

# Gefahrenhinweiskarten für geologische Gefährdungen in Bayern

## Susceptibility maps for geological hazards in Bavaria

Simone Patula<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Simone Patula, Bayerisches Landesamt für Umwelt, simone.patula@lfu.bayern.de

### Zusammenfassung

Seit 2008 erstellt der Geologische Dienst am Bayerischen Landesamt für Umwelt Gefahrenhinweiskarten für geologische Gefährdungen wie Steinschlag, Felssturz, Rutschungen und Subrosion. Die potenziellen Prozessräume für Steinschlag, Felssturz und flachgründige Rutschungen (sog. Hanganbrüche) werden mit Hilfe von aufwendigen Computersimulationen ermittelt. Tiefreichende Rutschungen und Subrosion werden empirisch an Hand bereits bekannter Ereignisse, der Auswertung von Schattenbildern, den geologischen Untergrundgegebenheiten und v.a. im Falle der Rutschungen mit umfangreichen Geländebegehungen abgegrenzt. Die Karten im regionalen Maßstab ermöglichen den Anwendern wie Behörden und Planungsbüros, einen schnellen Einblick in potenzielle Konfliktbereiche zu erlangen.

**Schlüsselworte:** Gefahrenhinweiskarte, geologische Gefährdungen

### Abstract

Since 2008, the Bavarian Environment Agency creates susceptibility maps for geological hazards like rockfall, deep-seated landslides, shallow landslides and sinkholes. To evaluate the area potentially affected by rockfall and shallow landslides 3D computer simulations are carried out. To assess deep-seated landslides and sinkholes, an empirical approach has been chosen. Potentially endangered areas are established on the basis of known events, the analysis of a high resolution elevation model (hillshade), the geological situation of the subsurface and extensive field work. The susceptibility map in a regional scale is a very helpful tool for planning authorities to get an overview about safe areas and areas potentially affected by geological hazards.

**Keywords:** susceptibility map, geological hazards

## 1 Einleitung

Naturgefahrenereignisse sind in Gegenden mit entsprechendem Relief ein normales Phänomen. Im Zuge des natürlichen Gebirgsabtrages entstehen Rutschungen, Felsstürze und Muren, durch Auslaugungsvorgänge im Untergrund kommt es zu Senkungen und Einbrüchen. Dies spiegelt das grundsätzlich labile Gleichgewicht wider, in dem sich Hänge und Untergrund befinden. Präventivmaßnahmen sind auf jeden Fall angebracht und sinnvoll. In diesem Sinn verfolgt der Geologische Dienst am Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) bereits seit langem eine vorbeugende Strategie, die derzeit mit Hilfe von neuen Technologien weiter ausgebaut wird. Ein Schutz gegen Naturgefahren kann auch aus Kosten- und Nachhaltigkeitsgründen immer weniger durch bauliche Maßnahmen gewährleistet werden, sondern muss nicht zuletzt durch Planungsmaßnahmen herbeigeführt werden. Gefahrenhinweiskarten sind mit der Erkennung und Ausweisung von bedrohten Bereichen eine wesentliche Grundlage zum Schutz gefährdeter Gebiete. Sie sind Planungshilfen für bauliche und infrastrukturelle Projekte, insbesondere im Rahmen der Flächennutzungsplanung. Sie erlauben die Bewertung der Gefährdung bestehender Siedlungsräume und Infrastruktur durch geologische Naturgefahren. Sie sind ein Hilfsmittel, finanzielle Mittel zur

Gefahrenminderung sinnvoll zu verwenden sowie potentielle Gefahrenbrennpunkte frühzeitig zu erkennen und zu verhindern, dass von Massenbewegungen bedrohte Gebiete unbedacht bebaut und besiedelt werden (PATULA et al. in Druck).

Die Gefahrenhinweiskarte beinhaltet eine großräumige Übersicht über die Gefährdungssituation mit Angaben der Gefahrenart, jedoch nicht zur Intensität oder zur Wahrscheinlichkeit. Der Zielmaßstab liegt bei max. 1:10.000 (PERSONENKREIS „GEOGEFAHREN“ 2008).

## 2 Grundlagen

### 2.1 Datengrundlage

Die mittels Laserscan-Verfahren vom Bayerischen Landesamt für Vermessung und Geoinformation (LVG) erstellten hochauflösenden Digitalen Geländemodelle (DGM) sind wesentlicher Bestandteil bei der Erstellung von Gefahrenhinweiskarten. Sie bilden die Grundlage der 3D-Modellierung von Steinschlag, Felssturz und Hanganbrüchen und werden in Form von Schattenmodellen (hillshade) für die Beurteilung von tiefreichenden Rutschungen und die Aufnahme von Dolinen und Erdfällen verwendet.



Eine der wichtigsten Grundlagen für die Bearbeitung der Gefahrenhinweiskarten sind Informationen zu bereits bekannten Massenbewegungsereignissen. Denn erfahrungsgemäß kommt es in den Bereichen, in denen bereits in früherer Zeit Massenbewegungen stattgefunden haben, auch in der Folgezeit immer wieder zu neuen Ereignissen. Diese Ereignisse werden seit 1987 im sog. GEORISK-Kataster im Bayerischen Bodeninformationssystem (BIS-BY, [www.bis.bayern.de](http://www.bis.bayern.de)) erfasst. Derzeit sind bayernweit 6.285 Ereignisse zu Massenbewegungen im Internet abrufbar (Stand Dez. 2012).

Zudem finden Topographische Karten (DLM25 aus ATKIS®) des LVG und Geologische Karten des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) im Maßstab 1:25 000 (GK25) Anwendung (MAYER et al. 2010).

## 2.2 Modellierungsansatz

Um die potenzielle Reichweite bzw. Ausdehnung von Massenbewegungsereignissen abzuschätzen kann auf verschiedene Modellierungsansätze zurückgegriffen werden. Nach KIENHOLZ et al. (1993) können diese Simulationen in **Dispositionsmodelle** und **Prozessmodelle** gegliedert werden. Sie basieren entweder auf empirischen Annahmen (funktionalistischer Ansatz) oder auf physikalischen Parametern und Zusammenhängen (realistischer Ansatz).

Dispositionsmodelle dienen zur Ermittlung von Bereichen, von denen eine Gefahr ausgehen kann. Es handelt sich also um Gebiete, aus denen sich z.B. Steine und Felsblöcke lösen können.

In einem Prozessmodell wird die Dynamik der Hangbewegung simuliert. Dabei wird beschrieben, wie eine Hangbewegung abläuft, welche Geschwindigkeiten und kinematischen Energien erreicht werden und welche möglichen Reichweiten auftreten können.

## 3 Stein- und Blockschlag

Um festzulegen, aus welchen Bereichen es zu Stein- und Blockschlag kommen kann, werden zum einen bereits bekannte Ausbruchgebiete aus dem BIS-BY extrahiert. Zum anderen werden für Gebiete, in denen noch keine Informationen aus dem Gelände vorhanden sind, mittels Geographischem Informationssystem (GIS) alle Hangbereiche mit einer Neigung steiler  $45^\circ$  berechnet und als potenzielle Anbruchbereiche ausgewiesen.

Ausgehend von den ermittelten Startpunkten wird nun der Sturzvorgang simuliert. In Bayern wurde bisher das Steinschlagmodell nach Zinggeler und GEOTEST (KRUMMENACHER et al. 2005) verwendet. Hierbei gehören zu den Berechnungsgrundlagen das DGM, Informationen zu Dämpfung und Rauigkeit des Untergrundes sowie Angaben zur Vegetation. Zudem muss für jede geologische Einheit ein Bemessungsereignis, d.h. eine typische Blockgröße, festgelegt werden. Die Simulation der Bewegung der Sturzblöcke erfolgt nach den physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Mechanik und ist in die Prozesse Fallen, Springen und Rollen unterteilt. Die Berechnungen stellen eine Abfolge dieser Prozesse mit den dazwischen liegenden Kontaktreaktionen mit dem Untergrund und mit Baumstämmen dar. Der Ener-

gieverlust beim Bodenkontakt wird primär durch die plastische Verformbarkeit des Untergrundes und die Rauigkeit bestimmt. Mittels dieser Methode werden nun zwei Szenarien modelliert. Einmal wird der Waldbestand mit seiner natürlichen dämpfenden Wirkung auf Steinschläge berücksichtigt. In einem zweiten Szenario wird der Wald nicht mit einbezogen (Abb. 1).

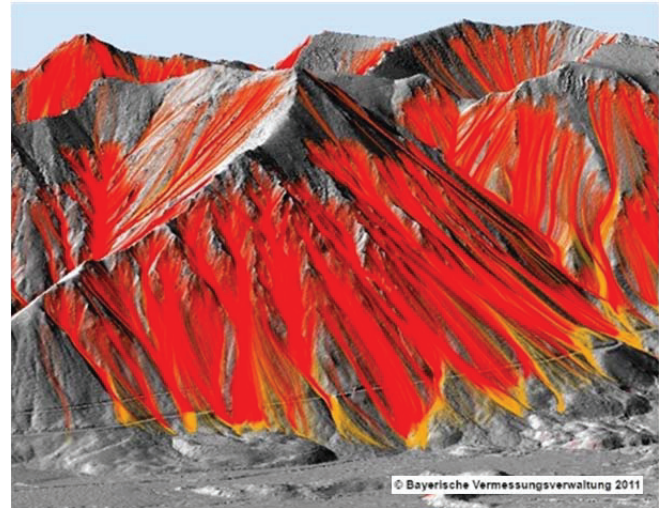


Abb. 1: Steinschlagtrajektorien mit Berücksichtigung des Waldbestandes (rot) und ohne Berücksichtigung des Waldbestandes (gelb).

Fig. 1: rockfall trajectories considering the forest (red) and not considering the forest (yellow).

Aus den berechneten Steinschlagtrajektorien werden abschließend Flächen erzeugt und als Gefahrenhinweisbereiche dargestellt (Abb. 2).

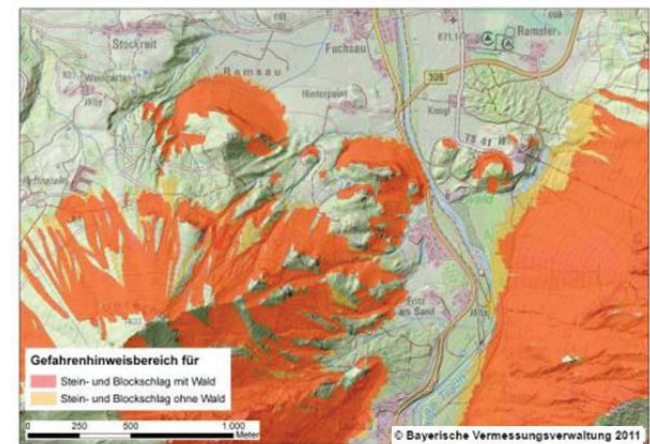


Abb. 2: Ausschnitt aus der Gefahrenhinweiskarte für Stein- und Blockschlag.

Fig. 2: Detail of the susceptibility map for rockfall.

## 4 Felssturz

Für die Modellierung der Reichweite größerer Felssturzbe-  
reiche kommt ein empirisches Prozessmodell zur Anwendung, das mit einem worst-case-Ansatz die Reichweite des Absturzes großer Massen einschließt. Zahlreiche Veröffentlichungen (z.B. EVANS & HUNGR 1993, WIECZOREK et al. 1998, MEIBL 1998) zeigen, dass die maximale Reichweite eines Felssturzes durch einen Pauschalwinkel abgeschätzt

werden kann. Es werden zwei unterschiedliche Pauschalwinkelmodelle herangezogen. Zum einen das geometrische Gefälle, das den Winkel beschreibt, den die Horizontale mit der Gerade zwischen dem Block maximaler Reichweite und der obersten Abrisskante des Felssturzes einschließt. Für die Gefahrenhinweiskarte wird ein minimales Geometrisches Gefälle von  $30^\circ$  angenommen. Zum anderen den Schattenwinkel, den die Horizontale mit der Gerade zwischen dem Block maximaler Reichweite und der oberen Begrenzung des Ablagerungsbereiches einschließt. Hier wird ein Schattenwinkel von  $27^\circ$  angesetzt. Die Anwendung der verschiedenen Pauschalwinkel ist von der Hangmorphologie abhängig. Die Entscheidung für die Anwendung eines der beiden Pauschalwinkelmodelle kann mit Hilfe des Quotienten aus Tangens des Schattenwinkels und Tangens des Geometrischen Gefälles gefällt werden (MAYER & VON POSCHINGER, 2005). Ist der Quotient kleiner 0,88 ist der Schattenwinkel zu wählen, ansonsten ist mit dem Geometrischen Gefälle zu rechnen.

Die Pauschalwinkel können mit implementierten GIS-Funktionen wie der Viewshed-Funktion des Spatial Analyst in ArcGIS modelliert werden. Diese Funktion ermittelt alle Rasterzellen, die von definierten Startpunkten aus gesehen werden (Abb. 3). Für die Ermittlung der Gefahrenhinweissbereiche werden nur größere Felssturzgebiete mit Hinweisen auf eine Aktivität modelliert. Nach Entscheidung für einen der beiden Pauschalwinkelansätze werden die Anbruchkanten, also die Startpunkte für die Viewshed-Modellierung digitalisiert. Anschließend werden alle nötigen Attribute bestimmt und die Viewshed-Funktion ausgeführt (MAYER et al. 2010).

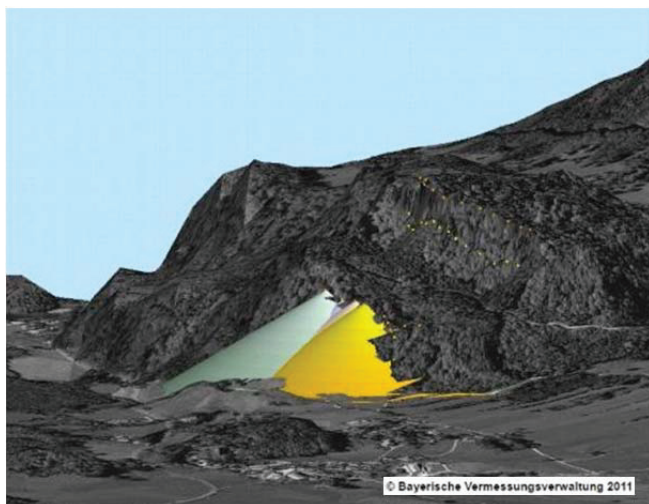


Abb. 3: Ermittlung potenziell durch Felssturz gefährdeter Bereiche mittels Viewshed-Funktion.

Fig. 3: Determination of areas potentially affected by rock masses using the viewshed-function.

## 5 Tieferreichende Rutschungen

Da eine numerische Modellierung von Rutschungen im regionalen Maßstab nicht zuverlässig möglich ist, wird zur Ermittlung der Gefahrenhinweissbereiche für tieferreichende Rutschungen ein empirischer Ansatz gewählt (Patula et al. 2013, in Druck).

Erfahrungsgemäß ereignen sich Rutschungen dort, wo es bereits in der Vergangenheit zu Rutschungen gekommen ist.

Zur Ermittlung dieser Bereich wird zunächst das GEO-RISK-Kataster ausgewertet. Zur Ermittlung bisher unbekannter Rutschgebiete erfolgt eine visuelle Auswertung des DGM, aus dem unter Berücksichtigung unterschiedlicher Beleuchtungsrichtungen Schattenmodelle (hillshades) erstellt wurden. Diese ermöglichen auf Grund der hohen Detailwiedergabe eine genaue Vorabbeurteilung der morphologischen Gegebenheiten (Abb. 4).

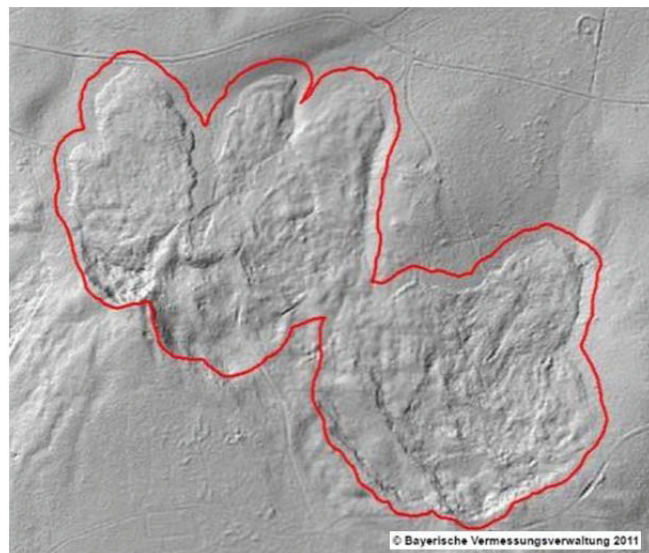


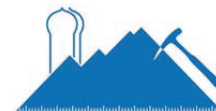
Abb. 4: Ausschnitt aus einem Schattenmodell mit rot umrandetem Rutschbereich.

Fig. 4: Detail of a hillshade with a red bounded landslide.

Die so ermittelten potentiellen Bewegungsbereiche können sich bei anhaltender Aktivität oder bei einer Reaktivierung alter Rutschungen stark ausweiten. Diese Ausweitung kann sowohl im Anbruchbereich als auch im Ablagerungsbereich der Rutschmasse stattfinden. Der Prozessraum der Rutschung kann sich also zukünftig stark vergrößern. In Hinblick darauf werden die potentiellen Bewegungsbereiche an Hand der vorhandenen Datenbasis und von umfangreichen Geländebegehungen beurteilt und in der Gefahrenhinweiskarte dargestellt (Abb. 5).

Dabei werden einmal Bereiche beurteilt und dargestellt, in denen bereits Rutschungen stattgefunden haben, die entweder Anzeichen für Aktivität aufweisen oder bei denen die Möglichkeit einer Reaktivierung besteht. Es werden auch Bereiche mit einbezogen, in denen sich zwar noch keine eindeutige tieferreichende Rutschung entwickelt hat, wo aber bereits Anzeichen auf eine solche Bewegung zu finden sind. Dies kann sich beispielsweise anhand von tiefen, teils aktiven Zerrspalten oberhalb der Abrisskante äußern oder es handelt sich um Blockschollenbewegungen, also langsame tieferreichende Bewegungen von großen Felsblöcken auf einem tonig-schluffigen Untergrund.

In der zweiten Kategorie wurden Geländebereiche erfasst, in denen eine erhöhte Anfälligkeit für die Bildung eines tieferreichenden Rutschprozesses erkennbar ist. Eine solche Anfälligkeit äußert sich z.B. im Zusammenspiel von Faktoren wie rutschanfälliger Untergrund, flachgründigen Rutschungen, unruhiger Morphologie, Vernässungen u.ä.. An Blockschollenbewegungen sind alte Zerrspalten und Nackentälchen ebenso zu bewerten, wenn an ihnen derzeit noch keine erheblichen Vertikalbewegungen von Blöcken



erkennbar sind, diese aber möglicherweise als Vorbereitung für zukünftige tiefreichende Bewegungen zu sehen sind. Eine solche Entwicklung wäre insbesondere in Extremfällen (Zusammentreffen mehrerer ungünstiger Umstände, extreme Witterungsverhältnisse o.ä.) zu erwarten.

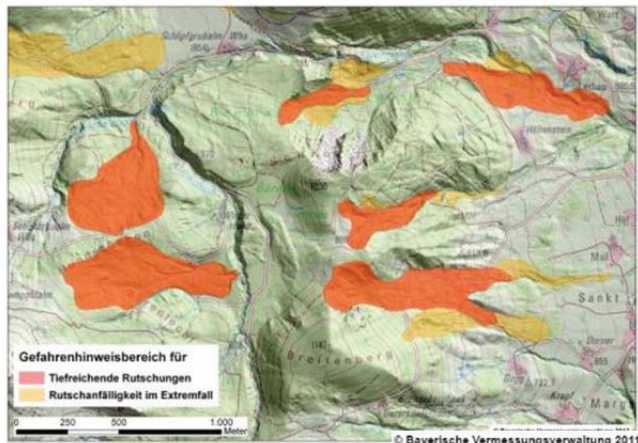


Abb.5:Ausschnitt aus der Gefahrenhinweiskarte für tiefreichende Rutschungen.

Fig. 5: Detail of the susceptibility map for deep seated landslides.

## 6 Flachgründige Hanganbrüche

Die Modellierung der Anrisszonen von flachgründigen Hanganbrüchen erfolgt nach dem Modell SLIDISP (LIENER 2000 und Geotest AG). Hierbei werden neben der Hangneigung die Lockermaterialmächtigkeit sowie die Modellparameter Reibungswinkel und Kohäsion berücksichtigt. Mit Hilfe der Infinite-Slope-Analyse wird die Hangstabilität in Form des Sicherheitsgrades  $F$  für jede Rasterzelle berechnet. Da das Vorhandensein von Wald die Stabilitätsverhältnisse erheblich beeinflusst, wird bei der Berechnung des Sicherheitsgrades als zusätzlicher Parameter die Wurzelkraft berücksichtigt.

Die Modellierung der Auslaufbereiche erfolgt mit dem Modell SLIDEPOT (Geotest AG). Für jede Rasterzelle im Anrissgebiet wird die Ablagerung hangabwärts in Fliessrichtung modelliert. Das Modell beruht dabei auf einer erweiterten Nachbarschaftsanalyse. Dafür werden mehrere Zellen in einem  $20^\circ$ -Sektor oberhalb einer potentiellen Ablagerungszelle analysiert. Eine Ablagerung wird berechnet, wenn im genannten Sektor eine Anrisszelle bzw. ein berechnetes Ablagerungsvolumen vorhanden ist und im Sektor keine stark konvexe Topographie vorliegt. Mit jedem Ausbreitungsschritt wird das Anfangsvolumen bzw. das Restvolumen über einen Abbaufaktor verringert, der v.a. von der Hangneigung abhängt. Die Ausbreitung stoppt, wenn entweder eine definierte Anzahl von Ausbreitungsschritten erreicht wird oder wenn der berechnete Wert unter einen definierten Schwellenwert fällt.

Die Berücksichtigung der Wurzelkraft erlaubt analog zur Steinschlagmodellierung die Berechnung zweier Szenarien. Zum einen wird von einer starken Schutzwirkung des Waldes ausgegangen, also einer erheblichen Stabilisierung des Bodens aufgrund der Durchwurzelung, zum anderen wird ein Szenario mit geringer Schutzwirkung des Waldes berechnet (Abb. 6).

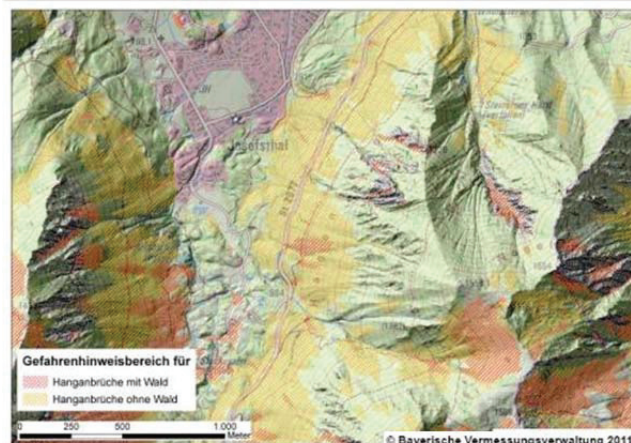


Abb.6:Ausschnitt aus der Gefahrenhinweiskarte für tiefreichende Rutschungen.

Fig. 6: Detail of the susceptibility map for deep seated landslides.

## 7 Subrosion

Für die Gefahrenhinweiskarte für Subrosion werden zwei unterschiedliche Ansätze gewählt (Patula et al. in Druck).

Zum einen werden Bereiche ausgewiesen, in denen es bereits in der Vergangenheit zu Dolinen und Erdfällen gekommen ist. Die bekannten Ereignisse werden aus dem GEORISK-Kataster, topographischen und geologischen Karten sowie aus verschiedenen Archiven und Dolinenkatastern (z.B. vom Dolinenkataster Nordbayern und Wasserwirtschaftsämtern) extrahiert. Eine Präzisierung der geographischen Lage wurde für alle Dolinen bzw. Erdfälle mit Hilfe des hochauflösenden, digitalen Geländemodells durchgeführt. Darüber hinaus wurden anhand des Schattenmodells weitere Dolinen und Erdfälle aufgenommen (Abb. 7).

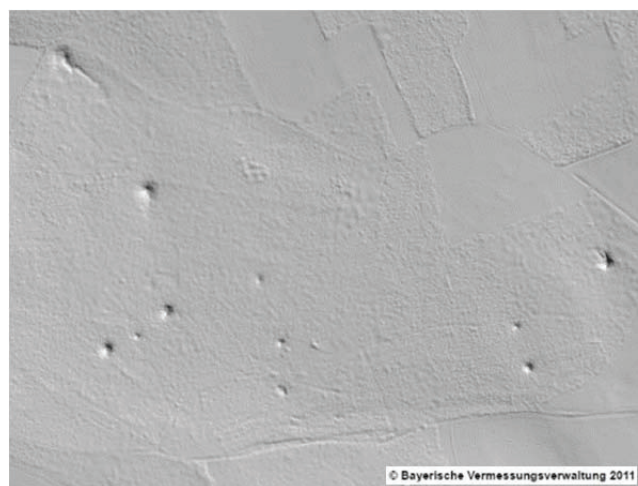


Abb.7:Ausschnitt aus dem Schattenmodell mit deutlichen Subrosionsstrukturen.

Fig. 7: Detail of the hillshade with evidence of sinkholes.

Diese mussten anhand des geologischen Untergrunds, der Luftbilder und topographischen Karten auf ihre Plausibilität geprüft werden. In Einzelfällen erfolgten auch Geländebegehungen zur Überprüfung der Daten.

Zum anderen wird der potentiell verkarstungsfähige Untergrund mit Hilfe der Geologischen Karte im Maßstab 1:200.000 bestimmt, wobei alle geologischen Einheiten ausgewählt werden, die grundsätzlich zu Subrosionsvorgängen neigen können. Gleichmaßen kommen Deckschichten über verkarstungsfähigem Gestein dort dazu, wo sich die Subrosionsstruktur bis an die Oberfläche durchgepaust hat. Beides wird in der Gefahrenhinweiskarte dargestellt (Abb. 8).

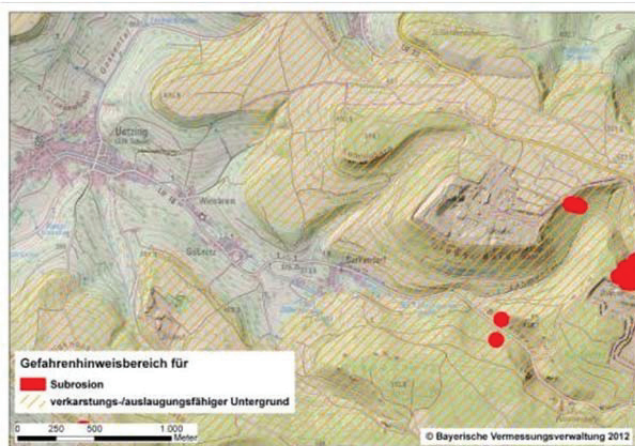


Abb. 7: Ausschnitt aus der Gefahrenhinweiskarte für Subrosion.

Fig. 7: Detail of the susceptibility map for sinkholes.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Gefahrenhinweiskarte ist eine nach objektiven, wissenschaftlichen Kriterien erstellte Übersichtskarte mit Hinweisen auf Gefahren, die identifiziert und lokalisiert, jedoch nicht im Detail analysiert und bewertet werden. Angaben zu Intensität und Wahrscheinlichkeit werden nicht gemacht.

Die Gefahrenhinweiskarte wird den lokalen und regionalen Planungsbehörden zur Verfügung gestellt und kann diese bei der Erkennung von Gefahrenbrennpunkten und bei der Priorisierung notwendiger Maßnahmen unterstützen. Sie soll nicht als Bauverbotskarte wirken. Sie zeigt vielmehr alle kritischen Fälle, bei denen detailliertere Untersuchungen erforderlich sind. Sie stellt aber auch Gebiete klar dar, in denen keine Gefährdungen bekannt sind. Um den Nutzern die Interpretation der Gefahrenhinweiskarten zu erleichtern und Unklarheiten auszuräumen, werden die Ergebnisse nach Fertigstellung eines Landkreises bei allen regionalen und lokalen Behörden vorgestellt und eine weitere Beratung durch den Geologischen Dienst des Bayerischen Landesamtes für Umwelt angeboten.

Darüber hinaus wird die Gefahrenhinweiskarte in eingeschränkter Form ins Internet gestellt und damit allen Interessierten zugänglich gemacht. Über den Internetzugang [www.bis.bayern.de](http://www.bis.bayern.de) sind die Karten für alle Prozesse, die keiner Interpretation bedürfen, verfügbar.

Im bayerischen Alpenraum sind die Karten bereits vollständig verfügbar, im Alpenvorland sowie den sensibelsten Bereichen im Schwäbisch Fränkischen Jura werden die Karten derzeit erarbeitet. Mittelfristig sollen bayernweit für alle potenziell gefährdeten Gebiete Gefahrenhinweiskarten erarbeitet werden.

## Literatur

- EVANS, S. G. & HUNGR, O. (1993): The assessment of rock fall hazards at the base of talus slopes. – In: Canadian Geotechnical Journal, **30** (4): 620-636, Ottawa (Nat. Res. Council of Canada).
- KIENHOLZ, H., ERISMANN, TH., FIEBIGER, G. & MANI, P. (1993): Naturgefahren: Prozesse, Kartographische Darstellung und Maßnahmen. – In: Tagungsbericht zum 48. Deutschen Geographentag in Basel, S. 293 – 312, Stuttgart.
- KRUMMENACHER, B., PFEIFER, R., TOBLER, D., KEUSEN, H. R., LINIGER, M. & ZINGGELER, A. (2005): Modellierung von Stein- und Blockschlag; Berechnung der Trajektorien auf Profilen und im 3-D Raum unter Berücksichtigung von Waldbestand und Hindernissen. – anlässlich Fan-Forum ETH Zürich am 18.02.2005, 9 S., Zollikofen. Prinz, H. & Strauß, R. (2006): Abriss der Ingenieurgeologie. – 4. Auflage, 671 S., München (Spektrum Akad. Verlag).
- LIENER, S., (2000): Zur Feststofflieferung in Wildbächen. Geographisches Institut Universität Bern. Geographica Bernensia **G64**, Bern.
- MAYER, K. & POSCHINGER, A. von (2005): Final Report and Guidelines: Mitigation of Hydro-Geological Risk in Alpine Catchments, "CatchRisk". Work Package 2: Landslide hazard assessment (Rockfall modelling). Program Interreg IIIb – Alpine Space.
- MAYER, K., PATULA, S., KRAPP, M., LEPPIG, B., THOM, P. & POSCHINGER, A. VON (2010): Danger map for the Bavarian Alps. – In: Z. dt. Geowiss., 161/2, p. 119-128, 10 figs. Stuttgart
- MEIBL, G. (1998): Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. – In: Innsbrucker Geographische Studien, **28**: 249 S., Innsbruck (Selbstverl. des Instituts für Geographie der Universität Innsbruck).
- PATULA, S., THOM, P., REINWALD, M., OERTEL, S. & POSCHINGER, A. VON (in Druck): Projekt Georisiken im Klimawandel - Vorhaben Gefahrenhinweiskarte Jura, Landkreis Kulmbach. – Abschlussbericht Umwelt Spezial, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg.
- PERSONENKREIS „GEOGEFAHREN“ (2008): Geogene Naturgefahren in Deutschland – Empfehlungen der Staatlichen Geologischen Dienste (SGD) zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten (unpubl.).
- WIECZOREK, F. G., MORRISSEY, M. M., IOVINE, G. & GODT, J. (1999): Rockfall Potential in the Yosemite Valley, California. – In: U.S. Geological Survey Open-File Report 99-0578, im Internet abrufbar unter: <http://pubs.usgs.gov/of/1999/ofr-99-0578/>.