

Methoden zur Erstellung und Evaluierung von Gefahrenhinweiskarten für Hangbewegungen: Fallstudie Insel Lombok, Indonesien

Methods for Generation and Evaluation of Landslide Susceptibility Maps:

A Case Study of Lombok Island, Indonesia

Jewgenij Torizin¹, Michael Fuchs¹, Dirk Balzer¹, Dirk Kuhn¹, Yukni Arifianti², Kusnadi³

¹ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Jewgenij.Torizin@bgr.de.

² Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation (CVGHM), Geological Agency Indonesia, yukni.a@gmail.com.

³ Mining and Energy Agency of West Nusa Tenggara Province (Distamben – NTB), Kusnadi85@yahoo.com.

Zusammenfassung

Indonesien ist ein Land, das aufgrund seiner geographischen Lage und geologischen Disposition in besonderem Maße unterschiedlichen Naturgefahren ausgesetzt ist. Darunter stellen auch gravitative Hangbewegungen ein enormes Gefahrenpotenzial dar. Im Rahmen der Technischen Zusammenarbeit mit Indonesien wird der Geologische Dienst von Indonesien im Kontext des Projektes „Verminderung von Georisiken“ im Bereich der Gefahren- und Risikoabschätzung durch die BGR fachlich-methodisch unterstützt. Für die Insel Lombok wurde eine Gefahrenhinweiskarte für Hangbewegungen erstellt. Aufgrund der Größe der zu kartierenden Flächen und begrenzter technischer und personeller Kapazitäten wurden vor allem deduktive Kartierungsmethoden herangezogen. Die Analyse erfolgte in GIS unter Anwendung der statistisch-bivariaten Methode der „gewichteten Evidenzen“. Diese Methode liefert eine Möglichkeit, aus den räumlichen Beziehungen zwischen ausgewählten Parametern und dem Rutschungsinventar fundierte Rückschlüsse über die räumliche Rutschungsempfindlichkeit zu ziehen. Als Parameter wurden Datengrundlagen zur Geologie, der geologischen Strukturen, der Landbedeckung sowie digitale Höhenmodelle herangezogen. Die datengestützte Berechnung der Gewichte liefert eine gute Grundlage, um weitgehend expertenunabhängige und reproduzierbare Gefahrenhinweiskarten zu erzeugen. Die erzeugte Gefahrenhinweiskarte wurde evaluiert.

Schlüsselworte: Gewichtete Evidenzen, GIS, Hangbewegungen, Gefahrenhinweiskarten, Evaluierung, ROC Kurve

Abstract

Due to its geographical position and its geological disposition, Indonesia is highly exposed to natural hazards. Among other prominent hazards such as earthquakes and tsunamis, landslides also contribute significantly to the overall hazard situation, destroying infrastructure and claiming hundreds of casualties every year. In the framework of technical cooperation project “Mitigation of Georisks” between Germany and Indonesia, the Geological Agency of Indonesia is supported in order to improve the hazard and risk assessment methodology with respect to advisory services for regional spatial planning authorities. For the pilot area of Lombok Island, a landslide susceptibility map was generated. Due to the large and partially hardly accessible area as well as the limited technical and personnel capacity of the Geological Agency, indirect mapping supported by remote sensing methods were predominantly used to gather the necessary data. The conducted analysis is based on the bivariate statistical method called Weight-of-Evidence. This method allows to estimate the spatial relations among selected independent parameters and the landslide inventory and enable conclusions about the landslide susceptibility. The parameters geology, tectonic structures, land cover and digital elevation models were used. The data driven computation of the parameter weights provide the basis for generation of reliable and repeatable landslide susceptibility maps. The generated maps were evaluated using a receiver operation characteristic curve (ROC curve), which also provided the basis for susceptibility zonation.

Keywords: weight-of-evidence, landslides, susceptibility maps, evaluation, ROC curve

1 Einleitung

Am Beispiel eines der Projekt-Pilotgebiete, der Insel Lombok, wurde ein neuer ganzheitlicher Workflow zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten erarbeitet, der den gesamten Arbeitsablauf von der Geländeerfassung über datenbankgestützte Speicherung bis hin zur methodenspezifischen Auswertung zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten umfasst. Ziel war es, die Beratungsleistung des indone-

sischen Geologischen Dienstes gegenüber den regionalen Planungsbehörden zu stärken und eine Beratungsbasis für die künftige regionale Raumplanung zu liefern.

Aufgrund der Größe der zu kartierenden Flächen, erschwelter Zugänglichkeit einzelner Regionen sowie begrenzter technischer und personeller Kapazitäten wurde das Augenmerk besonders auf deduktive Kartierungsmethoden und die Nutzung von Daten aus der Fernerkundung gelegt.



2 Methodischer Ansatz

2.1 Methode der gewichteten Evidenzen

Die Methode der gewichteten Evidenzen (Weight-of-Evidence) gehört zu den bivariat-statistischen Verfahren. Zwar findet die Methode ihren Ursprung in der nichtraumbezogenen medizinischen Diagnostik, doch wurde diese erfolgreich in frühen 80-ern des 20. Jahrhunderts zur räumlichen Analyse in der Mineralprospektion angewendet (CHUNG & AGTERBERG 1980; BONHAM-CARTER et al. 1989, BONHAM-CARTER 1994) und später auch, zum Teil modifiziert, in die Gefahrenabschätzung für Hangbewegungen. (VAN WESTEN 2003; CARRARA et al. 2001; NEUHAUSER & TERHORST 2007; BARBIERI & CAMBULI 2009). Nicht zuletzt stellen CORSINI et al. (2009) fest, dass die Methode inzwischen auch in viele andere Bereiche der Geowissenschaften Einzug gefunden hat.

Hinsichtlich der Hangbewegungen wird die Methode zur Analyse des relativen Zusammenhangs zwischen unabhängigen Parametern (Einflussgrößen) und der räumlichen Verteilung der Zielgröße, der Hangbewegungen, herangezogen. Dabei wird der Zusammenhang in Form von Gewichten ausgedrückt. Der mathematische Ansatz ermöglicht es diese Gewichte zu überlagern und somit Muster für die wahrscheinlichste räumliche Verteilung der Ereignisse festzustellen.

Der klassische methodische Ansatz lässt sich wie folgt herleiten. A sei ein definierter zweidimensionaler Raum in dem S Hangbewegungen beobachtet wurden. Ohne, dass wir etwas Bestimmtes über den Raum und die räumliche Verteilung der Hangbewegungen darin wissen, können wir die a-priori Wahrscheinlichkeit ein Hangbewegungsereignis im gegebenen Raum zu finden als Quotient der Ereignisflächen und der Gesamtfläche definieren.

Mit der Zusatzinformation, dass der Raum in N Klassen eingeteilt ist, kann die a-priori Wahrscheinlichkeit in dem Raum eine bestimmte Klasse N_j zu finden äquivalent bestimmt werden. Die konditionelle Wahrscheinlichkeit eine Hangbewegung in einer bestimmten Klasse zu lokalisieren ist dann gegeben durch:

$$P\{S|N_j\} = \frac{P(S \cap N_j)}{P(N_j)}, \quad (1)$$

worin $P\{S|N_j\}$ die konditionelle Wahrscheinlichkeit, $P(S \cap N_j)$ die Schnittmenge von S und N_j und $P(N_j)$ die a-priori Wahrscheinlichkeit der Klasse N_j ist.

Keht man die Fragestellung um und schaut auf die Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Klasse N_j innerhalb der Ereignisfläche anzutreffen, kommt man zu:

$$P\{N_j|S\} = \frac{P(S \cap N_j)}{P(S)}, \quad (2)$$

worin $P\{N_j|S\}$ die konditionelle Wahrscheinlichkeit für den gegebene Fragestellung und $P(S)$ die a-priori Wahrscheinlichkeit von S ist.

Die beiden konditionellen Wahrscheinlichkeiten sind nicht identisch, wie man es vielleicht annehmen könnte. Eine einfache Umformung beider Gleichungen führt zur grundlegenden Gleichung der Methode, dem Bayestheorem:

$$P\{S|N_j\} = \frac{P\{N_j|S\}}{P(N_j)} \cdot P(S). \quad (3)$$

Die weitere methodische Vorgehensweise sieht eine Überführung der Wahrscheinlichkeitsdarstellung in Odds vor, d.h. in ein Verhältnis aus der Wahrscheinlichkeit dass ein Ereignis eintritt und der Gegenwahrscheinlichkeit, dass es nicht eintritt:

$$O\{S|N_j\} = \frac{P\{N_j|S\}}{P\{N_j|\bar{S}\}} \cdot \frac{P(S)}{P(\bar{S})} = \Lambda\{S|N_j\} \cdot O_S, \quad (4)$$

worin $O\{S|N_j\}$ der Odd eine Hangrutschung in der Klasse N_j zu finden, O_S der a-priori Odd eine Hangrutschung zu finden und Λ die Likelihood-Ratio-Funktion darstellen.

Äquivalent werden die Odds auch für die Wahrscheinlichkeit eine Hangrutschung außerhalb einer bestimmten Klasse $O\{S|\bar{N}_j\}$ zu finden gebildet. Dabei markiert ein Überstrich über dem Symbol immer das Gegenereignis bzw. die Gegenwahrscheinlichkeit. Die Likelihood-Ratio-Funktion in den beiden Ausdrücken bildet die Gewichtungskomponente. Dabei wird der positive Ausgang mit dem Gewicht w^+ und der negative mit w^- belegt. Hier gilt zu beachten, dass die Indizes der Gewichte nichts mit ihrem mathematischen Sinn zu tun haben. Weil die Gleichung 4 zusätzlich nochmal logarithmiert wird können beide Gewichte sowohl positive als auch negative Werte annehmen. Für das w^+ ergibt sich dann:

$$w_j^+ = \ln \left[\frac{P\{N_j|S\}}{P\{N_j|\bar{S}\}} \right] = \frac{P(N_j \cap S)}{P(\bar{S})}, \quad (5)$$

und für das w^- :

$$w_j^- = \ln \left[\frac{P\{\bar{N}_j|S\}}{P\{\bar{N}_j|\bar{S}\}} \right] = \frac{P(\bar{N}_j \cap S)}{P(\bar{S})}. \quad (6)$$

Die Differenz der beiden Gewichte ergibt eine zusätzliche Größe, den Kontrast C . Normiert man den Kontrast mit seiner Standardabweichung erhält man den studentischen Kontrast, der meist mit sC indiziert wird. Dieser liefert ein Sicherheitsmaß mit dem der Kontrast bekannt ist. Nach BONHAM-CARTER (1994) ist der studentische Kontrast relativ groß, wenn der Kontrast relativ zu seiner Standardabweichung groß ist und deshalb umso wahrscheinlicher einen wahren Wert angibt.

2.2 Konditionelle Unabhängigkeit

Die Grundannahme in der Methode der gewichteten Evidenzen ist, dass die verwendeten Parameter konditionell

unabhängig sind. Da man bei komplexen Parametern mit mehr als zwei Klassen die Korrelationen nicht von vorn herein ausschließen kann, muss die konditionelle Unabhängigkeit belegt werden. Ein gutes Beispiel für den Einfluss von stark korrelierten Parametern bringen AGTERBERG & CHEN (2002). Demnach wird die posteriori-Wahrscheinlichkeit für ein korreliertes Klassenpaar etwa e^2 mal größer als diese tatsächlich sein sollte.

Für dichotome Parameter ist eine 2x2 Chi-Quadrat Kontingenztafel sehr gut geeignet. Für Parameter mit beliebiger Ausprägung der Klassen empfehlen sich andere Verfahren zur Bestimmung des Kontingenz-Koeffizienten wie z.B. *Pearson's C* oder *Cramér's V*. Für die vorliegende Studie wurde *Cramér's V* als Unabhängigkeitskriterium herangezogen. Die Formulierung der Testgröße leitet sich aus einer Kreuztafel der zwei zu untersuchenden Parameter ab. Der Koeffizient berechnet sich dann als:

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2}{S_n(\min(i, j) - 1)}}, \quad (7)$$

wo χ^2 die Tabellensumme über alle Chi-Quadrat Werte, S_n die Realwertsumme und $\min(i, j)$ die minimale Zahl aus den Spalten und Zeilen der Tabelle. Der Test liefert einen Wert zwischen 0 und 1,0. Hierbei steht 0 für keine Korrelation und 1 für absolute Identität der Parameter. Die Interpretation des Zusammenhangs wurde wie folgt vorgenommen: Die Parameter wurden als nicht bzw. schwach korreliert angesehen bei Werten kleiner als 0,5. Für Werte größer 0,5 wurden die beiden Parameter nicht zusammen in die Analyse einbezogen.

2.3 Evaluierung der Gefahrenhinweiskarten

Ein sensibles Thema innerhalb der statistischen Modellierung ist die Evaluierung der Ergebnisse. Im letzten Jahrzehnt wurden einige interessante Ansätze präsentiert (z.B. CHUNG & FABBRI 2003). Populär ist die Anwendung der sogenannten Receiver Operation Charakteristik Kurve (ROC Kurve), auch Grenzoptimierungskurve genannt. Diese gibt über die Falsch-Positiv oder Falsch-Negativ Rate die Güte des Klassifikationsmodells wieder. Die ROC Kurve wird meist in einem Diagramm dargestellt indem die y-Achse die Fehlerquote und die x-Achse die Trefferquote charakterisiert. Angewendet auf die Hangbewegungen lässt sich das Diagramm wie folgt beschreiben: Nach der bivariat-statistischen Analyse liegt das Ergebnis in Form eines Gebietes vor, das in eine Anzahl eindeutiger Klassen unterteilt ist. Die hohen Gewichte weisen auf eine erhöhte Affinität zum betrachteten Phänomen (Hangrutschungen) hin. Die Klassen werden entlang der x-Achse ihrem Gewicht nach absteigend sortiert. Die y-Achse wird durch das Phänomen beschrieben (z.B. Anzahl oder Fläche der Rutschungen). Die Kurve wird als kumulative Summe der Ereignisse in den jeweiligen Klassen geplottet. Sind die hochgewichteten Klassen signifikant, weisen sie eine höhere Anzahl/Flächen von Hangrutschungen als der Rest auf, d.h. die Kurve steigt am Anfang schneller als sie entlang der x-Achse propagiert. Sind in jeder Klasse annähernd gleiche Anzahl/Fläche von Hangrutschungen vorhanden, steigt die Kurve proportional und bildet nahezu eine Gerade. Ein quantitatives Maß für

die Qualität eines Modells ist die Area Under Curve (AUC). Diese liefert einen Index zwischen 0,5 und 1. Für die Beurteilung kann man als Faustregel folgende Einteilung nutzen:

- $AUC > 0.9$ exzellentes Modell
- $0,9 > AUC > 0.8$ gutes Modell
- $0.8 > AUC > 0.7$ mäßiges Modell
- $AUC < 0.6$ schlechtes Modell

3 Untersuchungsgebiet

Die Insel Lombok gehört zu den Kleinen Sundainseln des Indonesischen Archipels. Die Fläche der Insel umfasst etwa 4.738 km². Die Insel ist vulkanischen Ursprungs und ist durch aktive Vulkane geprägt, die während des letzten Jahrhunderts mehrmals ausbrachen.

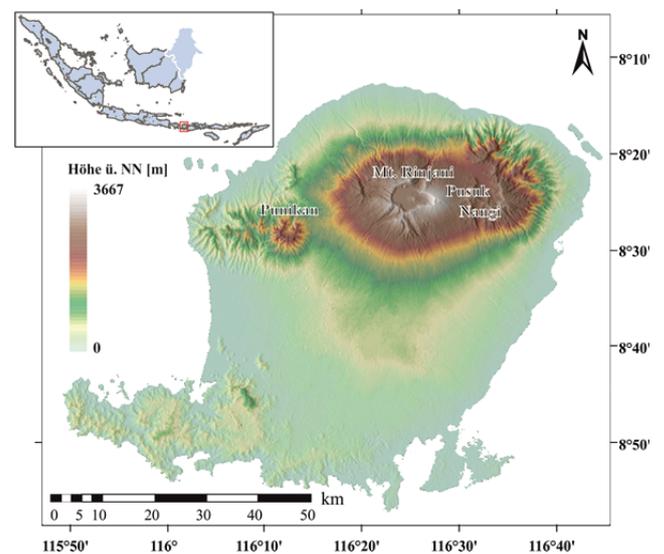


Abb. 1: Geographische Lage und Morphologie der Insel Lombok.

Fig. 1: Geographic position and morphology of the Lombok Island.

Der größte Vulkan der Insel, der Gunung Rinjani, erreicht 3726 m ü. NN und ist im Osten von kleineren Vulkanen Pusuk und Nangi und nach Westen hin von Gunung Puniakan flankiert (s. Abb. 1).

Die Morphologie der Insel wird durch das Erscheinungsbild der Vulkane stark beeinflusst. Die Vulkanhänge sind durch starke Erosionsprozesse gekennzeichnet. Mächtige Lahar-Ablagerungen belegen aktive Erosions- und Umlagerungsprozesse. Der durchschnittliche Jahresniederschlag liegt für die Insel bei über 1800 mm, in höheren Lagen fallen über 2000 mm pro Jahr. Während der Regenzeit wurden in vergangenen Jahren an der Klimastation Mataram einzelne Ereignisse mit bis zu 200 mm/Tag registriert.

Die Geologische Entwicklung der Insel beginnt im Unteren Oligozän mit dem Einsetzen der vulkanischen Aktivität in dem bis dato flachmarinen Gebiet. Vulkanische Sequenzen werden immer wieder durch marine Sedimentfolgen unterbrochen und lassen Phasen niedrigerer vulkanischer Aktivität im Miozän vermuten (SURATNO 1994).

Die heutige Geländeoberfläche wird im Wesentlichen durch die Ablagerungen der jüngeren Eruption der Vulkane Rin-



jani, Pusuk, Nangi und Punikan gebildet. Aus der Gesteinsfolge lassen sich unterschiedliche vorwiegend andesitische Lavaströme, Tuff-, Brekzie-, Bims und Aschelagen aushalten. Neben den vulkanischen Produkten sind vor allem in Süddeilen der Insel arenitische Kalkstein- und Riffablagerungen anzutreffen. Die alluvialen Ablagerungen aus umgelagerten aufgearbeitetem vulkanischen Material sowie Ablagerungen der Küstenfazies bestehen meist aus Kiesen, Sand, Ton, Lignit- und Korallenfragmenten.

4 Datengrundlagen

Die Basis für die statistische Analyse bilden zwei Typen von Daten, das Ereignisinventar sowie die Parameterkarten.

Das Ereignisinventar für die Insel Lombok wird in der digitalen AccessTM-basierten Datenbank „Landslide Inventory Database Indonesia“ (LIDIA) (BALZER 2011; BALZER & TORIZIN 2011) vorgehalten. Die Datenbank basiert auf einem standardisierten Geländeerfassungsblatt (KUHN 2011a, KUHN 2011b) für Hangbewegungen und wurde gemeinsam mit der komplementären Datenbank im Indonesischen Geologischen Dienst implementiert. Die Erfassung und Speicherung der Inventardaten in der Datenbank basiert auf mehreren Quellen. Zum einen wurden alte Feldberichte, Inventare und Karten des geologischen Dienstes ausgewertet und digitalisiert. Zum anderen wurden neue bis dato noch nicht erfasste Ereignisse mittels Techniken aus der Fernerkundung detektiert; darunter Anwendung von *Kontrastfiltern* an ASTER Szenen und visuelle Auswertung von Google Earth. Anschließend Feldbegehungen zur Verifizierung einzelner Ereignisse wurden unternommen.

Insgesamt konnten über 200 Hangbewegungen unterschiedlichster Typen erfasst werden. Davon konnten 147 als natürliche Ereignisse identifiziert werden, während 47 Ereignisse deutlich auf anthropogenen Einfluss zurückzuführen sind. Die Ursache von 24 Ereignissen bleibt ungeklärt. Im Rahmen der Feldbegehungen wurden die Ergebnisse stichprobenartig verifiziert. Dabei konnten auch einige fernerkundlich identifizierte Verdachtsflächen revidiert werden. Die in die Analyse eingeflossenen Ereignisse sind in der Tab. 1 aufgeführt. Als Parameter wurden unterschiedliche Grundlagendaten herangezogen:

- Für die Ermittlung der Hangneigungen (Slope) und der Hangorientierung (Aspect) wurde das frei verfügbare ASTER GDEM Höhenmodell mit 30 m Bodenauflösung verwendet. Die Hangneigung wurde in 5°- Klassen eingeteilt. Die Hangorientierung wurde in der klassischen 8-Klassen (45°-Klassen) Darstellung verwendet.
- Das Entwässerungssystem (Drainage) wurde ebenfalls aus den ASTER GDEM gewonnen. Dabei wurden nur die Kanäle höherer Ordnung nach Strahler Klassifikation für die Analyse eingesetzt. Die Entfernung zu diesen Kanälen wurde als 2-D euklidische Distanz berechnet.
- Für die Lithologie wurden zwei Datensätze vorbereitet. Ein Datensatz (Lithologie-Typ) wurde aus der geologischen Karte im Maßstab von 1:250.000 von MANGGA et al. (1994) abgeleitet. Weitere Kartierun-

gen nach 1994 lieferten besseren Detailgrad im Hinblick auf einzelne Lavaströme, und wurden in dem zweiten Datensatz (Lithologie–Lavaströme) kompiliert.

- Aus Landsat 5 Szenen wurde eine Lineament-Analyse durchgeführt. Aus der Lineament-Karte wurde eine Lineamenten-Dichtekarte berechnet. Da es sich hierbei um einen kontinuierlichen Datensatz handelt, wurde er in 10 gleichgroße Klassen eingeteilt.
- Die Landbedeckung wurde aus Landsat und MODIS Szenen abgeleitet durch ungestützte Klassifikation, Hauptkomponentenanalyse (PCA) und Maximum Likelihood Schätzer abgeleitet. Während der Geländebegehungen wurden diese Klassifikationen stichpunktartig verifiziert.
- Die Morphometrie wurde nach WOOD (1996) aus dem ASTER GDEM Höhenmodell abgeleitet. Das dazu notwendige Modul stellt das Open Source GRASS GIS zur Verfügung.
- Der Vegetationsindex (Enhanced Vegetation Index) wurde aus MODIS Szenen für die Periode 2000-2010 abgeleitet.
- Der Niederschlag wurde aus dem globalen Klimadatensatz von HIJMAN et al. (2005) abgeleitet.

Tab. 1: Übersicht der Hangbewegungstypen (nach VARNES 1984) auf der Insel Lombok.

Tab. 1: Overview of the different mass movement types (after VARNES 1984) and subtypes affecting the investigation area of Lombok island.

Type	Subtyp	Anzahl
Rutschung	Rotational	77
Rutschung	Translational	69
Fließen	Mure	31
Fließen	Kriechen	1
Sturz	Felssturz	5
Kippen	Kippen	2
Driften	Felsdrift	1
ohne Klassifikation	-	23

5 Analyse und Ergebnisse

Die methodische Analyse erfolgte unter Nutzung der Geographischen Informationssysteme (GIS) in vier wesentlichen Schritten: Datenaufbereitung, Datenanalyse, Ergebnisevaluierung und Nachbereitung der Ergebnisse.

Während die Konzeption der LIDIA es ermöglicht die Inventardaten direkt ins GIS einzubinden und auszuwerten, mussten die im Kapitel 4 beschriebenen Parameterdaten erst in Rasterdaten gleicher Auflösung überführt werden. Der Inventardatensatz wurde in zwei Teile separiert. Der erste Teil wurde für die Kalibrierung des statistischen Modells eingesetzt, der zweite für die Modellevaluierung genutzt.

Im zweiten Schritt erfolgte die Berechnung der Gewichte für die einzelnen Parameterklassen. Dies erfolgte automatisiert unter Anwendung der eigens programmierten Werkzeuge für ArcGIS (TORIZIN 2012). Nach der Gewichtung der Parameter wurden ROC Kurven für jeden einzelnen Parameter berechnet. Damit lässt sich die Signifikanz jedes einzelnen Parameters bereits abschätzen. Es ist gerade bei redundanten Datensätzen, wie z.B. Lithologie mit unterschiedlichem Detailgrad von Bedeutung den geeigneteren Datensatz in die Analyse einzubeziehen. Die Tab. 2 zeigt das Ranking der eingesetzten Parameter nach ihrem AUC Index.

Tab. 2: Ranking der Parameterkarten nach ihrem AUC Index.

Tab. 2: Ranking of the parameter maps due to their AUC Index.

Rang	Parameter	AUC Index
1	Hangneigung	0,84
2	Lithologie II (Lavaströme)	0,81
3	Lineament-Dichte	0,74
4	Landbedeckung (MODIS 2009)	0,73
5	Entfernung zu Lineamenten	0,70
6	Landbedeckung (LANDSAT 5)	0,70
7	Niederschlag	0,69
8	Entfernung zu Drainagekanälen	0,65
9	Lithologie I (Typ)	0,62
10	Aspekt	0,60
11	Morphometrie	0,58
12	Vegetationsindex (EVI)	0,56

Im nächsten Schritt der Datenanalyse wurde der Unabhängigkeitstest für die Parameter, die in die gewichtete Überlagerung einbezogen werden sollen, durchgeführt. Dabei lassen sich keine signifikanten Abhängigkeiten zwischen den Schlüsselparametern feststellen (s. Tab. 3). Anschließend wurde eine stufenweise Aufsummierung (gewichtete Überlagerung) der Parameter entsprechend ihrem Ranking durchgeführt. Nach jedem neuen Parameter wurde die ROC Kurve erneut berechnet um eine Änderung am Gesamtmodell festzustellen. Lieferte ein Parameter keine positive Veränderung des AUC Indexes wurde er in dem Gesamtmodell vernachlässigt.

Die stufenweise Aufsummierung der Parameter zeigte, dass nach dem vierten Parameter keine signifikante Änderung der AUC Kurve eintrat. Somit bestand das finale Modell aus den vier stärksten Parametern, die dann als Grundlage in die Kartenerstellung einfließen. Die Evaluierung des Modells zeigte einen AUC Index für die Kalibrierungsdatensatz von 0.87 und 0.83 für den Testdatensatz.

Die Nachbereitung umfasste die Layout-Gestaltung der fertigen Karte und Einteilung der Zonen anhand der ROC Kurve vom Testdatensatz (s. Abb. 2).

Tab. 3: Unabhängigkeitstest: Cramér's V für einzelne Parameterpaare.

Tab. 3: Conditional independence test: Cramér's V for the particular parameter pairs.

Rang	Hangneigung	Lithologie II	Lineament-Dichte	Landbedeckung II
Hangneigung	1,0	-	-	-
Lithologie II	0,18	1,0	-	-
Lineament-Dichte	0,30	0,43	1,0	-
Landbedeckung II	0,25	0,42	0,33	1,0

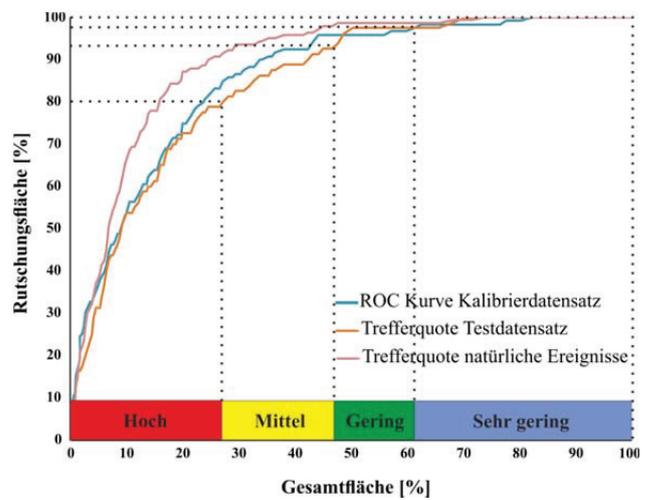


Abb. 2: ROC Kurven von drei Datensätzen: Kalibrierungsdatensatz, Testdatensatz und einen Datensatz in dem nur natürliche Ereignisse berücksichtigt wurden. Die Zoneneinteilung erfolgte anhand der ROC Kurve für den Testdatensatz.

Fig. 2: ROC curves of the three datasets: the calibration dataset, the test dataset and a dataset which contains only the natural events. The zonation was done using the test dataset ROC curve.

Das Ergebnis ist ein Entwurf der Gefahrenhinweiskarte für die Insel Lombok in einem Maßstab von 1:125.000 (Abb. 3). Die Einteilung der Zonierung erfolgte entsprechend der indonesischen Norm in vier Klassen.

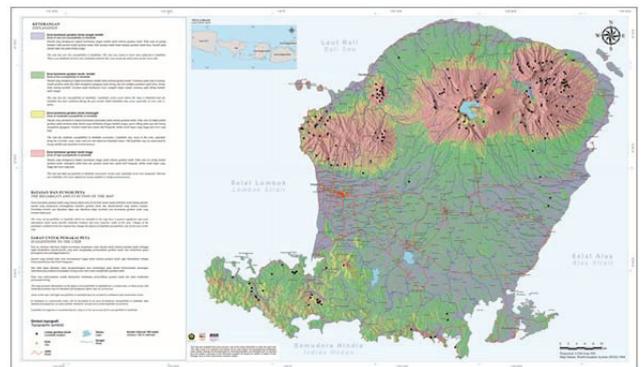


Abb.3: Entwurf der Hangbewegungen-Gefahrenhinweiskarte für die Insel Lombok.

Fig. 3: The draft of the landslide susceptibility map of the Lombok Island.



6 Diskussion

Das aufgesetzte statistische Modell liefert eine gute Erklärung für die Hangbewegungen in der Vergangenheit. Die Gültigkeit des Modells für vermeintlich zukünftigen Hangbewegungen (Testdatensatz) kann ebenfalls als gut eingestuft werden. Die quantitative Zonierung anhand der ROC Kurve ist reproduzierbar und einfach nachzuvollziehen. Zwar lassen sich anhand dieser Karte keine Prognosen über einzelne Hangbewegungen vorhersagen, doch können einige substantielle Aussagen zu ihrer wahrscheinlichsten Verteilung gemacht werden. D.h. würde man in einer bestimmten Zeitperiode hundert Ereignisse auf der Insel Lombok erwarten, so werden 80 % von diesen mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit in der als hochempfindlich identifizierten Region stattfinden. Mit solchen Informationen lassen sich bereits Richtlinien und Entscheidungshilfen für eine strategische Regionalplanung ableiten.

Eine genauere Betrachtung der Karte lässt erkennen, dass auch die Zone, die als sehr gering empfindlich ausgezeichnet ist, noch vereinzelt Rutschungen aufweist. Eine genauere Analyse dieser vermeintlichen Fehltreffer ergab, dass vor allem die durch Menschen verursachten Hangbewegungen in dem Modell nur sehr schlecht erfasst werden. Die Erklärung dafür liegt in der Auflösung der verwendeten Datensätze sowie fehlenden Datensätzen, die diese Art von Eingriffen in die natürlichen Bedingungen charakterisieren würden. Das verwendete Höhenmodell ist z.B. zu grob aufgelöst um die menschengemachten Hanganschnitte beim Straßenbau zu detektieren. Ebenfalls bleiben Hangveränderungen infolge vom Bergbau aufgrund der geringen Geländemodellauflösung meist. Aufgrund des illegalen Bergbaus sind nur wenige Stellen genau kartiert. Eine Ausweisung solcher Flächen würde gewiss einen zusätzlichen wichtigen Parameter liefern können. Allerdings müssten dann auch geotechnisch gesicherte Straßenabschnitte extra aufgeführt werden, da dort prinzipiell, bei vernünftiger Wartung, mittelfristig die Gefahr eines Hangversagens abgewendet werden kann. Eine einfache Testrechnung für einen Datensatz, in dem alle menschenverursachte Hangbewegungen entfernt wurden, lieferte bereits einen AUC Index von 0,9. Damit kann man davon ausgehen, dass natürliche Gefahrenstellen bei Identifizierung der regionalen Schlüsselparameter sehr gut erfasst werden konnten.

In der vorliegenden Studie wurden unterschiedliche Rutschungstypen aufgrund des geringen Inventardatenbestandes zusammenfassend behandelt. Im Idealfall würde man für jeden Rutschungstyp eine eigene Karte generieren, da für unterschiedliche Rutschungstypen unterschiedliche Schlüsselparameter zum Tragen kommen. Hierfür war aber im vorliegenden Untersuchungsgebiet die zugrundeliegende Datenbasis nicht ausreichend. Ausbau der Datenbasis z.B. durch konsequente Fortführung des Inventars ist aber auch dieser Schritt möglich.

Literatur

AGTERBERG, F. P. & CHENG, Q. (2002): Conditional independence Test for Weights-of-Evidence Modeling. – *Natural Resources Research*, 11: 249-255.

- BALZER, D. & KUHN, D. (2011): Getting Started with the Landslide Inventory Database Indonesia (LIDIA) – BGR-Technical Report (Administration-Number: B10604-07), 9 S., Hannover.
- BALZER, D. & TORIZIN, J. (2011): Utilization of the Landslide Inventory Database Indonesia (LIDAI) in a GIS Environment - a Workflow): BGR-Standard Module 'Landslides'. – BGR-Technical Report, 15 S., Hannover.
- BARBIERI, G. & CAMBULI, P. (2009): The weight of evidence statistical method in landslide susceptibility mapping of the Rio Pardu Valley (Sardinia, Italy). – Veröff. 18. World IMACS/MODISM Congress, Cairns, Australia, 13.-17. Juli 2009. <http://mssanz.org.au/modsim09>
- BISHOP, M. M., FIENBERG, S. E. & HOLLAND, P. W. (1975): Discrete Multivariate Analysis: Theory and Practice. – 587 S., Massachusetts (MIT Press Cambridge).
- BONHAM-CARTER, G. F., AGTERBERG, F. P. & WRIGHT, D. F. (1989): Weight of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential. – *Statistical Applications in Earth Sciences*, 89 (9): 171-183.
- BONHAM-CARTER, G. F. (1994): Geographic Information Systems for Geoscientist. Modelling with GIS. – 1. Auflage, 398 S., Ontario (Pergamon).
- CHUNG, C. F. & FABBRI, A. (2003): Validation of Spatial prediction models for landslide hazard mapping. – *Natural Hazards*, 30: 451-472.
- CORSINI, A., CERVI, F. & RONCHETTI, F. (2009): Weight of Evidence and artificial neural networks for potential groundwater spring mapping: an application to the Mt. Modino area (Northern Apennines, Italy). – *Geomorphology*, 111: 79-87.
- HIJMANS, R. J.; CAMERON, S. E., PARRA, J. L., JONES, P. G., JAERVIS, A. (2005): Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas, *Int. J. Climatol.*, 25: 1965–1978.
- KUHN, D. (2011a): Landslide Survey Data Sheet (LSDS): BGR-Standard Module 'Landslides'. – BGR-Technical Report, 6 S.
- KUHN, D. (2011b): Guideline for Applying the Landslide Survey Data Sheet (LSDS): BGR-Standard Module 'Landslides'. – BGR-Technical Report, 94 S., Hannover.
- NEUHÄUSER, B. & TERHORST, B. (2007): Landslide Susceptibility assessment using „weights-of-evidence“ applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany). – *Geomorphology*, 86: 12-24.
- TORIZIN, J. (2012): Landslide Susceptibility Assessment Tools for ArcGIS 10.0 and their Application. – Veröff. 34. IGC, Brisbane, 05.-10. August 2012.
- VAN WESTEN, C., RENGERS, N. & SOETERS, R. (2003): Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. – *Natural Hazards*, 30: 399-419.
- SURATNO, N. (1994): Peta Geologi dan Potensi Bahan Galian Nusa Tenggara Barat, skala 1:250.000. Kantor Wilayah Departemen Pertambangan dan Energi NTB.
- MANGGA, S., ATMAWINATA, S., HERMANTO, B. & AMIN, T. C. (1994): Geologi Lembar Lombok, Nusatenggara, skala 1:250.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.