Gefährdungsmodellierung bei gravitativen Massenbewegungen

Rainer BELL, Helene PETSCHKO, Thomas GLADE

1. Einleitung

Die Gefährdungsmodellierung gravitativer Massenbewegungen dient der Analyse der Anfälligkeit bzw. der Gefährdung (engl.: susceptibility) einer Region gegenüber gravitativen Massenbewegungen (z.B. Rutschungen, Stürze und Muren). Das Ergebnis ist eine Aussage über die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit von gravitativen Massenbewegungen bei gegebenen geologischen und geographischen Umweltbedingungen (Guzzetti 2005). Die Gefährdungsmodellierung gibt somit Auskunft darüber, wo ein Ereignis auftreten kann, aber nicht, wann es auftreten wird. D.h. die zeitliche Dimension wird nicht berücksichtigt. Diese ist Gegenstand der Gefahrenanalyse, die hier nicht betrachtet wird.

Die Gefährdungsmodellierung setzt sich im Allgemeinen aus den folgenden Schritten zusammen: (1) Erstellung von Ereignisinventaren, die Auskunft über die bisher aufgetretenen gravitativen Massenbewegungen geben, (2) Erhebung von Geodaten, die die vergangenen Ereignisse erklären können, (3) Durchführung der Gefährdungsmodellierung und (4) Validierung der Modellierungsergebnisse und Klassifizierung der finalen Gefahrenhinweiskarte. Die jeweiligen Schritte sind an den untersuchten Prozesstyp der gravitativen Massenbewegung anzupassen, so sind für Stürze und Muren andere methodische Ansätze notwendig als für Rutschungen. Der Fokus dieses Beitrags liegt auf der Gefährdungsmodellierung von Rutschungen.

2. Methodische Ansätze zur Gefährdungsmodellierung

Um Aussagen über die Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen für eine Region machen zu können, müssen zuerst idealerweise sämtliche Informationen über vergangene Ereignisse zusammen getragen werden. Quellen hierfür sind z.B. Kataster/Datenbanken der Geologischen Dienste der einzelnen Bundesländer, sowie der Geologischen Bundesanstalt (z.B. GEORIOS, Kociu et al. 2007), Luftbilder/digitale Orthofotos, hochaufgelöste digitale Geländemodelle, Geländekartierungen, Literaturstudien und historische Archive. Die Erstellung hochwertiger Inventare zu gravitativen Massenbewegungen ist meist sehr zeitaufwendig aber unerlässlich, um zuverlässige Aussagen über die existierenden Gefährdungen zu bekommen.

Dabei stellen die **Inventarkarten** gravitativer Massenbewegungen bereits eine erste und einfache Form der Gefährdungskarte dar, da sie Auskunft über die räumliche Verteilung kartierter gravitativer Massenbewegungen gibt. Jedoch geben diese keine Informationen darüber, wie die Gefährdung in den Bereichen zwischen den kartierten Ereignissen ist, auch fehlt häufig eine Aussage über den Aktivitätsstatus der kartierten gravitativen Massenbewegungen. Die Erstellung der Ereignisinventare ist mit Unsicherheiten und Fehlern verbunden. Eine Studie von Ardizzone et al. (2002) hat sich genau damit befasst. Sie konnten zeigen, dass die räumlichen Diskrepanzen in den Inventaren, welche von drei unterschiedlichen Geomorphologengruppen unabhängig voneinander in einem Untersuchungsgebiet in Italien erstellt wurden, bis zu 80% betrugen (siehe Abb. 1). Würden diese Karten als Gefährdungskarten implementiert, hätte dies sehr unterschiedliche Konsequenzen für die raumplanerische Weiterentwicklung dieser Region zur Folge, mit dem Risiko gravierender Fehlentscheidungen. Eine umfassende Darstellung zur Erstellung von Inventaren zu gravitativen Massenbewegungen ist in Guzzetti et al. (2012) enthalten.

Eine Weiterentwicklung stellen **Dichtekarten** von gravitativen Massenbewegungen dar, die zumindest teilweise Aussagen über die nicht kartierten Bereiche zulassen und darüber hinaus auch eine gewisse Information über die Frequenz der Ereignisse enthalten (Guzzetti 2005). Dies wurde

von Ardizzone et al. (2002) für das italienische Untersuchungsgebiet durchgeführt, wodurch die Unstimmigkeiten zwischen den verschiedenen Inventaren auf 21-25% reduziert werden konnten. Nach Einsatz einer statistischen Modellierung, auf die weiter unten näher eingegangen wird, konnten die Unstimmigkeiten noch weiter auf 15% reduziert werden.

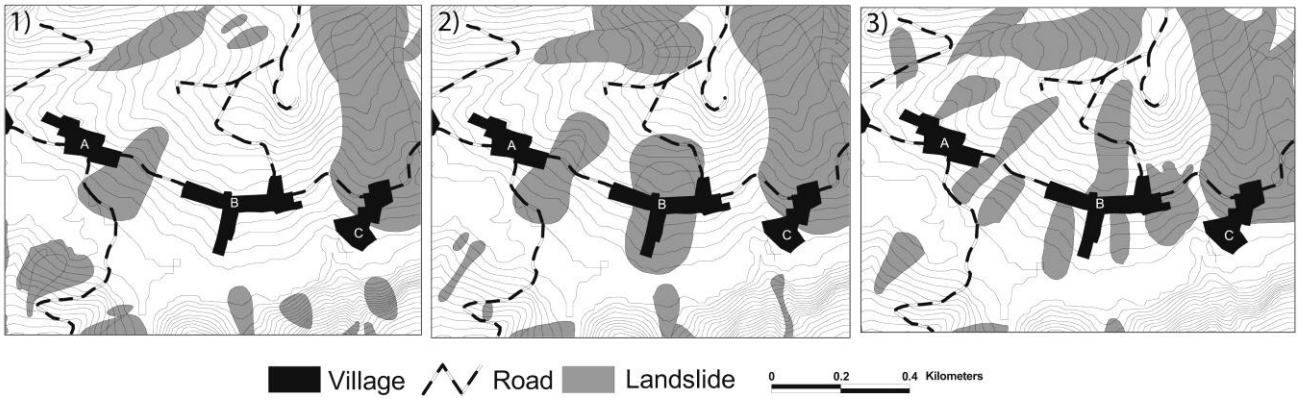

Abb. 1: Unterschiede in Rutschungsinventaren (1-3), die durch drei unterschiedliche Geomorphologengruppen in einem italienischen Untersuchungsgebiet erstellt wurden (Ardizzone et al. 2002, verändert durch Bell 2007)

Im Rahmen der **heuristischen Analyse** erfolgt die Gefährdungseinschätzung mittels Expertenwissens. Soeters und van Westen (1996) unterscheiden zum einen die geomorphologische Analyse (z.B. Kienholz et al. 1984 und Cardinali et al. 2002) und die Verschneidung qualitativer Karten (z.B. Dikau und Glade 2003 und Petley et al. 2005). Bei letzterer werden die Variablen, welche die Entstehung der gravitativen Massenbewegung erklären können, klassifiziert und ggf. gewichtet miteinander kombiniert. Der größte Nachteil der heuristischen Analyse ist das hohe Ausmaß der Subjektivität, welches die Ergebnisse schwer nachvollziehbar machen kann. Ein Vorteil dieses Ansatzes ist, dass ein Experte, der das Untersuchungsgebiet sehr gut kennt, komplexe Zusammenhänge unter Umständen erfassen und in der Analyse berücksichtigen kann, während andere Methoden aufgrund diesbezüglich fehlender Eingangsdaten versagen (Bell 2007).

Am häufigsten werden bei der Gefährdungsmodellierung von gravitativen Massenbewegunegen und hier v.a. bei Rutschungen **statistische Ansätze** verwendet. Unter der Annahme, dass zukünftige Ereignisse unter ähnlichen Bedingungen auftreten werden wie die vergangenen, wird versucht, die Faktoren (Hangneigung, Feuchtigkeitsindex, Geologie, Gesamtporenvolumen, etc.) zu ermitteln, die in der Vergangenheit zu Rutschungen geführt haben. Die sich dabei ergebenden statistischen Beziehungen zwischen den jeweiligen Faktoren und den Rutschungen aus dem Ereignisinventar werden dann auf das gesamte Gebiet übertragen, um so die gefährdeten Gebiete auszuweisen. Es gibt sehr viele verschiedene Methoden zur statistischen Gefährdungsmodellierung von gravitativen Massenbewegungen, von denen im Folgenden exemplarisch einige aufgelistet werden sollen:

Bivariate Analyse (z.B. Ayalew et al. 2004, Steger 2012), Weights of Evidence (z.B. Chung und Fabbri 1999, Klingeisen und Leopold 2006, Neuhäuser et al. 2011), Likelihood Ratio (z.B. Chung und Fabbri 2005), logistische Regression (z.B. Atkinson und Massari 1998, Dai et al. 2004, Brenning 2005 und Bell 2007), Generalisierte additive Modelle (z.B. Goetz et al. 2011, Petschko et al. 2013a) und Neuronale Netzwerke (z.B. Fernandez-Steger et al. 2002, Schwarz und Tilch 2008).

Die Vorteile der statistischen Gefährdungsmodellierung liegen v.a. in der Objektivität des Ansatzes, wobei gewisse subjektive Einflussnahmen nach wie vor enthalten sind, v.a. bei der (expertengesteuerten) Auswahl der Eingangsfaktoren und bei der Klassifikation der finalen Gefahrenhinweiskarte. Limitierungen ergeben sich v.a. aus Unsicherheiten und Fehlern im Rutschungsinventar, sowie der Nichtverfügbarkeit notwendiger Daten bzw. von Daten in ausreichender Auflösung bzw. Maßstab (so ist z.B. die Geologie für größere Gebiete häufig nur im Maßstab 1:200.000 verfügbar). Ein weiterer Nachteil ist, dass die Ergebnisse der Modellierung nicht ohne weiteres auf andere Gebiete übertragbar sind (Fell et al. 2008).

Die Gefährdungsmodellierung gravitativer Massenbewegungen mittels **prozessbasierter und numerischer Analysen** erfolgt mittels Modellen, die weitestgehend auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruhen. Das Ergebnis ist eine quantitative Aussage zur Hangstabilität in der Region, oft angegeben als Sicherheitsfaktor (Factor of Safety - FoS). Vorteile dieses Ansatzes liegen in der Möglichkeit, dass neue Erkenntnisse über die Ursachen der gravitativen Massenbewegungen gewonnen werden können (Carrara et al. 1992). Der größte Nachteil ist, dass je komplexer die Modelle sind, desto mehr Eingangsparameter (zu bodenmechanischen und hydrologischen Parametern des Hanges) erforderlich werden, die häufig für große Untersuchungsgebiete nicht zu erheben sind. Soeters und van Westen (1996) weisen darauf hin, dass diese Ansätze nur in relativ homogenen Untersuchungsgebieten einsetzbar sind und bei einfachen Typen von gravitativen Massenbewegungen. Für den regionalen Einsatz ist nur das Infinite Slope Model verfügbar, mit dem nur flachgründige Translationsrutschungen modelliert werden können (z.B. Thiebes et al. 2007, Tobler und Krummenacher 2004, Tobler et al. 2011a). Nur wenige Arbeiten existieren, die nach der Modellierung der Hanginstabilität auf regionaler Skale die Reichweite modellieren und diese in die Gefährdungsmodellierung einbinden (z.B. Tobler et al. 2011b).

Die unterschiedlichen Ansätze können nur auf bestimmten Skalen sinnvoll eingesetzt werden. Eine Übersicht dazu bietet Tab. 1.

Tab. 1: Übersicht über die Einsatzbereiche der unterschiedlichen Ansätze zur Gefährdungsmodellierung von gravitativen Massenbewegungen (nach Glade und Crozier 2005, basierend auf Soeters und van Westen 1996)

	Qualitative Methoden		**Quantitative Methoden**	
Maßstab	Inventar	Heuristische Analyse	Statistische Analyse	Prozessbasierte und numerische Analyse
<1:10.000	Ja	Ja	Ja	Ja
1:15.000 – 1:100.000	Ja	Ja	Ja	Ja
1:125.000 – 1:500.000	Ja	Ja	Wahrscheinlich	Wahrscheinlich
>1:750.000	Ja	Ja	Nein	Nein

Eine Limitierung der meisten Ansätze ist, dass oft nur die Anrissbereiche der gravitativen Massenbewegungen modelliert werden und nicht der komplette Prozessbereich. Allerdings zeigt sich, dass bei der Gefährdungsmodellierung von Anrissbereichen von Rutschungen häufig dennoch große Teile des gesamten Prozessbereichs abgedeckt werden. Dies ist bei Stürzen und Muren anders, sodass dort die Modellierung in zwei Schritten durchgeführt werden muss: Ausweisung der Startbereiche und Modellierung der Reichweite. Letztere kann entweder empirisch (über zuvor ermittelte Reichweitenwinkel) oder deterministisch erfolgen.

3. Validierung der Gefährdungsmodelle

Um Aussagen über die Qualität der Gefährdungsmodellierung bzw. der finalen Gefahrenhinweiskarte zu erhalten muss eine Validierung durchgeführt werden. Sehr deutlich

drücken das Chung und Fabbri (2003, S. 460) aus: „Without some kind of validation, the prediction model and image are totally useless and have hardly any scientific significance". Zur Validierung sollte das Inventar der gravitativen Massenbewegungen in zumindest einen Trainings- und Testdatensatz aufgeteilt werden. Diese Aufteilung kann zufällig, räumlich oder zeitlich erfolgen. Bei der zeitlichen Aufteilung nimmt man alle Ereignisse bis zu einem gewissen Jahr, führt die Modellierung durch und validiert das Modell im Anschluss mit den jüngeren Ereignissen, die nicht in die Modellierung eingeflossen sind. Analog verhält es sich beim Vorgehen der zufälligen bzw. räumlichen Aufteilung. Wichtig ist, dass die Daten die zur Validierung genutzt werden nicht schon in der Erstellung des Modells genutzt wurden.

Der einfachste Weg zur Validierung ist eine Konfusionsmatrix, in der die modellierten und beobachteten gravitativen Massenbewegungen gegenüber gestellt und ausgewertet werden (Tab. 2). Anzustreben ist hier ein hoher Wert der korrekt modellierten vorhandenen Ereignisse (richtig positiv) und ein niedriger Wert bei vorhandener Rutschung, die nicht modelliert wurde (falsch negativ). Die zwei anderen Kategorien sind etwas problematischer, v.a. jene der falsch positiven Fälle. Dies hängt damit zusammen, dass das Ziel der Gefährdungsmodellierung von gravitativen Massenbewegungen ja eben ist, auch gefährdete Gebiete auszuweisen, in denen bisher noch kein Ereignis aufgetreten ist, welches aber von der Disposition her aber möglich ist. Ein Problem bei der Validierung mittels Konfusionsmatrix ist, dass irgendwo ein Schwellenwert festgelegt werden muss, d.h. je nach Klassenanzahl der finalen Gefahrenhinweiskarte muss entschieden werden, welche Gefährdungsklassen der Kategorie „Rutschung modelliert" und welche der Kategorie „Keine Rutschung modelliert zugewiesen werden.

Tab. 2: Konfusionsmatrix zur Validierung von Gefahrenhinweiskarten

	Rutschung vorhanden	**Keine Rutschung vorhanden**
Rutschung modelliert	Richtig positiv	Falsch positiv
Keine Rutschung modelliert	Falsch negativ	Richtig negativ

Daher sind Verfahren vorzuziehen, die unabhängig von solchen Schwellenwerten sind und zudem direkt die Gefährdungsmodelle validieren können. Ein häufig verwendetes statistisches Gütemaß ist der AUROC-Wert (Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve). Es ist ein Maß für die Modellgüte. Beim AUROC-Wert wird die Lage der Rutschungs- und Nicht-Rutschungspunkte in Bezug gesetzt zur Verteilung der modellierten Gefährdung. Der AUROC-Wert ist umso größer, desto mehr gravitative Massenbewegungen in Bereichen hoher Gefährdung liegen und desto mehr Punkte außerhalb von gravitativen Massenbewegungen sich in Bereichen niedriger Gefährdung befinden. Die AUROC-Werte liegen zwischen 0 und 1. Werte von 0,7 bis 1 zeigen eine gute, Werte nahe 1 eine sehr gute Güte des Modells. Werte unter 0,5 zeigen eine zufällige Verteilung von Rutschungs- und Nicht-Rutschungspunkten im gesamten Spektrum der modellierten Gefährdungswerte an und damit eine schlechte Güte des Modells.

Eine detaillierte Beschreibung der Validierung von Gefährdungsmodellen befindet sich in Begueria (2006). Eine neuere Entwicklung im Bereich der Validierung von Gefährdungsmodellen von gravitativen Massenbewegungen ist die *k*-fold (mehrfache) Kreuzvalidierung, bei der nicht nur jeweils ein einziger Trainings- und Testdatensatz verwendet wird, sondern die Datensätze viel häufiger und wiederholt zufällig oder räumlich aufgeteilt werden, umso z.B. 100 Validierungen durchzuführen und eine genauere Aussage über die Güte des Modells zu erhalten (z.B. Petschko et al. 2013a)

Neben der statistischen Validierung des Gefährdungsmodells und der Gefahrenhinweiskarte, muss aber auch darauf geachtet werden, dass insbesondere die Gefahrenhinweiskarte aus geomorphologischer Perspektive plausibel ist und die hohen Gefährdungen auch dort ausgewiesen werden, wo mit gravitativen Massenbewegungen zu rechnen ist (z.B. in den hangbereichen

anfälliger Lithologien) und geringe Gefährdungen dort, wo dies nicht der Fall ist (z.B. in den flachen Bereichen der Flussauen).

Generell kann festgehalten werden, dass es Sinn macht, sowohl die Güte des Gefährdungsmodells zu validieren als auch die Qualität der finalen Gefahrenhinweiskarte.

4. Klassifizierung und Implementierung der Gefahrenhinweiskarten

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt ist es notwendig, die Ergebnisse der Gefährdungsmodellierung zu klassifizieren, um dadurch die finale Gefahrenhinweiskarte zu erhalten. Dazu stehen verschiedene Vorgehensweisen zur Verfügung. Der Wertebereich des Gefährdungsmodells kann z.B. in gleiche Intervalle eingeteilt werden (z.B. Guzzetti et al. 2006 und Bell 2007). Dies setzt aber voraus, dass die Werte auch plausibel über den gesamten Wertebereich verteilt sind. Eine Alternative ist die Natural Break – Methode, bei der stärkere Veränderungen im Histogramm analysiert werden und an entsprechenden Stellen die Klassengrenzen gesetzt werden.

Ein durchaus vielversprechender Ansatz ist, die Klassengrenzen in Abhängigkeit des Anteils der in diesen Klassen befindlichen gravitativen Massenbewegungen zu definieren. So kann man die Klassen z.B. so setzen, dass sich 80% aller gravitativen Massenbewegungen in der höchsten Klasse befinden, 15 % in der mittleren und nur 5 % in der niedrigsten. Dieses Vorgehen erleichtert die Nachvollziehbarkeit der Klassengrenzen für die Implementierung in der Raumplanung. Die Festlegung der jeweiligen Klassengrenzen ist demnach ein Aushandlungsprozess mit den involvierten Akteuren (z.B. Raumordnungsbehörde, Geologischer Dienst, Bürgermeister, die für die untersuchte Region zuständig sind).

Im Zuge der Implementierung der Gefahrenhinweiskarten treten häufig neue Fragen auf, die ebenfalls zu beantworten sind, um die bestmögliche Anpassung der Karte an den Bedarf zu ermöglichen und damit die Akzeptanz und die Anwendung der Karten zu optimieren: Wieviel Gefährdungsklassen werden benötigt bzw. sind sinnvoll? Welche Farben soll diesen Klassen zugewiesen werden? Wie sollen die Gefährdungsklassen bezeichnet werden? Welche Handlungsempfehlungen sind mit den Gefährdungsklassen zu verknüpfen? Für Niederösterreich finden sich Antworten auf diese Fragen in Petschko et al. 2013b. Diese sind aber nicht allgemeingültig und nicht ohne weiteres auf andere Regionen und Bundesländer übertragbar, sondern sollten jeweils in Abhängigkeit der Ergebnisse der Gefährdungsmodellierung für das entsprechende Gebiet neu ausgehandelt werden.

5. Schlussfolgerungen

Die Art und Weise der Gefährdungsmodellierung bei gravitativen Massenbewegungen ist abhängig von dem zu modellierendem Prozesstyp (z.B. ob Rutschung, Sturz oder Mure). In allen Fällen sind hochqualitative und umfangreiche Informationen zu vergangenen Ereignissen erforderlich, die im Rahmen der Erstellung von Ereignisinventaren zusammengetragen werden müssen. Es stehen vielfältige Optionen zur Gefährdungsmodellierung zur Verfügung. Die Auswahl sollte v.a. auf Basis der für die jeweilige Modellierung benötigten und verfügbaren Daten getroffen werden. Am häufigsten wird v.a. bei Rutschungen die statistische Modellierung eingesetzt. Unabhängig von der Wahl des Modellierungsansatzes sind alle Ergebnisse und Gefahrenhinweiskarten einer umfassenden Validierung zu unterziehen. Sollen die Gefahrenhinweiskarten in die Raumordnung implementiert werden, so sind einige weitere Fragen zu beantworten, damit die Karten nicht am Bedarf der Akteure vor Ort vorbeigeplant und erstellt werden und die Akzeptanz der Karten erhöht wird.

6. Literatur

Ardizzone, F., Cardinali, M., Carrara, A., Guzzetti, F. & Reichenbach, P., 2002. Impact of mapping errors on the reliability of landslide hazard maps. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2, S. 3-14.

Atkinson, P.M. & Massari, R., 1998. Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the Central Apennines, Italy. Computers & Geosciences, 24(4), S. 373-385.

Ayalew, L., Yamagishi, H. & Ugawa, N., 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weight linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. Landslides, 1, S. 73 - 81.

Beguería, S., 2006. Validation and Evaluation of Predictive Models in Hazard Assessment and Risk Management, Natural Hazards, 37(3), S. 315–329.

Bell, R., 2007. Lokale und regionale Gefahren- und Risikoanalyse gravitativer Massenbewegungen an der Schwäbischen Alb. Dissertation, Universität Bonn, 305 S. (abrufbarbar unter: http://hss.ulb.uni-bonn.de:90/2007/1107/1107.htm, 25.06.2013)

Brenning, A., 2005. Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation. Natural Hazards and Earth System Sciences, 5, S. 853-862.

Cardinali, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Antonini, G., Galli, M., Cacciano, M., Castellani, M. & Salvati, P., 2002. A geomorphological approach to estimate landslide hazards and risk in urban and rural areas in Umbria, Central Italy. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2, S. 57-72.

Carrara, A., Cardinali, M. & Guzzetti, F., 1992. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. ITC Journal, The Netherlands, 2, S. 172-183.

Chung, C.-J.F. & Fabbri, A.G., 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 65(12), S. 1389-1399.

Chung, C.J.F. & Fabbri, A.G., 2003. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. Natural Hazards, 30(3), S. 451-472.

Chung, C.-J.F. & Fabbri, A.G., 2005. Systematic procedures of landslide-hazard mapping for risk assessment using spatial prediction models. In: T. Glade, M. Anderson und M.J. Crozier (Hrsg.), Landslide hazard and Risk. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, S. 139-174.

Dai, F.C., Lee, C.F., Tham, L.G., Ng, K.C. & Shum, W.L., 2004. Logistic regression modelling of storm-induced shallow landsliding in time and space on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. Bulletin of Engineering Geology and Environment, 63, S. 315-327.

Dikau, R. & Glade, T., 2003. Nationale Gefahrenhinweiskarte gravitativer Massenbewegungen. In: H. Liedtke, R. Mäusbacher und K.-H. Schmidt (Hrsg.), Relief, Boden und Wasser. Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, S. 98-99.

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W. Z., & on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes (2008): Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. Engineering Geology 102(3-4), S. 99–111.

Fernández-Steeger, T.M., Rohn, J. & Czurda, K., 2002. Identification of landslide areas with neural nets for hazard analysis. In: J. Rybár, J. Stemberk und P. Wagner (Hrsg.), Landslides, 24-26 June 2002. A.A. Balkema, Prague, Czech Republic, S. 163-168.

Glade, T. & Crozier, M.J., 2005. A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis. In: T. Glade, M.G. Anderson und M.J. Crozier (Hrsg.), Landslide hazard and risk. Wiley, Chichester, S. 75-138.

Goetz, J.N., Guthrie, R.H. & Brenning, A., 2011. Integrating physical and empirical landslide susceptibility models using generalized additive models. Geomorphology 129, S. 376-386.

Guzzetti, F., 2005. Landslide hazard and risk assessment. Dissertation, Universität Bonn, Bonn, 276 S.

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M. & Galli, M., 2006. Estimating the quality of landslide susceptibility models. Geomorphology 81, S. 166–184.

Guzzetti, F., Mondini, A.C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M. & Chang, K.-T., 2012. Landslide inventory maps: New tools for an old problem. In: Earth-Science Reviews, 112, S. 42-66.

Kienholz, H., Hafner, H., Schneider, G. & Zimmermann, M., 1984. Methods for the assessment of mountain hazards and slope stability in Nepal. Erdwissenschaftliche Forschung, XVIII, S. 147-160.

Klingseisen, B. & Leopold, P.,2006. Landslide Hazard Mapping in Austria. GIM International, Vol. 20, Nr. 12, S. 41-43.

Kociu, A., Kautz, H., Tilch, N., Grösel, K., Heger, H. & Reischer, J., 2007. Massenbewegungen in Österreich. In: Jahrbuch Der Geologischen Bundesanstalt, Festschrift Zum 65. Geburtstag von HR Univ.-Prof. Dr. Hans Peter Schönlaub, Direktor Der Geologischen Bundesanstalt. Geologische Bundesanstalt, Wien, S. 215–220.

Neuhäuser, B., Damm, B. & Terhorst, B., 2012. GIS-based assessment of landslide susceptibility on the base of the Weights-of-Evidence model. In: Landslides, 9, S. 512-528.

Petley, D.N., Hearn, G.J. und Hart, A., 2005. Towards the Development of a Landslide Risk Assessment for Rural Roads in Nepal. In: T. Glade, M. Anderson und M.J. Crozier (Hrsg.), Landslide hazard and Risk. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, S. 597-619.

Petschko, H., Brenning, A., Bell, R., Goetz, J., & T. Glade, 2013a. Assessing the quality of landslide susceptibility maps – case study Lower Austria, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., 1, 1001-1050, doi:10.5194/nhessd-1-1001-2013.

Schwarz, L. & Tilch, N., 2008. Möglichkeiten und Limitierungen der Regionalisierung mittels Neuroanaler Netze am Beispiel einer Rutschanfälligkeitskarte für die Region Gasen-Haslau. In Strobl, J., Blaschke, T. & Griesebner, G.: Angewandte Informatik 2008, Beiträge zum 20. AGIT-Symposium, Salzburg, S. 643-648.

Soeters, R. & van Westen, C.J., 1996. Slope instability recognition, analysis, and zonation. In: A.K. Turner und R.L. Schuster (Hrsg.), Landslides: investigation and mitigation. Special Report. National Academey Press, Washington, D.C., S. 129-177.

Steger, S. 2012. Räumliche Analyse und Gefährdungsmodellierung von Rutschungen in der rhenodanubischen Flyschzone (NÖ). Diplomarbeit. Institut für Geographie und Regionalforschung, Universität Wien.

Thiebes, B., Bell, R. & Glade, T. 2007. Determinitische Analyse flachgründiger Hangrutschungen mit SINMAP - Fallstudie an der Schwaebischen Alb. In: Kellerer-Pirklbauer, A., Keiler, M., Embleton-Hamann, C. & Stötter, J. (Hrsg.): Geomorphology for the future - Joint Meeting of the Commission on Geomorphology of the Austrian Geographical Society and the IAG Working Group on Geomorphology and Global Environmental Change. Obergurgl, Austria, September 2-7, 2007. Conference Proceedings, Innsbruck University Press, Innsbruck, S. 177 – 184.

Tobler, D. & Krummenacher, B., 2004. Modellierung von Anrissgebieten für flachgründige Rutschungen und Hangmuren. In: Proceedings of the 2nd Swiss geoscience meeting, Lausanne

Tobler, D., Riner, R. & Pfeifer, R., 2011. Modeling potential shallow landslides over large areas with SliDisp+. In: Margottini, C., Canuti, P. and Sassa, K. (Eds.): Landslide Science and Practice, Vol. 1: Landslide Inventory and Susceptibility and Hazard Zoning. Heidelberg.

Tobler, D., Riner, R. & Pfeifer, R., 2011. Runout Modelling of Shallow Landslides Over Large Areas with SliDepot. In: Margottini, C., Canuti, P. and Sassa, K. (Eds.): Landslide Science and Practice, Vol. 1: Landslide Inventory and Susceptibility and Hazard Zoning. Heidelberg.