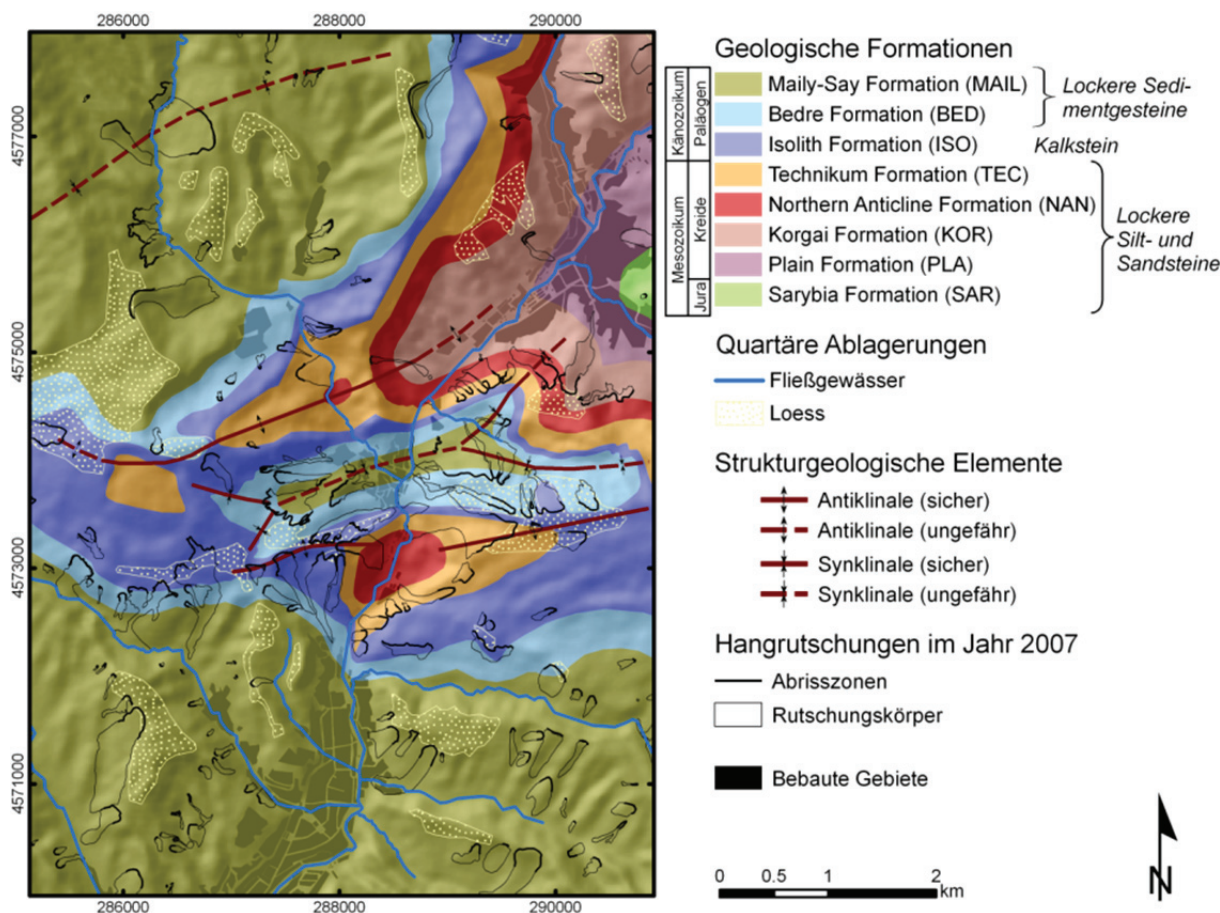
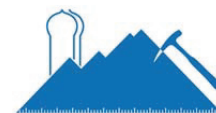


Abb. 3: Geologische Karte des Arbeitsgebietes mit der Verbreitung von Loessablagerungen und Hangrutschungen im Jahr 2007.

Fig. 3: Geological map of the working area showing distribution of loess deposits and landslides in 2007.

Hangrutschungen stehen. Durch Addition der W_i -Werte für jede Rasterzelle kann der Suszeptibilitätsindex berechnet werden. Entsprechend klassifiziert kann dieser für eine Gefahrenkarte genutzt werden. Gewöhnlich wird bei der InfoVal Methode jeweils der gesamte Rutschungskörper berücksichtigt (VAN WESTEN 1997; SAHA et al. 2005). Allerdings wird z.B. bei SÜZEN & DOYOURAN (2004) vorgeschlagen, nur die Abrisszonen zu berücksichtigen. Da hier die Rutschungen entstehen, würden sie besser und präziser die Bedingungen widerspiegeln, welche zur Entstehung von Hangrutschungen führen. Da für diese Studie sowohl Rutschungskörper als auch deren Abrisszonen als Datensätze vorlagen, wurden hier beide Ansätze verfolgt um sie miteinander zu vergleichen.

3.3 Analyse

Die Berechnung des W_i erfolgt im GIS auf Rasterbasis. Shapefiles wurden daher zunächst mit entsprechenden Tools in Raster überführt. Entsprechend der Auflösung des DGM wurde für alle Raster eine Zellgröße von 20 m gewählt. Zudem müssen die Daten in Klassen eingeteilt, also nominal und nicht kontinuierlich vorliegen. Also wurden die Datensätze für Entfernung zu Störungen, Entfernung zu Flüssen, Höhenlage, Hangneigung und Hangkrümmung klassifiziert, siehe hierzu auch Tabelle 1.

Die einzelnen Parameter wurden dann mit der entsprechenden Hangrutschungs- oder Abrisszonenkarte verschnitten

und schließlich der W_i wurde nach Gleichung 1 berechnet. Dieser Schritt wurde für alle 5 Jahrgänge je für die Rutschungskörper und Abrisszonen durchgeführt. Durch Addition der W_i -Karten wurde der Suszeptibilitätsindex berechnet. Durch die Einteilung in sehr geringe, geringe, mittlere, hohe und sehr hohe Suszeptibilität wurde eine Gefahrenkarte für den Jahrgang 1962 erstellt. Diese wurde mit den in den folgenden Jahren neu aufgetretenen Rutschungen verglichen um die Qualität der Vorhersage zu überprüfen.

4 Ergebnisse

Das Ergebnis der Suszeptibilitätskartierung basierend auf Rutschungsdaten ist in Abb. 4 dargestellt. Der Vergleich mit den im Jahr 2007 vorhandenen Hangrutschungen zeigt, dass viele gefährdete Hänge identifiziert wurden, so auch die Hänge, welche in den 90er Jahren die besonders großen Hangrutschungen gebildet haben (im Zentrum der Karte). Andere Hangrutschungen, z.B. im Süden des Gebiets wurden hingegen nicht erkannt. Hierbei handelt es sich in vielen Fällen um Spezialfälle, wie z.B. flache, große Rutschungen im Löss (vgl. Abb. 3). Weiter fällt auf, dass besonders die steilen Hänge in Flussnähe als gefährdet eingestuft wurden, was darauf hinweist, dass vor allem die Hangneigung und die Entfernung zu Flüssen in das Ergebnis eingegangen sind.

Die detaillierte Analyse der Einzelergebnisse hat einige interessante Aspekte über das Zusammenspiel der verschiedenen Einflussfaktoren über den Lauf der Zeit ergeben.

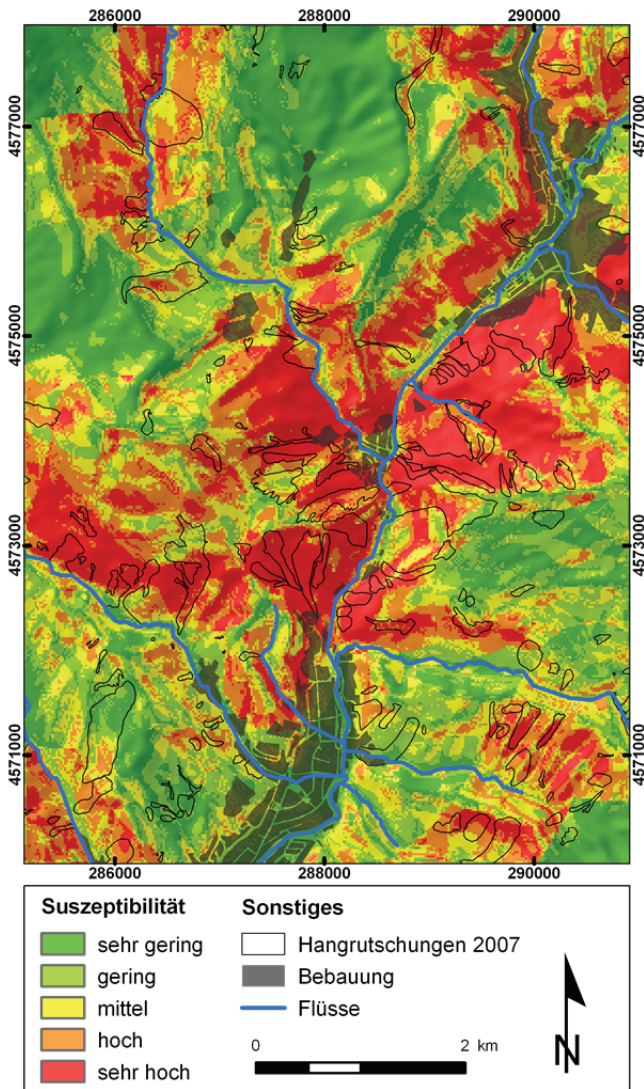


Abb. 4: Einstufung der Rutschungssuszeptibilität für Maily-Say mit der InfoVal Methode basierend auf Rutschungsdaten von 1962.

Fig. 4: Classification of the landslide susceptibility for Maily-Say using the InfoVal method based on 1962 landslide data.

Zunächst hat der Vergleich zwischen Rutschkörper vs. Abrisszone als Eingangsparameter für die meisten Parameter keine signifikanten Unterschiede gezeigt. Eine Ausnahme stellt dabei der Parameter Ränder der Lössverbreitung dar. Hier ist bereits im Vorfeld aufgefallen, dass besonders viele Abrisszonen an den Rändern der Lössverbreitungen liegen (Abb. 3).

Löss ist vor allem auf flachen Plateaus zu finden, wo er aufgrund der fehlenden Hangneigung vor Erosion geschützt ist. Am Rand dieser Plateaus, wo die Hangneigung steiler wird, ist der Löss angreifbar und daher anfällig für Hangrutschungen. In Abb. 5 ist zu sehen, dass der W_i für die Ränder der Lössverbreitung zwischen 1962 und 1996 ansteigt, um danach zu stagnieren. Vor allem der Sprung zwischen 1984 und 1992 könnte auf einen Einfluss des oben erwähnten Erdbebens von 1992. Erdbeben können Löss-Rutschungen direkt triggern, z.B. durch Löss Verflüssigung (Liquefaction), wie auch in China und Tajikistan beobachtet (WANG et al. 2004), oder indirekt, durch das Bilden von Rissen, welche schnelle Wasserinfiltration erlauben und so bei dem

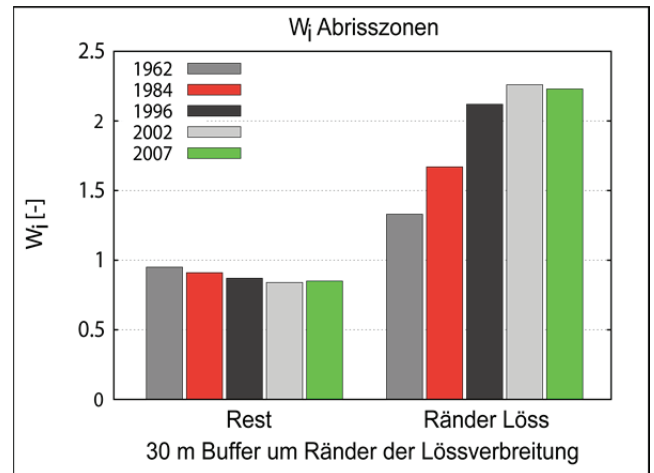


Abb. 5: Histogramm mit dem W_i für Ränder der Lössverbreitung, berechnet mit Abrisszonen als Eingangsparameter.

Fig. 5: Histogram showing the W_i for the loess boundary calculated with scarps as input parameter.

nächsten Regenereignis zum Kollaps führen (HAVENITH & BOURDEAU 2010). Bei dem ersten Fall wäre die Anwesenheit von Bodenwasser, bei dem zweitem ein Niederschlagsereignis Bedingung. Da sich das 1992er Erdbeben im Frühjahr, also der Zeit der hohen Niederschläge ereignete, wären beide Möglichkeiten denkbar. Zusätzlich wäre ein Schwächungseffekt im Löss durch das Erdbeben denkbar, welcher zu einem verzögerten Versagen führen könnten.

Auch das Ergebnis für die Landform weist auf den Einfluss von Erdbeben hin. Hier zeigt sich, dass besonders konvexe Strukturen anfällig für Hangrutschungen sind. Normalerweise gelten konkave Landformen als anfälliger für Hangrutschungen, da sich hier Abflüsse sammeln und der Flurabstand geringer ist, wodurch eine Beeinflussung durch das Grundwasser möglich ist. Bei konvexen Landformen hingegen werden seismische Wellen verstärkt wenn sie an der Oberfläche reflektiert werden. Dieses Phänomen wurde von HAVENITH et al. (2006a) in der Suusamyrges-Region, welche auch im Tien Shan Gebirge liegt, beobachtet.

Eine zeitliche Verschiebung des Einflusses der Hangexposition lässt eine Änderung der klimatischen Bedingungen vermuten. Während 1962 und 1984 noch besonders die Südhänge anfällig für Hangrutschungen waren, so sind es ab 1996 besonders die Nordwest gerichteten Hänge. Da nördlich ausgerichtete Hänge nicht der Sonnenstrahlung ausgesetzt sind, verdunstet hier das Bodenwasser langsamer. Eine hohe Wassersättigung am Hang begünstigt sein Versagen. Durch die hier gemachte Beobachtung lässt sich auf einen stärkeren Effekt des Niederschlages und somit eine Klimaveränderung zu einem feuchteren Klima hin schließen.

Probleme bei der Anwendung der Methode haben sich bei statistisch schlecht verteilten Parametern, wie Geologie, Alluvium, Kolluvium und Loess ergeben. Bei der Geologie liegt z.B. in der kleinsten Klasse (Sarybia Formation, Abb. 3) zufällig eine besonders große Hangrutschung (Datensatz 1962). Diese Klasse erhält einen extrem hohen W_i -Wert was in diesem Fall irreführend und auch in Abb.4 am rechten Rand für den Bereich mit sehr hoher Suszeptibilität verantwortlich ist. Daher sollte darauf geachtet werden, dass die



Parameter statistisch ausreichend verteilt sind um aussagekräftige Ergebnisse erzielen zu können. Auch bei den binären Parametern, wie Alluvium, Kolluvium und Lössergibt sich das Problem, dass die Klasse des Einflussfaktors in Relation zum Rest des Untersuchungsgebietes stark unterrepräsentiert ist. Hier ergaben sich keine aussagekräftigen Ergebnisse, weshalb diese Parameter auch nicht für die Erstellung der Suszeptibilitätskarte verwendet wurden.

5 Schlussfolgerungen

Zur Vorhersage der Rutschungssuszeptibilität wurde basierend auf einem digitalen multitemporalen Hangrutschungsverzeichnis die GIS-basierte statistische „Information Value“ (InfoVal) Methode für ein stark gefährdetes Gebiet im Hochgebirge in Kirgistan angewandt. Hierbei wird das Auftreten von Hangrutschungen in Beziehung zu verschiedenen Faktoren, wie Hangneigung, Geologie und Hydrologie gestellt. Grundlage für die Berechnungen bilden neben dem Hangrutschungsverzeichnis, welches verschiedene Jahrgänge zwischen 1962 und 2007 abdeckt, ein digitales Geländemodell und eine geologische Karte. Das Ziel bei diesem Ansatz ist, aus einem einfachen Datensatz ein Maximum an Information zu generieren und so ohne eine erweiterte Kartierung im Gelände eine Identifizierung von gefährdeten Bereichen vornehmen zu können. Der Vergleich des Ergebnisses der Suszeptibilitätskartierung mit später aufgetretenen Hangrutschungen zeigt, dass einige gefährdete Hänge erfolgreich identifiziert werden konnten, während andere Instabilitäten, wie z.B. flache Rutschungen im Löss, nicht erkannt wurden. Zusätzlich zu der Vorhersage der Suszeptibilität konnte das Verständnis für das Zusammenspiel verschiedener Faktoren verbessert sowie zeitliche Trends bezüglich klimatischer Bedingungen und tektonischer Aktivität erkannt werden.

Literatur

- ALEOTTI, P., CHOWDHURY, R. (1999): Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives - *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **58**: 21–44.
- AYALEW, L., YAMAGISHI, H., UGAWA, N. (2004): Landslide susceptibility mapping using GIS - based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Afgano River, Niigata Prefecture, Japan - *Landslides*, **1**: 73–81.
- BULLEN, M. E., BURBANK, D. W., GARVER, J. I., ABDRAKHMATOV, K. Y. (2001): Late Cenozoic tectonic evolution of the northwestern Tien Shan: New age estimates for the initiation of mountain building - *Geological Society of America Bulletin*, **113**: 1544–1559.
- FELL, R. (1994): Landslide risk assessment and acceptable risk - *Canadian Geotechnical Journal*, **31**: 261–272.
- GUPTA, R. P., JOSHI, B. C. (1990): Landslide Hazard Zoning using the GIS Approach - A Case Study from the Ramganga Catchment, Himalayas - *Engineering Geology*, **28**: 119–131.
- GUZZETTI, F., CARRARA, A., CARDINALI, M., REICHENBACH, P. (1999): Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy - *Geomorphology*, **31**: 181–216.
- HAVENITH, H. B., BOURDEAU, C. (2010). Earthquake-induced Landslide Hazards in Mountain Regions: A Review of Case Histories from Central Asia - *Geologica Belgica*, **13**: 135–150.
- HAVENITH, H. B., STROM, A., CACERES, F., PIRARD, E. (2006a). Analysis of landslide susceptibility in the Suisamyr region, Tien Shan: statistical and geotechnical approach - *Landslides*, **3**: 39–50.
- HAVENITH, H. B., TORGEOV, I., MELESHKO, A., ALIOSHIN, Y., TORGEOV, A., DANNEELS, G. (2006b): Landslides in the Mailuu-Suu Valley, Kyrgyzstan-Hazards and Impacts - *Landslides*, **3**: 137–147.
- DE MARNEFFE, C. (2010): Cartographie et modélisation 3D de la géologie de la vallée de Mailuu-Suu, Tien Shan, Master's Thesis, University of Liège, unpublished, 93p.
- MINETTI, L. (2004): Kyrgyz Republic proposed natural disaster mitigation project, 1st IDA Preparation Mission - Ministry of Environment and Emergency (MEE), Bishkek, 40 S., inedit.
- MOLNAR, P., TAPPONIER, P. (1975): Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a continental collision - *Science*, **189**: 419–426.
- ROESSNER, S., WETZEL, H. U., KAUFMANN, H., SARNAGOEV, A. (2005): Potential of Satellite Remote Sensing and GIS for Landslide Hazard Assessment in Southern Kyrgyzstan (Central Asia) - *Natural Hazards*, **35**: 395–416.
- SAHA, A. K., GUPTA, R. P., SARKAR, I., ARORA, M. K., CSAPLOVIC, E. (2005): An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation-with a case study in the Himalayas - *Landslides*, **2**: 61–69.
- SÜZEN, M. L., DOYURAN, V. (2004): Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a Fmethod and application to Asarsuyu catchment - Turkey, *Engineering Geology*, **71**: 303–321.
- TORGEOV, I. A., ALIOSHIN, Y. G., HAVENITH, H. B. (2002): Impact of uranium mining and processing on the environment of mountainous areas of Kyrgyzstan - in: Merkel, Planer-Friedrich und Wolkersdorfer (Hrsg.), *Uranium in the aquatic environment*, S. 93–98, Springer, Berlin Heidelberg New York.
- VAN WESTEN, C. J. (1997): Statistical landslide hazard analysis, In: *Application guide, ILWIS 2.1 for Windows*. ITC, Enschede, The Netherlands, 73–84.
- VARNES, D. J. (1984): *Landslide hazard zonation: a review of principles and practise*, UNESCO, Paris, 63 S.
- YALCIN, A. (2008): GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations - *Catena*, **72**: 1–12.
- YIN, K. L., YAN, T. Z. (1988): Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks, in: *Proceedings of 5th International Symposium on landslides*, Lausanne, Switzerland, vol. 2, 1269–1272.