

Untersuchung von Kriechprozessen in stark plastischen Tonböden auf der Atlantikinsel Madeira

Investigation of creep movement processes in hyperplastic clays on the Atlantic Island Madeira

Joerg Schrader¹

¹ Dipl.-Geol. Joerg Schrader, Lehrstuhl für Ingenieur- und Hydrogeologie (LIH), RWTH Aachen, joerg@schrader-bonn.de

Zusammenfassung

Auf der Vulkaninsel treten häufig Schäden an Gebäuden und Infrastruktur auf, die im Zusammenhang mit Kriechprozessen stehen. Besonders der im Südosten der Insel, in der Stadt Machico, finden in den flachen Hangbereichen Kriechprozesse in kolluvialen Ablagerungen statt. Primäre Ursache der Bewegungen ist das oberflächliche Anstehen eines stark plastischen Tons (Vertisol). Um eine Grundlage für Lösungsansätze zur Prävention von Sachschäden zu schaffen, wurden auf Basis einer Feldkartierung sowohl eine Inventar- als auch eine Suszeptibilitätskarte für Massenbewegungen angefertigt, welche die Rutschungsanfälligkeit der identifizierten Vertisole verdeutlichen. Darüber hinaus wurde unter Zuhilfenahme eines terrestrischen Laserscanners (TLS) ein 3D-Oberflächenmodell eines Hanges mit mehreren Kriechkörpern erstellt. Tonproben aus diesen Kriechkörpern wurden ingenieurgeologisch untersucht, um ein Verständnis über die vorherrschenden Prozesse und ihre geotechnischen und tonmineralogischen Einflussfaktoren zu erlangen. Aufgrund der ungünstigen geotechnischen Eigenschaften treten differentielle Bewegungen nicht nur parallel, sondern auch orthogonal zu Hängen auf, was eine starke mechanische Beanspruchung hierauf gründender Bauwerke zur Folge hat.

Schlüsselworte: Kriechen, stark plastisch, Ton, Vertisol, Madeira, TLS, Pulverquellversuch

Abstract

Madeira Island is located in the north Atlantic, 900 km southwest of Lisbon. The island is of volcanic origin, generally interpreted as being on a hotspot. Predominantly eruptive rocks form the island: basanites, trachites and pyroclastic rocks. Sedimentary rocks are mainly colluvial, alluvial and marine gravel. Due to the strong relief of the island, areas with moderate slopes for settlements are rare. In Machico valley, in the south-east part of the island, slopes are more moderate. The geological environment is characterised by thick basaltic lava flows and ash layers, intersected by dykes covered by colluvial deposit. It is in this deposit that unstable areas are located and landslide movements cause damage in buildings and infrastructures. The main reason of movements in colluvial deposits is highly plastic clay (Vertisol). To understand landslide behaviour, soil samples were analysed in order to specify and quantify geotechnical parameters and their mineralogy. By using the Terrestrial Laser Scanner (TLS), a 3-D surface model of a creep moving landslide area is produced. Based on the field mapping two maps were created: firstly an inventory and secondly a susceptibility map of the mass movements.

Keywords: Creep movement, highly plastic, Clay, Vertisol, Madeira, TLS, Powder Swelling Test

1 Einleitung

Diese portugiesische Insel Madeira liegt 900 km südwestlich entfernt vom portugiesischen Festland im Atlantischen Ozean. Sie bildet zusammen mit Porto Santo, den Ilhas Desertas und den Ilhas Selvagens die gleichnamige Inselgruppe Madeira. Die Insel Madeira weist in N-S-Richtung eine maximale Breite von 22 km sowie in E-W-Richtung eine maximale Länge von 55 km auf. Mit 726 km² und etwa 240.000 Einwohnern (ANMP¹², 2006) ist sie die größte Insel des Archipels. Der Pico Ruivo bildet mit einer Höhe von 1.861 m über NN die höchste Erhebung der Insel. Eines der höchsten Kliffs Europas mit einer Höhe von 560 m ist an der

Küste Madeiras lokalisiert. Das insgesamt hohe Relief der Insel spiegelt sich in steilen Berghängen und Küstenabschnitten wieder. Enge, tiefe und u-förmig profilierte Täler kennzeichnen das noch junge hydrographische Netzwerk der Insel (PRADA ET. AL. 2005).

Siedlungsflächen sind aufgrund des ausgeprägten Reliefs Madeiras nur begrenzt vorhanden. Entsprechend bilden die küstennahen Regionen mit moderaten Hangneigungen die bevorzugten Siedlungsräume. So konzentriert sich die madeirische Bevölkerung weitgehend auf den flacheren Süden der Insel, mehr als ein Drittel lebt in der Hauptstadt Funchal. Neben der Hauptstadt gehört auch die im Südwesten gelegene Stadt Machico zu den bevorzugten Siedlungsräumen. Aufgrund ungünstiger geotechnischer Eigenschaften der tonigen Böden, welche die Talflanken Machicos prägen,

¹² Associação Nacional de Municípios Portugueses (Nationale Vereinigung der portugiesischen Gemeinden)



sind in diesem Gebiet verbreitet Kriechbewegungen zu beobachten. In einigen Fällen führen diese Bewegungen zur vollständigen Zerstörung von Häusern (s. Abb. 1) und der Infrastruktur. Zudem kommt es bei Straßenböschungen im Festgestein vermehrt zu Felsstürzen.



Abb. 1: Beispiel eines durch Kriechprozesse im Untergrund vollständig zerstörten Hauses im Untersuchungsgebiet

Fig. 1: Example of a total collapsed house in the investigation area. Destroyed by creep movement processes in the underground.

Ziel der Arbeit war es dementsprechend die Kriechprozesse unter verschiedenen Gesichtspunkten zu untersuchen. So wurden die Massenbewegungen im Feld kartiert, Bodenproben entnommen und die Oberflächengeometrie eines Hangbereichs mittels LiDAR-Technik aufgenommen. Im Folgenden die Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt und diskutiert.

2 Feldkartierung

Angefangen wurden mit einer Geländekartierung zur Erfassung der Festgesteins- und Lockergesteinsgrenzen, der Abbruch- und Ablagerungsgebiete von Felsstürzen und insbesondere von Kriechbewegungen betroffene Hangbereiche. Ziel war die Anfertigung einer Inventarkarte der Massenbewegungen und daraus resultierender Schadensfälle im Kartierungsgebiet.

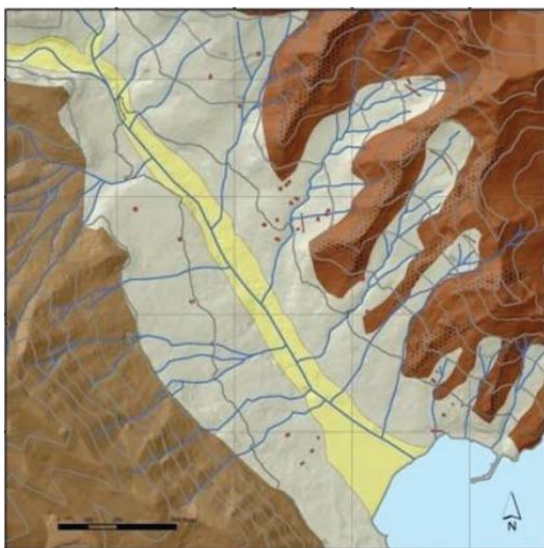


Abb. 2: Geologische Karte des Untersuchungsgebiets (dunkelbraun: Festgestein Piacenzium, hellbraun: Festgestein Holozän, grau: Lockergestein Kolluvium, gelb: Lockergestein Alluvium).

Fig. 2: Geological map of the investigation area (dark-brown: hardrock piacenzium, light brown: hardrock holozän, grey: softrock colluvium, yellow: softrock alluvium).

Im Bereich der Stadt Machico stehen neben fluviatilen Tal-füllungen und unterschiedliche, geringmächtige Böden auf den Hängen, Festgesteine aus Basanite, Lapilli-Aschetuffe und Tholeiitbasalte an. Im Rahmen der Kartierungsarbeiten erfolgten eine geochronologische Gliederung der Festgesteine und eine Gruppierung der Lockergesteine unter dem Gesichtspunkt des Sedimentationsmechanismus. So wurde zwischen alluviale und kolluviale Lockergesteine, sowie Festgesteinen aus dem Piacenzium und dem Holozän unterschieden (s. Abb. 2). Im Hinblick auf den o.g. Fokus ist im Kartiergebiet das „Lockergestein Kolluvium“ die relevante geologische Einheit, da Kriechbewegungen nur dort auftreten. Insbesondere die aus stark plastischen Tonen bestehenden Vertisole, die in Hängen bis zu einer maximalen Höhe von 200 m NN mit moderater Neigung verbreitet sind, begünstigen die Ausbildung von Kriechprozessen.

2.1 Inventarkarte der Massenbewegungen

Die angefertigte Inventarkarte der Massenbewegungen (s. Abb. 3) im Untersuchungsgebiet veranschaulicht die Flächen die von im Gelände als Massenbewegungsflächen identifiziert wurden.

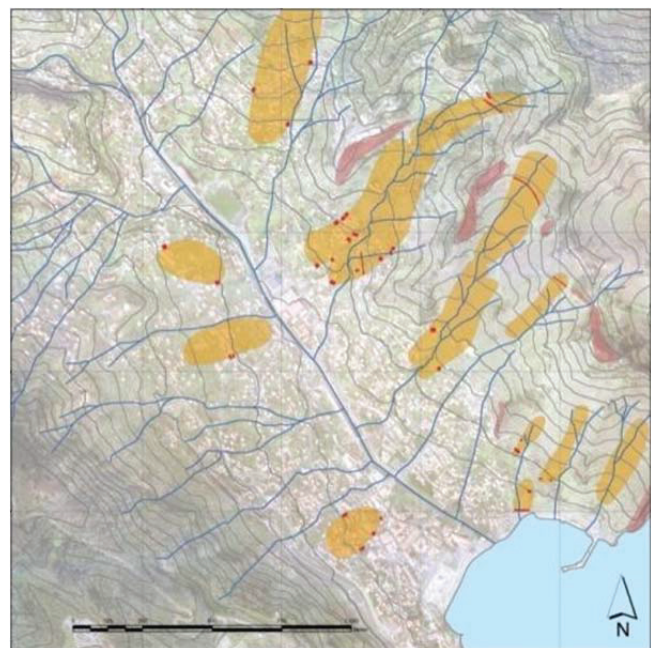


Abb. 3: Inventarkarte der Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet (orange: Kriechen, rosa: Felssturz, rot: Schaden).

Fig. 3: Inventory map of massmovement in the investigation area (orange: creep movement, pink: rockfall, red: damage).

Nur etwa 10 % dieser Rutschungsflächen entfallen auf Felssturzgebiete, die sich im Nordosten des Kartiergebiets befinden. Felssturzgebiete liegen entweder im Böschungsbereich von Straßen, im Kliffbereich an der Küste, an einem Steinbruch oder an der Flanke einer Dykestruktur.

Rutschungen werden hauptsächlich durch Kriechprozesse verursacht. Diese Kriechkörper sind aufgrund ihrer geringen Geschwindigkeit im Gelände schwer zu kartieren, da viele Rutschungsindikatoren sehr diffus in ihrer Ausprägung sind. Demzufolge mussten die Rutschungskörper auf Grundlage der festgestellten Schadensfälle sowie der Oberflächen-

geometrie identifiziert werden. Drei der insgesamt acht kriechenden Rutschungsstrukturen liegen im Südwesten, die restlichen fünf im Nordosten des Kartiergebiets. Zwei der nordöstlichen Rutschungsstrukturen sind in ihrer Ausprägung komplex und zeigen unterschiedliche Bewegungsrichtungen auf.

2.2 Untersuchung der Bodenproben

Aus einem der kartierten Rutschungskörpern wurden Bodenproben entnommen und im Labor hinsichtlich ihrer bodenmechanischen Kennwerte und ihrer tonmineralogischen Eigenschaften untersucht. Die Probenentnahmeorte sind in Abbildung 4 dargestellt. Insgesamt wurden sechs gestörte Proben (Ma_001 – Ma_006) sowie zwei ungestörte Proben (Ma_Scher_01 – Ma_Scher_02) oberflächennah entnommen.

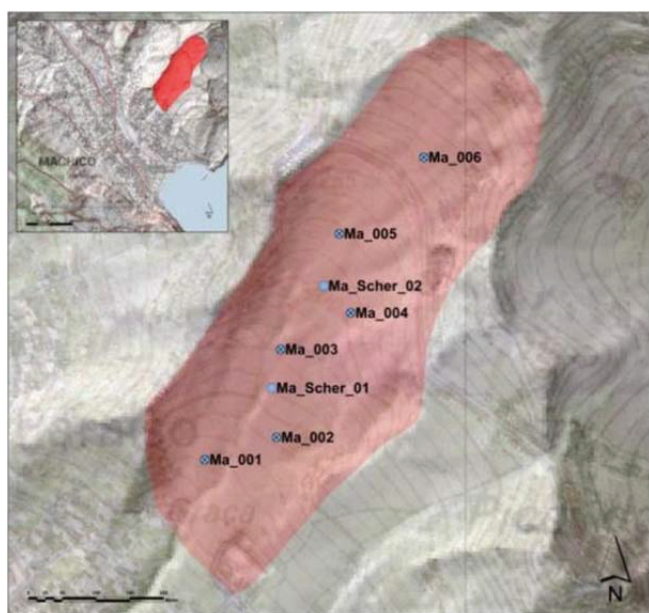


Abb. 4: Entnahmeorte der Bodenproben.

Fig. 4: Locations of the collected soil samples.

Ziel der Laboranalyse waren quantitative Aussagen über die ungünstigen Eigenschaften der Vertisole. Von diesen wurde angenommen, dass sie für die festgestellten Rutschungen im Kartier- und Untersuchungsgebiet verantwortlich sind. Die Ergebnisse der durchgeführten geotechnischen und mineralogischen Untersuchungen sind in den Tabellen 1 und 2 dargestellt.

Tab. 1: Ergebnisse der geotechnischen Laboruntersuchungen

Tab. 1: Results of the geotechnical laboratory tests.

Versuchsart		Versuchsergebnisse		
		Minimum	Maximum	Einheit
Wassergehalt	w	30,4	41,1	[%]
Wasseraufnahmefähigkeit	w _A	90,4	93,8	[%]
Korndichte	ρ _s	2,62	2,71	[g/cm ³]
Konsistenzgrenzen	w _L	81,0	83,7	[%]
	w _P	27,6	32,0	[%]

	I _P	50,9	54,1	[%]
	I _C	0,87	1,0	[-]
Aktivitätszahl	I _A	1,4	2,1	[-]
Korngrößenverteilung	U	t, fs', ms'		
	C _U	7,8	13,6	[-]
	C _C	0,2	0,5	[-]
Scherfestigkeit	c' _f	28,93	31,46	[kN/m ²]
	c' _R	27,50	39,67	[kN/m ²]
	φ' _f	13,15	13,28	[°]
	φ' _R	9,52	9,78	[°]
Quellhebung		18,9	21,3	[%]

Tab. 2: Ergebnisse der mineralogischen Laboruntersuchung

Tab. 2: Results of the mineralogical laboratory test.

Mineralgruppe	Mineral	Volumenprozent [%]	+/- [%]
Tonminerale	Smektit	68,76	0,81
	Kaolinit	7,14	0,36
	Chlorit	2,48	0,28
Oxide	Quarz	3,21	0,30
	Perowskit	0,66	0,11
	Hämatit	2,42	0,18
	Anatas	2,84	0,22
Glimmer	Muskovit	2,87	0,29
Feldspäte	Albit	9,63	0,30

Die hier festgestellten Konsistenzgrenzen klassifizieren die untersuchten Bodenproben als ausgeprägt plastischen Ton mit einem sehr großen Bildsamkeitsbereich. Die natürlichen Wassergehalte der im Gelände oberflächlich trocken erscheinenden Böden, liegen nah an den im Labor ermittelten Plastizitätszahlen. Aufgrund ihrer Nähe zur unteren Grenze innerhalb des Bildsamkeitsbereiches haben Schwankungen in den Wassergehalten folglich einen direkten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Bodens.

Aufgrund der plastischen Eigenschaften der untersuchten Bodenproben wurden Mithilfe von Scherversuchen besonders flache Reibungswinkel gemessen. Zudem wurde mittels Pulverquellversuchen nach RAUH & THURO (2007) auch das hohe Quellpotenzial der Vertisole im Labor quantifiziert. Im Rahmen der Laboruntersuchungen konnten darüber hinaus die Ergebnisse der Scherversuche mit den Ergebnissen der tonmineralischen Untersuchungen in Bezug gesetzt werden: So haben die Böden aufgrund ihres Bentonitgehalts zwischen 25 % und 35 % eine starke Tendenz zur Quellung, die den in den Scherversuchen aufgetragenen Normalspannungen in Form von Quelldrücken entgegenwirkt.

2.3 Datenaufnahme mit der LiDAR-Technik

Ergänzend zum labortechnisch untersuchten Rutschungskörper erfolgte eine geometrische Analyse zur Bestimmung von Ablations- und Akkumulationsbereiche infolge einer Massenverlagerung. Aufgrund des langsamen Prozessablaufs wurden Geländevermessungen im Mai 2008 und im Februar 2010 durchgeführt und anschließend miteinander



verglichen. Dieser Vergleich wurde aus vier unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen im Hinblick auf die Differenzwerte zwischen den Oberflächen der beiden zeitversetzten Messungen durchgeführt, die in der jeweiligen Betrachtungsrichtung aufeinanderfolgen. Die resultierenden Differenzbilder weisen einen Wertebereich der Positionsdifferenzen der Messpunkte zwischen +5 m und -5 m auf.

Zunächst wurden die einzelnen Messpunkte orthogonal zur Horizontalen (d.h. in z-Richtung) auf Positionsdifferenzen untersucht. Im Folgenden wurden zusätzlich Differenzen zwischen Messpunkten in den Richtungen 207/14, 180/09 und 229/12 berechnet, da diese die Haupteinfallrichtungen der Hangneigung bilden. Die hieraus entstehende Differenzbilder zeigen Häufungsbereiche die in Abb. 5 als Ablationsbereiche (negative Differenzwerte) bzw. Akkumulationsbereiche (positive Differenzwerte) eingezeichnet wurden.

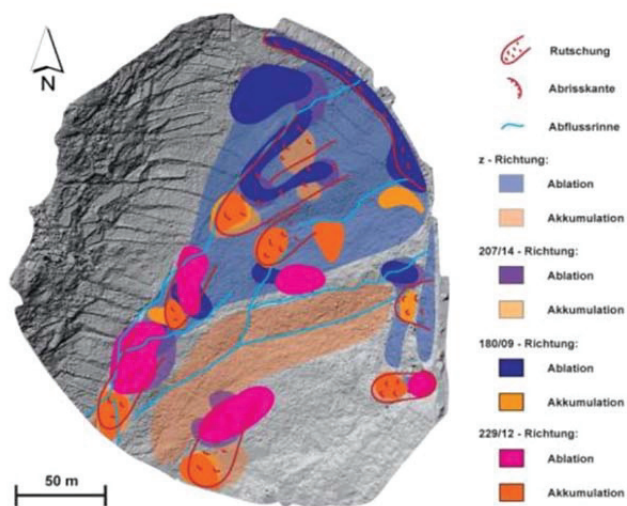


Abb. 5: Darstellung aller Ablations- und Akkumulationsbereiche in Kombination mit den identifizierten Rutschungsstrukturen..

Fig. 5: Areas of ablation and accumulation in combination to the identified landslides.

Durch den Verschnitt der Ablations- und Akkumulationsbereiche konnten schließlich acht verschiedene Rutschungsstrukturen identifiziert werden, deren primäre Vorzugsrichtung hangabwärts von Nordost nach Südwest verläuft. Bis auf die drei Rutschungsstrukturen entlang der Straßenböschung befinden sich alle Rutschungsstrukturen im näheren Einflussbereich von Abflussrinnen.

3 Suszeptibilitätskarte

Aufgrund der kartierten räumlichen Verteilung der Massenbewegungen, des Nachweises der anfälligen Lockergesteinsformation durch bodenmechanischen und tonmineralogischen Eigenschaften, dem erfolgreichen geometrischen Nachweis das die Probenentnahme innerhalb eines komplexen Kriechkörpers liegen, wurde eine Suszeptibilitätskarte erstellt.

So wurden zunächst die räumlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten der Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet quantifiziert, indem mit der „Information Value Method“ (InfoVal) nach YIN & YAN (1988) eine statistische Gefahrenanalyse durchgeführt wurde. Hierzu wurden mit der

vereinfachten Indexmethode nach VAN WESTEN ET AL. (1997) insgesamt 44 Wichtungswerte für die Klassen der Parameter Hangneigung, Geologie, Bodenart und Abstand zur Abflussrinne mit Hilfe der jeweiligen Rutschungsanteile berechnet.

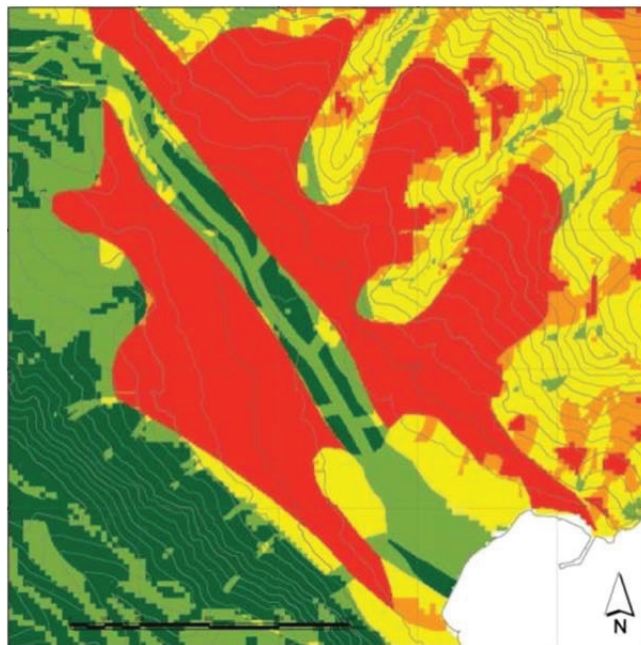


Abb. 6: Suszeptibilitätskarte für Massenbewegungen. (Suszeptibilitätsklassen von „sehr hoch“ (rot) bis „sehr niedrig“ (dunkelgrün)).

Fig. 6: Susceptibility map of massmovement. (susceptibility classes from “very high” (red) up to “very low” (dark green)).

Im nächsten Schritt wurden je Rasterzelle die Wichtungswerte der Klassen aufsummiert und wiederum in Klassen unterteilt. Die Segmentierung der je Zelle kumulierten Indizes erfolgt nach der InfoVal Methode in fünf gleich große Suszeptibilitätsklassen. Die hieraus berechnete Suszeptibilitätskarte für Massenbewegungen ist in Abbildung 6 dargestellt.

4 Schlussfolgerung

Die zugrunde gelegte Annahme, dass ungünstige geotechnische und tonmineralogische Eigenschaften der Vertisole hauptverantwortlich für die beobachteten Kriechbewegungen sind hat sich nicht nur durch die Versuchsergebnisse der Laboruntersuchungen sondern auch bei der Erstellung der Suszeptibilitätskarte für Massenbewegungen bestätigt. Es wurden besonders flache Reibungswinkel, hohe Plastizitäten, Wassergehalte die nahe an der Fließgrenze waren, ein hohes Wasserbindevermögen und eine starke Quellfähigkeit festgestellt. Bei vergleichender Betrachtung der Verbreitung dieser Böden mit der Suszeptibilitätskarte der Region lässt sich erkennen, dass die höchste Suszeptibilität für Massenbewegungen immer mit der Vertisolverbreitung einhergeht.

Zwecks weiterführender geotechnischer Untersuchungen rutschungsverdächtiger Böden auf Madeira ist eine zielgerichtete Laboranalyse aller auf der Insel vorherrschenden Bodenarten mit dem Pulverquellversuch zu empfehlen: Wie sich im Laufe dieser Arbeit gezeigt hat, ermöglicht dieser

Versuch zuverlässige Aussagen über das Rutschungsverhalten der tonigen Böden; darüber hinaus kann er mit relativ einfachen Mitteln schnell und kostengünstig durchgeführt werden.

Die Erstellung einer Suszeptibilitätskarte für kriechende Massenbewegungen auf Madeira (basierend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit sowie unter Verwendung des digitalen Geländemodells, der Bodenkarte der Insel und des o.g. Laborversuches) erscheint als sinnvoll: Denn die hier festgestellten Gefahren und deren räumliche Ausprägung werden mit wachsender Bevölkerungsdichte auf der gesamten Insel zu einem immer größeren Risiko.

Literatur

- PRADA, S., SILVA, M., CRUZ, J. (2005): Groundwater behaviour in Madeira, volcanic island (Portugal). – *Hydrology Journal*, **13**: 800-812.
- RAUH, F. & THURO, K. (2007): Rasche und optimierte Vorhersage von Quelleigenschaften bei Tonen mithilfe des Pulverquellversuchs. – Veröff. 16. Tagung Ing.-Geol., Bochum 7.-10. März 2007, 61-68.
- VAN WESTEN, C. J., RENGERS, N., TERLIEN, M. T. J., SOETERS, R. (1997): Prediction of the occurrence of slope instability phenomenal through GIS-based hazard zonation. – *Geologische Rundschau*, **86**: 404–414.
- Yin, K. L., Yan, T. Z. (1988): Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. – Veröff. Proc. of 5th Int. Symp. on Landslides, Vol. 2, Lausanne, Switzerland, 1269-1272.