

Beurteilung der Rutschungsgefährdung am Albtrauf der Schwäbischen Alb durch GIS-basierte, statistisch-probabilistische Bewertung

BETTINA NEUHÄUSER & BIRGIT TERHORST, Wien, Österreich

Keywords: Natural Hazards; Weights-of-Evidence; Geographical Information Systems (GIS); Landslide Hazard; Susceptibility

Summary: *Assessment of the Landslide Susceptibility at the Jurassic Escarpment of the Swabian Alb by Means of GIS-based Statistical-probabilistic Evaluation.* GIS-based model for the assessment of the landslide susceptibility in a selected area of the Jurassic escarpment in the Swabian Alb (SW-Germany) is described. The statistical-probabilistic method called “Weights-of-Evidence” – originally developed for the explorative mineralogy – is used for the assessment of the landslide hazard. A quantitative model is applied to the known landslides and their causative factors and is finally visualised in susceptibility maps. While previous research work in this area concentrated on large-scale investigations, the present study was carried out at a regional level with a target scale of 1:150,000. Potential susceptible areas can be delineated and landslide indicators can be identified from the available data set. The produced maps cover a distance of up to 12 km of the Jurassic escarpment, showing five classes of landslide susceptibility.

Zusammenfassung: Ein GIS-gestütztes Modell zur Beurteilung der Rutschungsgefährdung in einem ausgewählten Gebiet an der Juraschichtstufe der Schwäbischen Alb (SW-Deutschland) wird beschrieben. Dabei kommt die statistisch-probabilistische Methode der Evidenzgewichtung, welche ursprünglich für die Exploration von Goldvorkommen entwickelt wurde, für die Gefährdungseinschätzung zur Anwendung. Das quantitative Modell wurde auf die Rutschungen und ihre Steuerungsfaktoren angewendet und Rutschungsgefährdungskarten visualisiert. Während sich bisherige Forschungsarbeiten in diesem Gebiet auf großmaßstäbige Untersuchungen konzentrierten, arbeitet die vorliegende Studie auf regionaler Ebene mit einem Zielmaßstab von 1:150.000. Potenziell gefährdete Gebiete konnten mit dieser Methode eingegrenzt und jene Steuerungsfaktoren aus dem Datenpool bestimmt werden, welche maßgeblich zu Rutschungen beitragen. Die erstellten Karten decken ein Gebiet von bis zu 12 km Länge ab und zeigen eine Klassifikation in fünf unterschiedliche Gefährdungsklassen.

1 Einleitung

Gegenstand dieser Arbeit sind sogenannte Hangrutschungen, kurz *Rutschungen* bezeichnet, welche zur Prozessgruppe der Massenbewegungen gehören. Nach CRUDEN & VARNES (1996) sind Massenbewegungen als hangabwärts gerichtete Verlagerungen von Fels, Erdmassen oder Schutt definiert, welche Material unter Einfluss der Gravitation formt. Entsprechend den anerkannten Klassifikationen (DIKAU et al. 1996, BRUNDSSEN & PRIOR 1984, VARNES 1984) werden Massenbewegungen nach Bewegungstyp und Art des involvierten Ma-

terials in verschiedene Typen unterteilt. Rutschungen sind somit ein bestimmter Typus von Massenbewegungen. Nach DIKAU et al. (1996) werden Rutschungen generell als die Bewegung von Material entlang einer klar erkennbaren Scherfläche bezeichnet. Nach Form und Anzahl der Gleitflächen werden zudem Rotationsrutschungen, Translationsrutschungen und kombinierte Rutschungen unterschieden.

In SW-Deutschland, besonders an den steilen Stufenhängen der Schwäbischen Alb, sind zahlreiche Rutschungen in den letzten Jahrzehnten aufgetreten, die beträchtliche Haus-

schäden verursachten. Im Allgemeinen bewirken in Mitteleuropa intensive Bautätigkeiten, die mit der Erschließung von Baugebieten in gefährdeten Hanglagen einhergehen, oftmals Instabilitäten und erhöhen das Potenzial für Rutschungen (TERLIEN et al. 1995). Die *Rutschungs-Gefährdungs-Beurteilung* ist in den letzten Dekaden daher ein Thema für jene Behörden geworden, denen die Raumordnung und die Landschaftsplanung, aber auch der Umweltschutz obliegt. Folglich bemüht sich auch eine zunehmende Anzahl von Forschungsvorhaben um die Erstellung von Karten, welche Auskunft über die aktuelle oder potenzielle Bedrohung durch Rutschungen geben. *Geografische Informationssysteme (GIS)* und die *Fernerkundungsdaten* sind dabei wesentliche Werkzeuge.

Bisher basierten die meisten GIS-Modelle an der Schwäbischen Alb auf den hydrologischen Bedingungen im Gebiet und dem Vorkommen früherer (historischer) Rutschungen. Dieser Beurteilungszugang erforderte detaillierte hydrologische Daten und hochauflösende, digitale Geländemodelle (minimale Auflösung = 10 m), welche manuell aus topografischen Karten und Feldmessungen erstellt wurden (THEIN 2000, KREJA & TERHORST 2005). Zudem mussten durch Feldbegehungen Oberflächenformen, hydrologische Parameter sowie frühere pleistozäne Rutschungen identifiziert und kartiert werden. Aufgrund dieses sehr aufwendigen Prozesses der Datenerhebung wurden diese GIS-Modelle nur in sehr kleinen Arealen angewendet. Für die Zwecke der Raumordnung und Landschaftsplanung sind allerdings Gefährdungskarten auf regionaler Ebene notwendig. Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt daher im Gegensatz zu den bisherigen lokalen Modellen, auf einer *regionalen Beurteilung* mit einem Zielmaßstab von 1:150.000. Die unterschiedlichen Prämissen an Maßstab und Detaillierungsgrad erfordern einen neuen methodischen Ansatz zur Beurteilung der Rutschanfälligkeit, da für ein größeres Untersuchungsgebiet Felduntersuchungen und die Erstellung eines hochauflösenden Geländemodell zu aufwendig sind. Daher wird ein statistisch-probabilistischer Ansatz verwendet, der ein weites Spektrum an Faktoren berücksichtigt, die für Rutschungen relevant sind. Die Methode der *Evidenz-*

gewichtung (weights-of-evidence), welche auf Bayes Wahrscheinlichkeitstheorie (BAYES 1958, LEONARD & HSU 1999) basiert, wurde für die vorliegende Arbeit ausgewählt (BONHAM-CARTER 2002). Die Methode wurde 1989 (BONHAM-CARTER et al. 1989) für die Identifizierung von Goldvorkommen entwickelt. Im Bereich der Exploration von Mineralvorkommen ist die Evidenzgewichtung eine weit verbreitete Analyseverfahren.

Ziel dieser Arbeit ist die flächendeckende, GIS-basierte Beurteilung der *Rutschanfälligkeit*, um die Gefährdung durch Rutschungen im Untersuchungsgebiet regional zu bewerten. Insbesondere sollen jene Hänge beurteilt werden, die bisher noch nicht von Hangbewegungen betroffen waren, bzw. Gebiete, in denen keine entsprechenden Informationen verfügbar sind. Die *Quantifizierung der Rutschanfälligkeit* steht dabei im Mittelpunkt. Die Rutschanfälligkeit ist definiert als die Möglichkeit, dass ein Ereignis in einem bestimmten Gebiet auftritt. Bestimmt wird diese auf der Basis des Zusammenhangs zwischen den *Steuerungsfaktoren* für Rutschungen und der *räumlichen Verteilung von in der Vergangenheit aufgetretenen Rutschungen* (BRABB 1984). Die Rutschanfälligkeit darf nicht mit der Gefährdung verwechselt werden, welche zusätzlich zur räumlichen Aussage auch eine zeitliche Vorhersage inkludiert (VARNES 1984). Mit Hilfe der Evidenzgewichtung soll nicht nur die Rutschanfälligkeit quantifiziert, sondern auch jene Steuerungsfaktoren identifiziert werden, die maßgeblich am Zustandekommen von Rutschungen beteiligt sind. Auch hier ist eine Begriffsabgrenzung notwendig. Unter den Steuerungsfaktoren, in der Literatur oft auch als vorbereitende Faktoren oder Ursachefaktoren angesprochen, versteht man nach DIKAU et al. (1996) jene kumulativen Ereignisse, welche den Hang auf eine Bewegung vorbereiten, diese aber nicht notwendigerweise auslösen. Im Gegensatz zu den Steuerungsfaktoren sind Auslöser jene Prozesse, die Hanginstabilität „akut“ werden lassen, diese also tatsächlich in Gang setzten. Diese Auslöser sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

2 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst die Steilhänge der Juraschichtstufe der Schwäbischen Alb, die markanteste Erhebung in der südwestdeutschen Schichtstufenlandschaft. Eine besonders auffällige geomorphologische Struktur ist dabei die Stufenstirn der Schwäbischen Alb, der *Albtrauf*, an dem zahlreiche Rutschungen auftreten. Das Untersuchungsgebiet ist rund 500 km² groß, liegt im Bereich der Mittleren und Reutlinger Alb und schließt den Albtrauf zwischen Mössingen und Reutlingen ein (vgl. Abb. 1).

Rutschungen verschiedener Art sind dort weit verbreitet, es kommt immer wieder zu Schäden oder Zerstörung von forst- und landwirtschaftlich genutzten Flächen, Straßen,

Forstwegen und Siedlungen (THEIN 2000). Der Haupttyp der Rutschungen kann als *Rotationsgleitung*, kombiniert mit Sturz-, Kriech- und Fließbewegungen, bezeichnet werden (TERHORST 2001). Detaillierte geomorphologische Studien haben gezeigt, dass die Rutschmassen hauptsächlich großen Gleitschollen entsprechen, welche während des Pleistozäns entstanden sind. Im Holozän werden einige dieser alten pleistozänen Rutschmassen aufgearbeitet und in Form von kleineren Rutschungen verlagert und sukzessiv aufgearbeitet (TERHORST 1997, TERHORST 2001). Diese jüngeren Rutschungen sind der Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit. In einigen Fällen verursachten diese sekundären Bewegungen in pleistozänen Rutschmassen katastrophale Ereignisse. Das bekannteste Beispiel

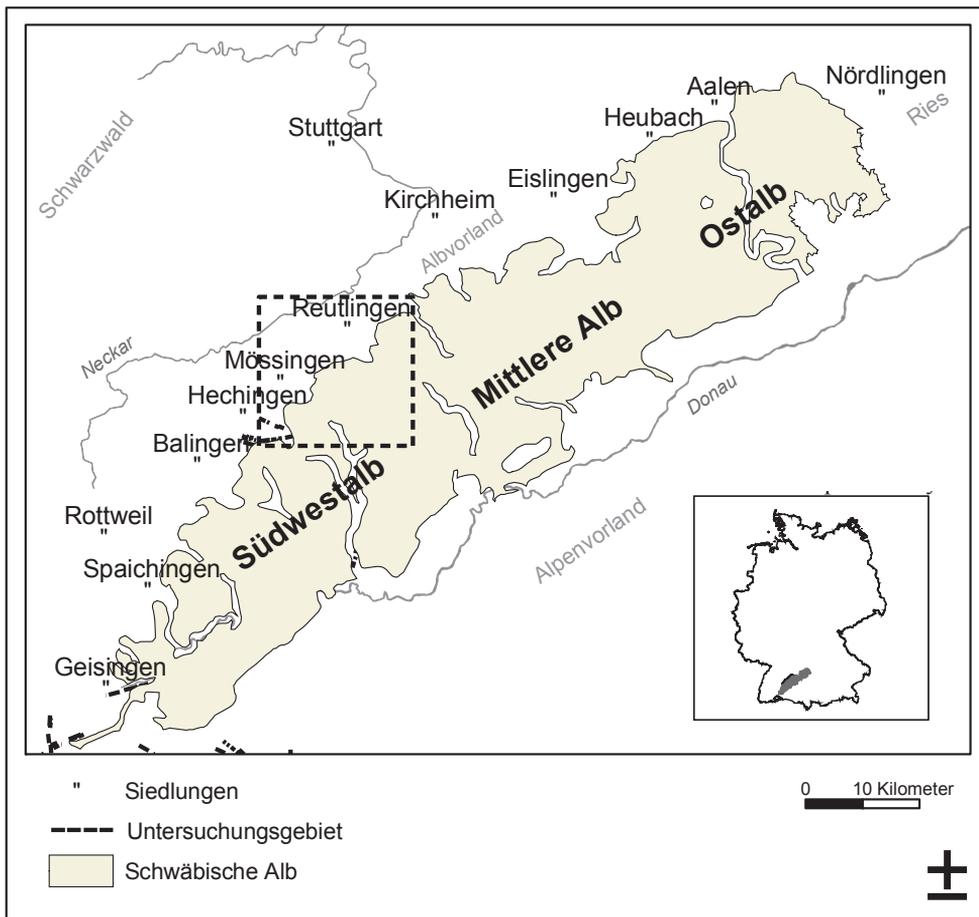


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes.

ist die Mössinger Rutschung von 1983 mit einer Fläche von 0,6 km² (BIBUS, 1986, SCHÄDEL & STÖBER 1988). Im Zuge dieser Rutschung wurde eine vorzeitliche Rotationsscholle reaktiviert. Vergleichbare bekannte und dokumentierte Ereignisse traten in den letzten 200 Jahren mit einem Wiederkehrintervall von 20 Jahren auf (BIBUS & TERHORST 2001).

3 Methode

Generell entstehen Hanginstabilitäten in bestimmten Reliefpositionen und unter spezifischen Faktorenkonstellationen. Das Zusammenwirken von unterschiedlichen geographischen und geologischen Bedingungen schafft die Voraussetzungen für die rutschungsauslösenden Faktoren in Hanglagen. Durch diese Steuerungsfaktoren ist eine indirekte Bewertung der Rutschanfälligkeit in einem GIS möglich. Diese Tatsache kann in der Methode der Evidenzgewichtung umgesetzt werden. Wie bei allen statistischen/probabilistischen Methoden impliziert die Anwendung der Evidenzgewichtung bestimmte Annahmen, welche im Folgenden genannten werden sollen:

Es wird angenommen, dass künftige Rutschungen von gleichen oder ähnlichen Bedingungen, bzw. Steuerungsfaktoren bewirkt werden, wie jene aus der Vergangenheit. Die Anwendung der Evidenzgewichtung setzt daher die Daten über historische Ereignisse voraus. Diese Rutschungen aus der Vergangenheit werden verwendet, um die Steuerungsfaktoren zu gewichten (z. B. Relief, Geologie).

Zusätzlich wird angenommen, dass die Steuerungsfaktoren für die bekannten Ereignisse, über die Zeit konstant bleiben. Dies trifft ebenfalls nur auf die gleiche Art von Rutschung zu, da die Steuerungsfaktoren in Abhängigkeit vom Rutschungstyp variieren. Die Methode kann daher nur jeweils einen Rutschungstyp analysieren. Liegen mehrere Rutschungstypen vor, so müssen diese getrennt voneinander untersucht werden.

Eine weitere allgemeine Annahme ist, dass die GIS-Daten, welche die Steuerungsfaktoren repräsentieren, vollständig und geeignet sind, die zukünftigen Rutschungen zu beschreiben, d.h. dass eine umfassende Kenntnis über diese besteht.

Die wichtigste und zugleich limitierende Annahme in der Evidenzgewichtung resultiert allerdings aus der Anwendung der BAYES Wahrscheinlichkeitstheorie im Modell: Es wird angenommen, dass die Faktoren unabhängig voneinander hinsichtlich des Auftretens der Rutschungen (D) sind (LEONARD & HSU 1999). Im Prinzip ist diese Annahme eine Vereinfachung der in der Natur auftretenden Wechselwirkungen und Beziehungen. Allerdings wird dadurch die getrennte Beurteilung der einzelnen Faktoren ermöglicht. Man nennt dies die bedingte Unabhängigkeit zwischen den Faktoren B_1 and B_2 und kann wie folgt beschrieben werden (DAWID 1979).

$$P(B_1 \cap B_2 | D) = P(B_1 | D) \cdot P(B_2 | D) \quad (1)$$

Diese Annahme über die bedingte Unabhängigkeit der Daten erfordert vor der Modellierung einen Unabhängigkeits-Check der Steuerungsfaktoren. Abhängige Faktoren dürfen nicht in die Analyse mit einbezogen werden. Eine Möglichkeit, um die bedingte Unabhängigkeit zwischen einem Paar von Faktoren zu testen, ist die χ^2 Statistik, welche die Schwankung zwischen dem erwarteten und beobachteten Auftreten von Rutschungen innerhalb der Faktoren berechnet. Dieser paarweise Test zwischen zwei Faktoren beinhaltet eine Kontingenztafel-Berechnung, welche auf die einzelnen Ereignisse angewendet wird (BONHAM-CARTER 2002).

Das Grundprinzip der Evidenzgewichtung ist jenes der A-Priori-Wahrscheinlichkeit und der bedingten oder A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit (BAYES 1958): Die Wahrscheinlichkeit P wird mit Hilfe der Erfahrung über das Auftreten eines Ereignisses D in der Vergangenheit unter gleichen Bedingungen berechnet, man bezeichnet diese auch als A-Priori-Wahrscheinlichkeit $P(D)$. Diese kann mit Daten B aus Beobachtungen, Experimenten oder Analysen, welche die Wahrscheinlichkeit beeinflussen, modifiziert werden (MALCZEWSKI 1999, LEONARD & HSU 1999). In der hier beschriebenen Arbeit entsprechen diese Daten den Steuerungsfaktoren, welche auch als „Evidenzen“ bezeichnet werden. Bezieht man jene neuen Informationen in die Berechnung der Wahrscheinlichkeit ein, so resultiert daraus die bedingte oder A-Posteriori-Wahrschein-

lichkeit $P(D|B)$. Diese Wahrscheinlichkeiten werden in Form von logarithmischen Wahrscheinlichkeitsverhältnissen berechnet. Im Folgenden wird die mathematische Basis erläutert.

Zu Beginn erfolgt die Schätzung der A-Priori-Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Rutschungen lediglich auf Basis der bekannten Rutschungen, ohne Einbezug weiterer Informationen (Evidenzen). Die gesamte Fläche des Untersuchungsgebietes t muss in einzelne Basiseinheiten (unit areas) mit definierter Fläche u eingeteilt werden. Die Gesamtanzahl der Einheiten im Untersuchungsgebiet ist demnach $T = t/u$. Nur in einem bestimmten Anteil D dieser Einheiten sind bekannte Rutschungen aufgetreten. Die A-Priori-Wahrscheinlichkeit, dass in einer zufällig gewählten Einheit ein Rutschungsereignis auftritt, ist demnach

$$P(D) = D/T \tag{2}$$

Diese Wahrscheinlichkeit kann auch durch Wahrscheinlichkeitsverhältnisse, den so genannten *Odds* berechnet werden. Odds können am besten als Chancen bezeichnet werden und berechnen sich als Quotienten aus der Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis (Rutschung) eintritt und der Wahrscheinlichkeit, dass es nicht eintritt (Gegenwahrscheinlichkeit). In Odds ausgedrückt kann die A-Priori-Wahrscheinlichkeit als A-Priori-Odds folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$O(D) = \frac{P(D)}{1-P(D)} = \frac{D}{T-D} \tag{3}$$

Nun liegen Evidenzen (wie Hangneigung, Geologie oder Bodenform) vor, welche die A-Priori-Wahrscheinlichkeit $P(D)$ erhöhen oder verringern. Mittels paarweiser Überschneidung der Rutschungen mit jeweils einem Steuerungsfaktor (Evidenz) wird der statistische Zusammenhang zwischen den beiden gemessen und somit beurteilt ob und wie signifikant eine Evidenz für die aufgetretenen Rutschungen ausschlaggebend war oder nicht. Ein Paar von Gewichten, W^+ und W^- , die sogenannten *Evidenzgewichte*, wird für jede Evidenz berechnet, welches abhängig von der räumlichen Beziehung zwischen den Rutschungen und einem Steuerungsfaktor (Evidenz) ist. Die entscheidenden Parameter sind das Vorhandensein (Beobachtung) einer Evidenz B oder die Abwesenheit (keine Beobachtung) dieser Evidenz \bar{B} , also eine binäre Information. Das Vorhandensein einer Evidenz kann in Form von Schnittmengen ausgedrückt werden. So ist die Schnittmenge jener Bereich, wo eine Evidenz B und Rutschungen D vorhanden sind (BONHAM-CARTER 2002 sowie Abb. 2 und 3).

Das Vorhandensein oder die Abwesenheit (in der Statistik spricht man von Beobachtung und keiner Beobachtung) der Evidenz wird nun zur Berechnung der A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit herangezogen. Anders ausgedrückt, werden folgende vier mögliche Wahrscheinlichkeiten berechnet, welche nach einer Verschneidung der Rutschungen und Eviden-

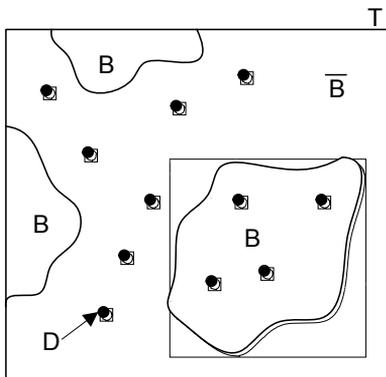


Abb. 2: Das Konzept der Überlagerung von Rutschungen D und einer Evidenz B (BONHAM-CARTER 2002).

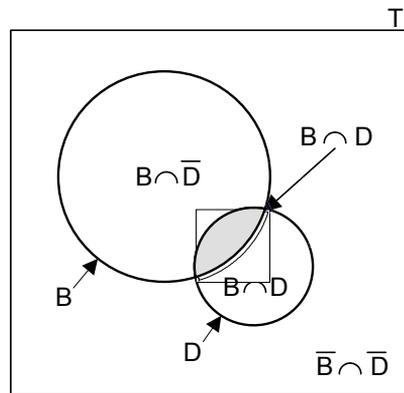


Abb. 3: Der räumlichen Zusammenhang zwischen einer Evidenz B und den Rutschungen D , nach (BONHAM-CARTER 2002).

Tab. 1: Die vier möglichen Kombinationen nach der Verschneidung der Evidenzen und der Rutschungen. N steht für die Fläche beziehungsweise Anzahl der Pixel.

	Evidenz (B) Vorhanden/beobachtet	Evidenz (\bar{B}) nicht vorhanden/beobachtet
Rutschung D vorhanden	$N_1(B \cap D)$	$N_2(\bar{B} \cap D)$
Rutschung \bar{D} nicht vorhanden	$N_3(B \cap \bar{D})$	$N_4(\bar{B} \cap \bar{D})$

Tab. 2: Bedingte Wahrscheinlichkeiten.

	Evidenz (B) Vorhanden/beobachtet	Evidenz (\bar{B}) nicht vorhanden/beobachtet
Rutschung D vorhanden	$P(B \setminus D) = \frac{P(B \cap D)}{P(D)}$	$P(\bar{B} \setminus D) = \frac{P(\bar{B} \cap D)}{P(D)}$
Rutschung \bar{D} nicht vorhanden	$P(B \setminus \bar{D}) = \frac{P(B \cap \bar{D})}{P(\bar{D})}$	$P(\bar{B} \setminus \bar{D}) = \frac{P(\bar{B} \cap \bar{D})}{P(\bar{D})}$

zen möglich sind (BONHAM-CARTER 2002, siehe Tab. 1):

Für jede dieser Möglichkeiten wird nun die A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit bestimmt. Die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass bei beobachteter Rutschung D eine Evidenz B beobachtet ist, lautet

$$P(B \setminus D) = \frac{P(B \cap D)}{P(D)} \tag{4}$$

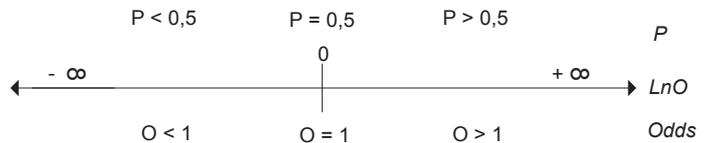
Analog ergeben sich die anderen Wahrscheinlichkeiten, wie in Tab. 2 dargestellt.

Mit diesen bedingten Wahrscheinlichkeiten werden die Wahrscheinlichkeitsverhältnisse *sufficiency ratio* (L_S), *necessity ratio* (L_N) berechnet, welche ein Maß für das Vorhandensein (Beobachtung) oder Abwesenheit (nicht Beobachtung) einer Evidenz sind.

$$L_S = \frac{P(B \setminus D)}{P(B \setminus \bar{D})} \quad \text{und} \quad L_N = \frac{P(\bar{B} \setminus D)}{P(\bar{B} \setminus \bar{D})} \tag{5) + (6)}$$

L_S drückt das Wahrscheinlichkeitsverhältnis aus, dass bei vorhandener Evidenz eine Rutschung beobachtet bzw. nichtbeobachtet ist. L_N beschreibt das gleiche Verhältnis bei nicht beobachteter Evidenz. L_S und L_N werden für die Berechnung der Evidenzgewichte (W^+ und W^-) verwendet – mit der Besonderheit, dass der natürliche Logarithmus der Wahrscheinlichkeitsverhältnisse angewendet wird. Der Vorteil der logarithmischen Skala liegt darin, dass sie um eine Chance (Odds) von $O = 1$ (dies entspricht einem ausgewogenen Wahrscheinlichkeitsverhältnis von 50:50) und einer Wahrscheinlichkeit von $P = 0,5$ zentriert werden kann (vgl. Abb. 4). Dies ergibt sich aus dem Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeit P , Chance O und dem natürlichen Logarithmus der Chance $\ln O$ (vgl. Tab. 3). Die logarithmische Form der Chancen wird auch als *Logits* bezeichnet.

P	O	$\ln O$
0	0	$-\infty$
0,1	1/9	-2,20
0,2	1/4	-1,39
0,4	2/3	-0,41
0,5	1/1	0
0,6	3/2	0,41
0,8	4/1	1,39
0,9	9/1	2,20
1	∞	∞



Tab. 3 und **Abb. 4:** Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeit (P), Chance (O) und Logits ($\ln O$).

Das logarithmische Wahrscheinlichkeitsverhältnis L_S wird zur Berechnung des Evidenzgewichtes verwendet, welches einen positiven Zusammenhang zwischen Rutschungen und der Evidenz (aus einer Menge i an Evidenzen) ausdrückt (d. h. Evidenz vorhanden); es wird daher auch als positives Gewicht W^+ bezeichnet. Das logarithmische Wahrscheinlichkeitsverhältnis L_N wird zur Berechnung des Evidenzgewichtes verwendet, welches einen negativen Zusammenhang zwischen Rutschungen und der Evidenz (aus einer Menge i an Evidenzen) ausdrückt (d. h. Evidenz nicht vorhanden), daher wird es auch als negatives Gewicht W^- bezeichnet. Aus der Sicht der Statistik muss bei den Gewichten (logarithmischen Chancen) im Grunde von einem *Grad der Überzeugung* gesprochen werden, für eine Rutschung D unter Beobachtung einer Evidenz B . In der Interpretation der Ergebnisse wird dies in der Evidenzgewichtung als *Zusammenhang* zwischen einem Steuerungs-faktor und den Rutschungen angesprochen (BONHAM-CARTER 2002).

$$W_j^+ = \frac{P(B_i \setminus D)}{P(B_i \setminus \bar{D})} \quad \text{und} \quad W_j^- = \frac{P(\bar{B}_i \setminus D)}{P(\bar{B}_i \setminus \bar{D})} \quad (7) + (8)$$

Für jede Evidenzklasse wird sowohl das positive, als auch das negative Gewicht berechnet, beide können größer oder kleiner als Null sein (BONHAM-CARTER et al. 1989). Ist das positive Gewicht $W^+ > 0$, also positiv, und das korrespondierende negative Gewicht $W^- < 0$, also negativ, so bedeutet das, dass ein positiver Zusammenhang zwischen den Rutschungen und der Evidenz besteht. Die Evidenz tritt nicht zufällig bei einer Rutschung auf, sondern es besteht ein positiver Zusammenhang.

Ist das positive Gewicht $W^+ < 0$ negativ und das korrespondierende negative Gewicht $W^- > 0$ positiv, so bedeutet das, dass ein negativer Zusammenhang zwischen den Rutschungen und der Evidenz besteht. Dieser negativer Zusammenhang ($W^+ < 0$ und $W^- > 0$) ist nicht zu verwechseln mit keinem Zusammenhang. Stehen die Evidenzen mit den Rutschungen nicht in Zusammenhang – es besteht also keine Abhängigkeit zwischen den beiden – dann ist $W^+ = W^- = 0$.

Die Interpretation der Gewichte für die Zwecke der Quantifizierung der Rutschanfäll-

igkeit muss vor dem Hintergrund der Grundannahmen, die für die Evidenzgewichtung gelten, gesehen werden. Laut BONHAM-CARTER, 2002, können die Gewichte als *Indikatoren oder Vorhersager* für Rutschungen interpretiert werden. Je größer der positive Zusammenhang ($W^+ > 0$ und $W^- < 0$), desto besser kann die Evidenzklasse als Vorhersager für Rutschungen interpretiert werden. Je stärker der negative Zusammenhang ist ($W^+ < 0$ und $W^- > 0$) desto eher kann die Evidenzklasse als ein Indikator, dass keine Rutschungen auftreten, interpretiert werden.

In der Evidenzgewichtung wird ein weiteres Maß eingesetzt, um den Zusammenhang zu quantifizieren – der Kontrast C_w , welcher sich aus der Differenz des positiven und negativen Evidenzgewichtes ergibt. Demnach ist der Kontrast wie folgt definiert:

$$C_w = W^+ - W^- \quad (9)$$

Um den Grad der Unsicherheit des Kontrastes zu beurteilen, wird nach BONHAM-CARTER (2002) der sogenannte normalisierte Kontrast (studentized contrast) berechnet. Dazu werden die Standardabweichung $\sigma(W)$ und die Varianzen $\sigma^2(W)$ für das positive und negative Gewicht nach BISHOP et al. (in BONHAM-CARTER 2002) ermittelt. Die Varianz für den Kontrast C_w ergibt sich aus der Summe der Varianzen der Gewichte, die sich wie folgt berechnen:

$$\sigma^2(W^+) = \frac{1}{N(B \cap D)} + \frac{1}{N(B \cap \bar{D})} \quad (10)$$

und

$$\sigma^2(W^-) = \frac{1}{N(\bar{B} \cap D)} + \frac{1}{N(\bar{B} \cap \bar{D})} \quad (11)$$

Nach BONHAM-CARTER, 2002, berechnet sich der normalisierte Kontrast (studentized contrast) $S(C)$ aus dem Verhältnis zwischen Kontrast C_w und seiner Standardabweichung $\sigma(C)$, also

$$S(C) = \frac{C_w}{\sigma(C)} \quad (12)$$

Die Varianzen der Gewichte sind weiters nützlich um die Unsicherheit bei der Berechnung der A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit zu ermitteln.

Sind die Evidenzgewichte für jede Evidenzklasse berechnet, so werden diese nun ver-

wendet, um eine flächendeckende Berechnung der A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit unter Integration aller Evidenzen zu berechnen. Dabei wird die A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit wiederum unter Einsatz von Wahrscheinlichkeitsverhältnissen, den Odds, berechnet. A-Posteriori-Odds werden mit Hilfe der zuvor berechneten A-Priori-Odds (vgl. Gleichung 3) und L_S und L_N berechnet (AGTEBERG & BONHAM-CARTER 1990). Die A-Posteriori-Odds für das Auftreten einer Rutschung D bei vorhandener Evidenz B werden wie folgt berechnet. Gleichmaßen werden die A-Posteriori-Odds für das Auftreten einer Rutschung D bei nicht vorhandener Evidenz \bar{B} folgendermaßen berechnet:

$$O(D \setminus B) = O(D) \cdot \frac{P(B \setminus D)}{P(B \setminus \bar{D})} \quad (13)$$

und

$$O(D \setminus \bar{B}) = O(D) \cdot \frac{P(\bar{B} \setminus D)}{P(\bar{B} \setminus \bar{D})} \quad (14)$$

Wie bereits erwähnt, kommt in der Evidenzgewichtung der natürliche Logarithmus für die Wahrscheinlichkeitsverhältnisse zum Einsatz, woraus sich aus den oben berechneten A-Posteriori-Odds die sogenannten A-Posteriori-Logits ergeben. Der natürliche Logarithmus wird auf beiden Seiten der Gleichungen 13 und 14 angewendet (BONHAM-CARTER 2002). Daraus ergibt sich in vereinfachter Schreibweise (Ersetzen mit W^+ und W^-) die folgenden beiden Ausdrücke:

$$\ln O(D \setminus B) = \ln O(D) + W^+ \quad (15)$$

und

$$\ln O(D \setminus \bar{B}) = \ln O(D) + W^- \quad (16)$$

Die A-Posteriori-Logits einer Rutschung D unter vorhandener Evidenz B und die A-Posteriori-Logits einer Rutschung D bei nicht vorhandener Evidenz \bar{B} .

Liegen mehrere Evidenzen B_n für die Modellierung vor, so werden diese in folgender Form nach den Regeln von Bayes zum Endergebnis integriert:

$$\ln O(D \setminus B_1 \cap B_2 \cap B_3 \cap \dots \cap B_n) = \ln O(D) + \sum_{i=1}^n W^+ \quad (15)$$

und

$$\ln O(D \setminus \bar{B}_1 \cap \bar{B}_2 \cap \bar{B}_3 \cap \dots \cap \bar{B}_n) = \ln O(D) + \sum_{i=1}^n W^- \quad (16)$$

Diese A-Posteriori-Logits entspricht dem Grad der Überzeugung, dass eine Rutschung unter beobachteten Evidenzen auftritt. Diese Funktionen können der Methodengruppe der Favorisierungsfunktionen zugeordnet werden, die CHUNG & FABBRI (2003, 2005) als Überbegriff für jene mathematischen Grundlagen eingeführt haben, die für die räumliche Vorhersagemodellierung angewendet werden. Diese Favorisierungsfunktionen berechnen einen Index, welcher den Grad der Überzeugung, Plausibilität, Zuverlässigkeit oder Wahrscheinlichkeit angeben, dass eine entsprechende räumliche Einheit in der Zukunft ein Ereignis (Rutschung) fällt. Diese Erstreckung auf die Zukunft kann aufgrund der Annahme geschehen, dass zukünftige Ereignisse unter den gleichen Bedingungen stattfinden, wie jene in der Vergangenheit. Daher wird dieser Grad der Überzeugung in der Evidenzgewichtung unter Geltung dieser Grundannahme als Eintrittsmöglichkeit für ein Ereignis interpretiert (BONHAM-CARTER 2002). Die Eintrittsmöglichkeit für eine Rutschung wird in der Geomorphologie als Rutschanfälligkeit bezeichnet. Das Endergebnis der Berechnung ist daher ein Maß für die Rutschanfälligkeit unter Berücksichtigung der Steuerungsfaktoren.

Diese Werte, die als Grad der Rutschanfälligkeit interpretiert werden, werden so reskaliert, dass das Gesamtmaß der bedingten Unabhängigkeit erfüllt wird. Die Methode der Evidenzgewichtung bietet für die Überprüfung der gesamten bedingten Unabhängigkeit zwischen den Evidenzen einen einfachen Test. Das Produkt aus Fläche $N(A)$ und A-Posteriori-Logits $\logit(P)$, beide aufsummiert über alle Klassen, entspricht der Anzahl an Ereignissen, welche durch das Modell berechnet bzw. vorhergesagt werden:

$$N(D)_{\text{berechnet}} = \sum_{k=1}^m \logit(P_k) \cdot N(A)_k \quad (19)$$

Wobei $k = 1, 2 \dots m$ die Pixel der Karte sind. Dieser Gleichung liegt die Annahme zu Grun-

de, dass die A-Posteriori-Logits der durchschnittlichen, bekannten Rutschungsdichte entspricht. Wenn die berechnete Anzahl von Rutschungen viel größer ist, als die tatsächlich bekannte Anzahl, dann ist das ein Indiz dafür dass die χ^2 Statistik verletzt wurde (vgl. Abschnitt 3, Absatz 5). Ein Verhältnis wird dann berechnet zwischen der tatsächlich bekannten Anzahl von Rutschungen und der berechneten Anzahl an Ereignissen. Liegt der Wert dieses Verhältnisses unter 0,5 (50%) so ist bedingte Abhängigkeit gegeben.

4 Durchführung und Ergebnisse der Evidenzgewichtung

Historische Rutschungsereignisse, sowie deren Steuerungsfaktoren müssen bei der Durchführung in Form von GIS-Karten als Input für die BAYES Wahrscheinlichkeitsberechnung zur Verfügung stehen. Bei dieser Arbeit standen lediglich sehr generelle geologische Daten, welche von dem regionalen, digitalen „Geowissenschaftlichen Atlas Baden-Württemberg“ (LGRB 1998) stammen, zur Verfügung. Potenzielle Klüfte, Falten und Störungszonen in der Tektonik lagen durch eine ver-

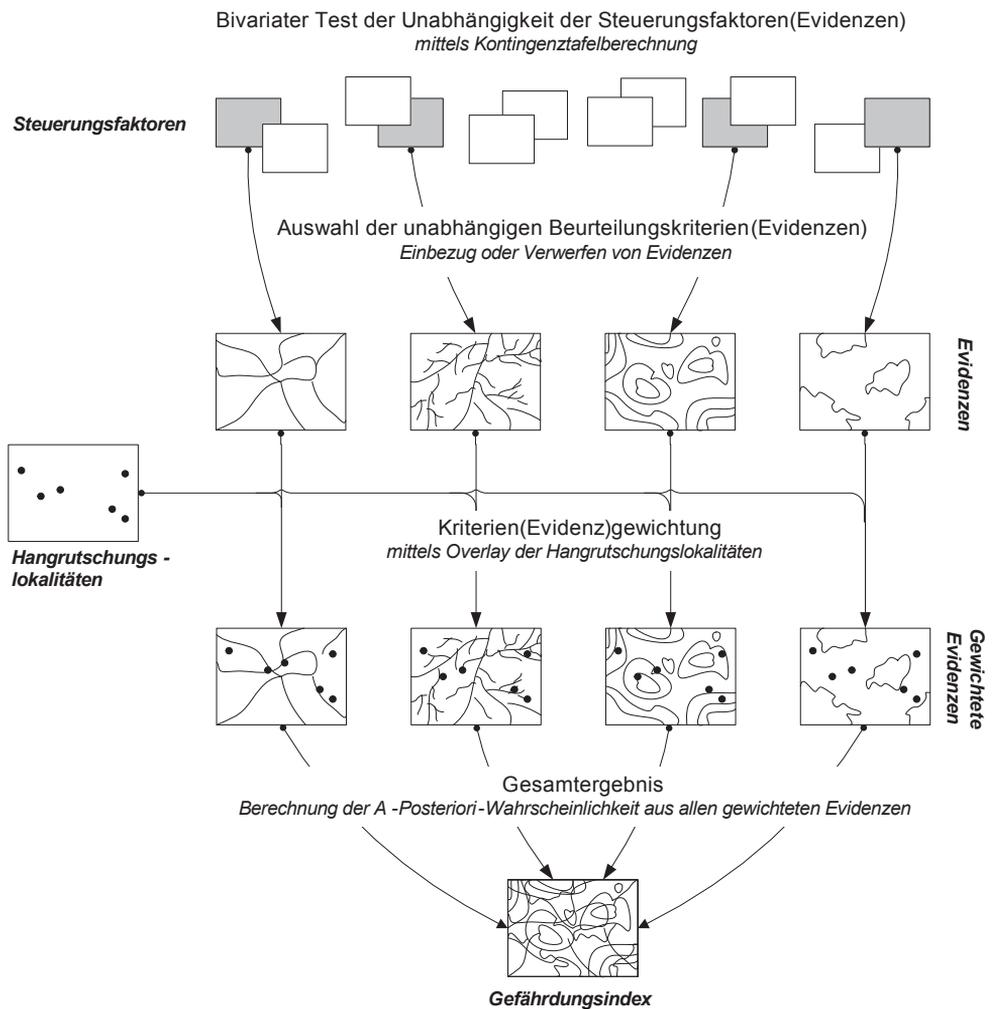


Abb. 5: Schematisch dargestellter Ablauf der Evidenzgewichtung (NEUHÄUSER 2005).

Tab. 4: Eingangsdaten für die Steuerungsfaktoren im Untersuchungsgebiet.

THEMA/ Steuerungsfaktor	Maßstab/ Auflösung	Quelle	Beschreibung
BODENFORM/ Leitbodenform	1 : 150.000	KREJA & TERHORST 2005	Vorherrschende Bodengesellschaft beschrieben auf der Basis der Typen, Subtypen und Varietäten.
GEOLOGIE/ Geologische Einheiten	1 : 150.000	KREJA & TERHORST 2005	Große geologische Baueinheiten der Schichtstufenlandschaft (Trias und Jura) der Albhochfläche und des Albvorlandes.
GEOLOGIE/ Entfernung zur Traufkante	1 : 150.000	KREJA & TERHORST 2005	Eine Distanzoberfläche zur Traufkante, welche die wesentliche morphologische Grenzlinie in der Schichtstufenlandschaft ist. Hier wird eine höhere Anzahl von Rutschungen beobachtet.
HYDROGEOLOGIE/ Hydrogeologische Einheiten	1 : 150.000	KREJA & TERHORST 2005	Hydrologische Baueinheiten der Schichtstufenlandschaft (Trias und Jura) der Albhochfläche und des Albvorlandes.
TEKTONIK/ Lineament-Dichte	30 m	THEILEN-WILLIGE 2005	Dichteoberfläche berechnet aus der Lineament-Dichte. Lineamente deuten auf potenzielle Falten und Störungszonen hin.
TEKTONIK/ Lineament-Distanz	30 m	THEILEN-WILLIGE 2005	Distanzoberfläche zu den kartierten Lineamenten.
GEOMORPHOLOGIE/ Geomorphologische Einheiten	1 : 200.000	DURWEN et al. 1996	Große geomorphologische Einheiten. Zu den Standortkomplexen liegen Angaben zu Bodengründigkeit, Wärmestufe, Feuchtestufe und Kaltluftgefährdung vor.
TOPOGRAPHIE/ Hangneigung	90 m	SRTM 2004	Maximale Hangneigung berechnet aus dem SRTM Höhenmodell.
TOPPGRAPHIE/ Hangwölbung	90 m	SRTM 2004	Gesamt-Hangwölbung berechnet aus der vertikalen und horizontalen Wölbung auf Basis des SRTM Höhenmodells.
RUTSCHUNGEN/ Rutschereignisse	1 : 50.000	THEIN 2000	Rezente Rutschungen

gleichende Satellitenbild-Analyse (einschließlich Lineament-Analyse) der geologischen Struktur vor (THEILEN-WILLIGE 2005). Hangneigung und Hangwölbung wurden aus dem frei erhältlichen SRTM Geländemodell mit einer Auflösung von 90 m berechnet (SRTM 2004). Die vorhandenen Daten sind in Tab. 4 zusammengefasst. Die historischen Rutschungsereignisse standen durch die geomorphologischen Studien (THEIN 2000, KALLINICH 1999) über jüngere Rutschungen, die innerhalb der letzten 200 Jahre aufgetreten sind, zur Verfügung. Diese haben eine durchschnitt-

liche Größe von 0,4 km², jedoch sind viele mit 0,1 km² auch von kleinerem Ausmaß.

Die wesentlichen Schritte bei der Durchführung der Evidenzgewichtung sind in Abb. 5 schematisch dargestellt. Die Daten in Tab. 1 wurden auf ihre Unabhängigkeit geprüft und in die Analyse miteinbezogen.

Nach dem Check der Unabhängigkeit der Daten erfolgt die paarweise Überlagerung der Rutschungen mit jeweils einem Steuerungsfaktor (Evidenz) und die Berechnung der Evidenzgewichte und anderer statistischen Parameter:

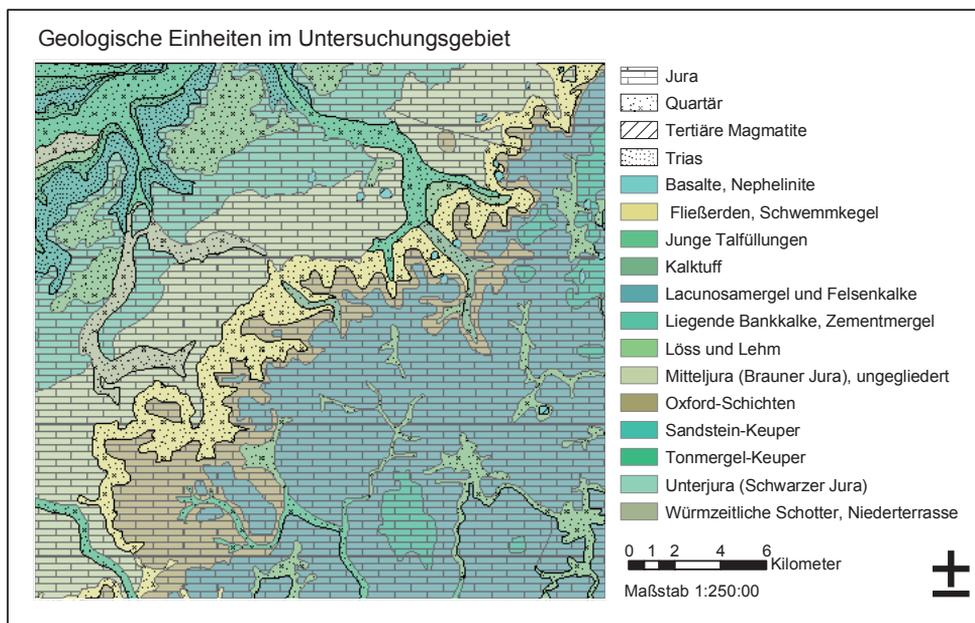


Abb. 6: Geologische Einheiten im Untersuchungsgebiet. Für jede dieser geologischen Klasse werden die statistischen Parameter berechnet (NEUHÄUSER 2005).

- das Paar von Evidenzgewichten, W^+ und W^-
- die Standardabweichungen $\sigma(W^+)$ und $\sigma(W^-)$: die Streuungsmaße für die Gewichte.
- der Kontrast C_w [$C = W^+ - W^-$]: ein allgemeines Maß für den Zusammenhang der Daten.
- die Standardabweichung des Kontrastes $\sigma(C)$: das Streuungsmaß für den Kontrast.
- der normalisierte Kontrast $S(C)$ [$S(C) = C/\sigma(C)$]: der durch die Standardabweichung normalisierter Kontrast ist ein Maß für die Stabilität bzw. Signifikanz der Gewichte.

Durch die Berechnung der Evidenzgewichte konnte festgestellt werden, welche Klassen der Evidenzen mit den Rutschungen in positiven Zusammenhang ($W^+ > 0$ und $W^- < 0$), in negativen Zusammenhang ($W^+ < 0$ und $W^- > 0$) oder nicht in Zusammenhang ($W^+ = W^- = 0$) stehen. Für jene Klassen, in denen keine Rutschungen vorliegen, können keine statistischen Parameter berechnet werden. Es wird angenommen, dass diese keinen Einfluss auf die Rutschungen, die in der Vergangenheit aufgetreten sind, haben. Die Berechnung der

Gewichte und ihrer statistischen Parameter wird in Abb. 7 am Beispiel der Geologie gezeigt. Die korrespondierende Karte über die räumliche Verteilung der geologischen Einheiten ist in Abb. 6 dargestellt. Für jede Evidenzklasse (geologische Einheit) wird das korrespondierende Paar an Evidenzgewichten und deren Streuungsmaße berechnet.

Laut BONHAM-CARTER, 2002, werden die Gewichte als Indikatoren für Rutschungen interpretiert. Dies gilt nur unter der Voraussetzung, dass alle Grundannahmen der Evidenzgewichtung gelten (siehe Abschnitt 3). Je größer der positive Zusammenhang ($W^+ > 0$ und $W^- < 0$), desto besser kann die Evidenzklasse als Indikator für Rutschungen interpretiert werden. Je stärker der negative Zusammenhang ist ($W^+ < 0$ und $W^- > 0$) desto eher kann die Evidenzklasse als ein Indikator, dass keine Rutschung auftreten, interpretiert werden. Gewichte von 0,1 bis 0,5 sind schlechte Indikatoren, Gewichte von 0,5 bis 1,0 sind moderate Indikatoren. Starke Indikatoren sind bei Gewichten von 1,0 bis 2,0 gegeben und bei Gewichten über 2,0 liegen sehr starke Indikatoren vor (BONHAM-CARTER 2002).

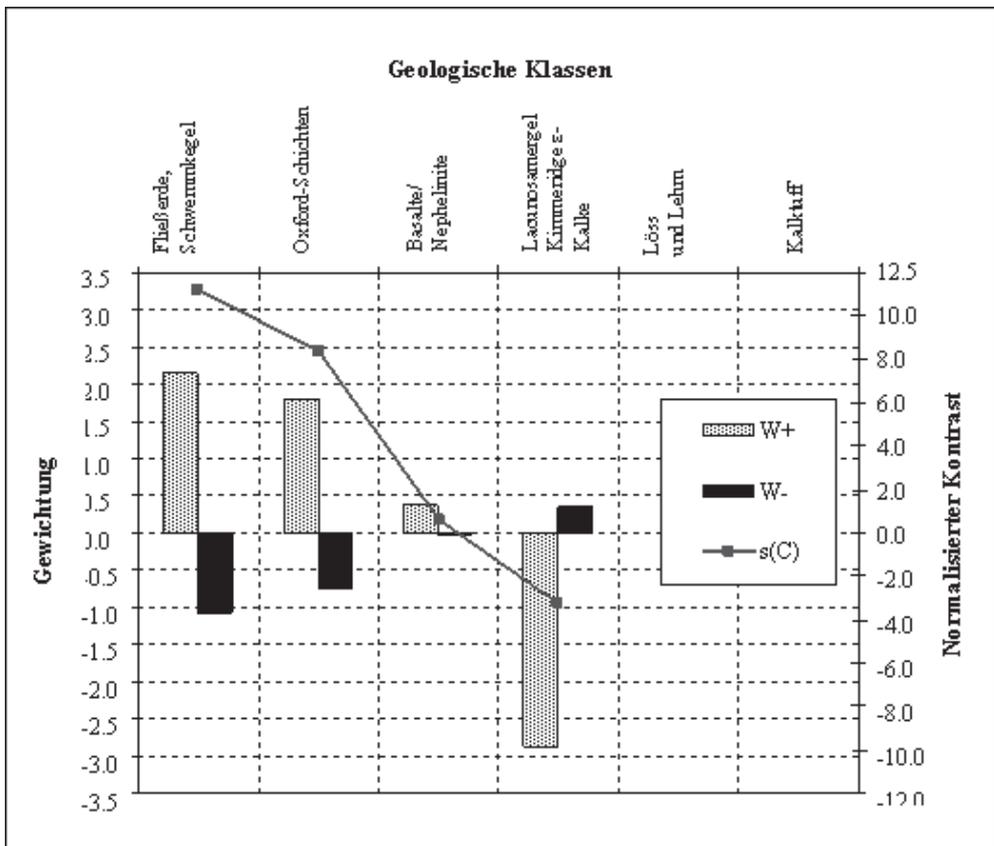


Abb. 7: Die Berechnung der Gewichte und ihrer statistischen Parameter am Beispiel der Geologie. Diese Gewichtung wird zur Interpretation der Geologie als Rutschungsindikator verwendet. Hangschutt, Fließerden, Rutschmassen und Schwemmkegel (4) sowie die Oxford-Schichten (63) sind demnach signifikante Indikatoren für Rutschungen. Lacunosamergel und Felsenkalke (40) sind mit ihrem negativen Kontrast eindeutige Indikatoren für Hangstabilität. Alle anderen geologischen Einheiten (1 und 3) haben keinen Zusammenhang mit den Rutschungen, da keine Rutschungen in diesen Klassen vorliegen.

In Tab. 5 sind jene Faktoren zusammengefasst, die einen hohen positiven Zusammenhang mit den bekannten Rutschereignissen aufweisen. Diese Faktoren können als die wesentlichen Indikatoren für Rutschungen im Untersuchungsraum interpretiert werden. Besonders die steilen Lagen, welche aus Umlagerungssedimenten wie Kalktuffen, Hangschutt, Fließerden und Schwemmkegel bestehen, sind Indikatoren für Rutschungen. Diese Lagen sind daher besonders rutschanfällig. Die starke Prägung durch Feinsedimentanteile in diesen Lagen ergibt eine Konsistenz, die für Hanginstabilitäten prädestiniert ist. Die Oxford-Kalke des Weißjura, welche als Stu-

fenbilder den Albtrauf formen, wurden als Rutschungsindikator bestätigt. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Analysen von KALLINICH (1999) und THEIN (2000). Die Hauptbodenform des Albanstieges und der steilen Hänge der Albtäler (Pararendzina aus steinig-tonigen Fließerden über Mergelsteinersatz) wurde als wesentlicher Rutschungsindikator identifiziert. Dieser Bodentyp wird im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes von Pararendzinen aus steinig-tonigen Fließerden als Rutschungsindikator verdrängt. Auch die Bodenformen weisen, wie die Geologie, auf die Bedeutung des Tongehaltes der Deckschichten und Böden hin. Die Einschätzung des

Tab. 5: Zusammenfassung der Evidenzklassen, welche eine Indikatorfunktion für Rutschungen besitzen (NEUHÄUSER 2005).

Steuerungsfaktor/Evidenz	Evidenzklasse	W^+	$S(C)$
Geologische Einheit	Hangschutt, Fließerden, Rutschmassen, Schwemmkegel des Quartär	2,15	11,27
	Oxford-Schichten (Jura)	1,79	8,43
Leitbodenform	Pararendzina aus lehmig-tonigen Rutschmassen über Mergelsteinzersatz und Rendzina aus Hangschutt	3,19	12,12
	Pararendzina aus steinig-tonigen Fließerden über Mergelsteinzersatz	2,27	10,30
Hangneigung	25° bis 26°	1,47	2,08
	24° bis 25°	1,90	3,77
	23° bis 24°	1,62	3,24
	22° bis 23°	1,93	5,05
	21° bis 22°	1,68	4,42
	20° bis 21	1,70	5,07
	19° bis 20°	1,69	5,54
	18° bis 19°	1,87	7,30
	17° bis 18°	1,81	7,49
	16° bis 17°	1,70	7,26
	15° bis 16°	1,74	8,06
	14° bis 15°	1,79	8,98
	13° bis 14°	1,75	9,15
Hangwölbung	> 0,2 bis 0,3 (konvex)	0,94	2,52
	> 0,3 bis 0,5 (konvex)	1,47	3,29
Dichte von Lineamenten und Störungszonen	26 bis 27	1,56	4,13
	25 bis 26	1,83	5,98
	24 bis 25	1,85	6,55
	23 bis 24	2,09	8,72
	22 bis 23	2,02	8,65
Entfernung zur Traufkante	200m bis 300m	2,04	8,71
	300m bis 400m	2,05	9,91

Hangneigungsbereichs von 11° bis 26° als rutschungsbegünstigend deckt sich mit der Analyse von THEIN (2000), der ein gehäuftes Auftreten von Rutschungen in einem Bereich von 10° bis 30° festgestellt hat.

Die zuvor auf Klassenbasis berechneten statistischen Parameter werden dazu verwen-

det, eine optimale Reklassifizierung (bzw. Generalisierung der Daten) der Steuerungsfaktoren zu erreichen. Diese Reklassifizierung dient dazu, die räumliche Beziehung zwischen den Steuerungsfaktoren und den Rutschungen bestmöglich auszudrücken. Dieser Schritt reduziert die Anzahl der Klassen, die gut inter-

pretierbar ist und die Aussagekraft der Analyse erhöht. Genau gesagt, werden die Steuerungsfaktoren in drei aussagekräftige Klassen aggregiert:

- ($N = 0$), Klasse in der keine Rutschungen vorliegen und daher keine statistische Auswertung erfolgt
- ($C_w < 0$), Klasse mit keinem oder negativem Zusammenhang mit den Rutschungen
- ($C_w > 0$), Klasse mit positivem Zusammenhang zu den Rutschungen, zur Reklassifizierung werden der Kontrast C_w und die Anzahl der Rutschungen N herangezogen.

Als letzter Schritt erfolgt die Verschneidung aller Evidenzen und die Berechnung des Grades der Überzeugung (A-Posteriori-Logits, vgl. Gleichungen (17) und (18)), dass eine Rutschung unter beobachteten Evidenzen auftritt. Das Endergebnis der Berechnung kann als Maß für die Rutschanfälligkeit unter Berücksichtigung der Steuerungsfaktoren angesehen werden. Die Kombination der Faktoren erfolgt durch die lagebezogene Verschneidung, wobei alle Evidenzklassen miteinander kombiniert werden. Die berechneten Werte für die Rutschanfälligkeit liegen zwischen null und 91%.

Der Test der bedingten Unabhängigkeit (vgl. Gleichung (19)) ergab einen Wert von 0,025, welcher auf bedingte Abhängigkeit der Steuerungsfaktoren im Modell und folglich auf eine Überschätzung der A-Posteriori-Logits (der Rutschanfälligkeit) hinweist. Die durch diesen Wert normalisierte Rutschanfälligkeiten (A-Posteriori-Logits) liegen zwischen 0 und 2,3%. Abb. 8 zeigt die berechnete Rutschanfälligkeit (ohne Berücksichtigung der Unsicherheiten) für die rezenten Rutschungen. *Aufgrund der bedingten Abhängigkeit im Modell müssen diese als relative Werte betrachtet werden.*

Die Überprüfung des Modells erfolgte mit Hilfe der Berechnung der *Vorhersagerate* (CHUNG & FABBRI 2003). Dabei wird untersucht, inwieweit bekannte Rutschungen, die allerdings nicht in die Modellierung mit einbezogen wurden und daher unabhängig sind, mit der berechneten Gefährdungszonierung koinzidiert. Diese unabhängigen Rutschungen können folglich als zukünftige Ereignisse betrachtet werden.

Die Berechnung der Vorhersagerate erfordert zu Beginn die Trennung der bekannten Rutschungen in eine Modellierungsgruppe und eine Validierungsgruppe, die durch das Zu-

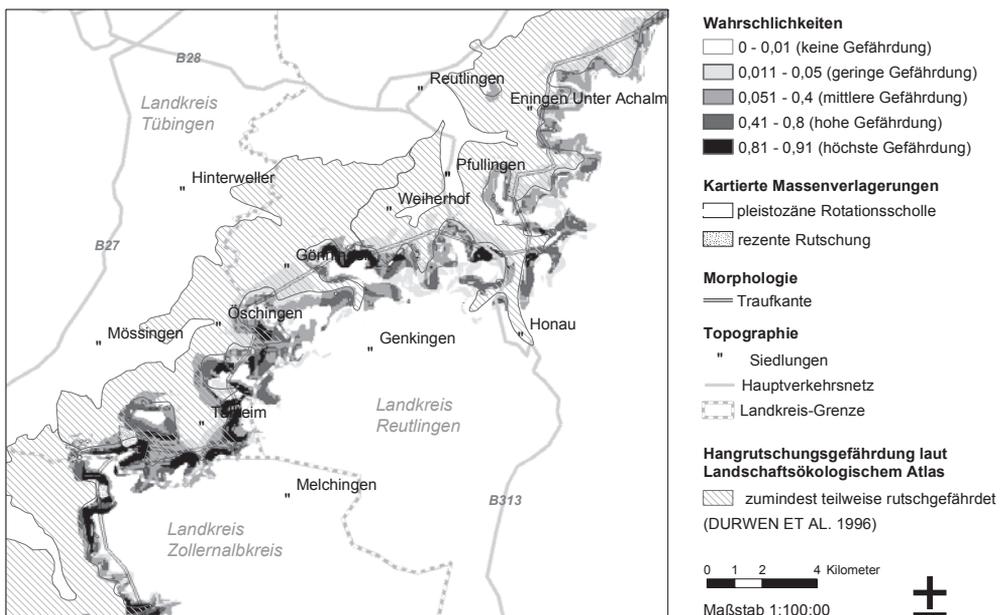


Abb. 8: Rutschanfälligkeit für rezente Rutschungen am Albrauf.

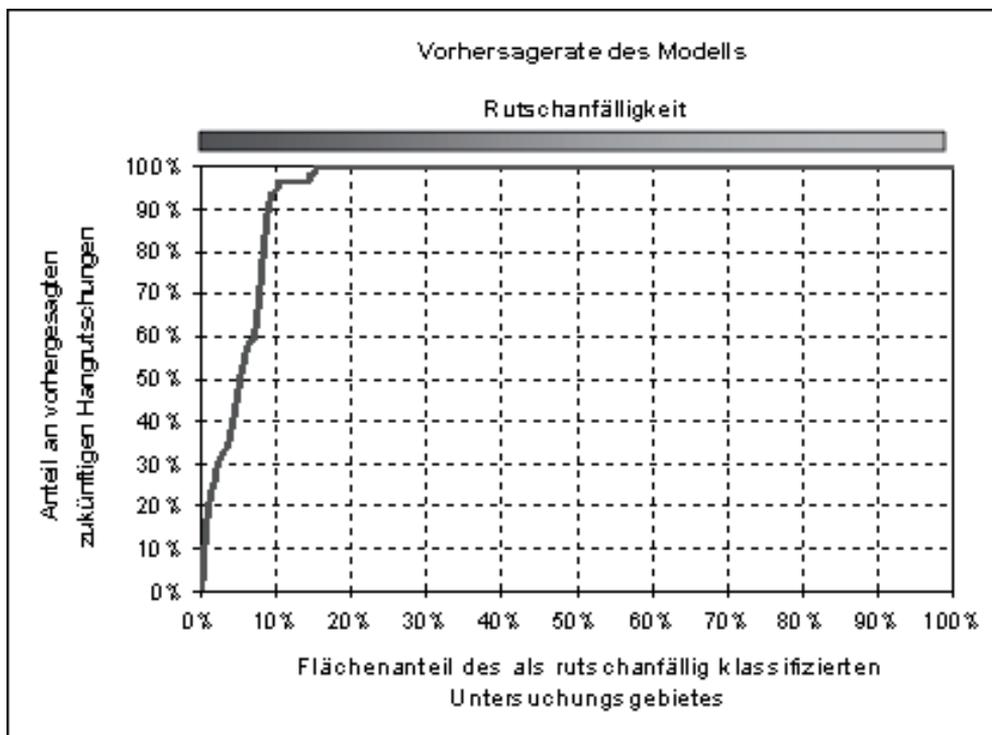


Abb. 9: Die berechnete Vorhersagerate des angewandten Modells.

fallsprinzip ausgewählt wurden. Die Modellierungsgruppe entspricht jenen Rutschungen, die zur Berechnung der Rutschanfälligkeit verwendet werden. Die Validierungsgruppe ist eine kleine Teilgruppe, die zur Überprüfung des Modells verwendet wird. Das Verfahren der Evidenzgewichtung wird erneut mit der Modellierungsgruppe durchgeführt. Das Ergebnis wird anschließend dem eigentlichen Ergebnis aus der Berechnung mit der Modellierungsgruppe gegenübergestellt. Das heißt, die beiden Karten werden miteinander überlagert und mittels zentraler Statistik die Anzahl der erfassten Rutschungen pro räumliche Einheit ermittelt. Anschließend werden die Rutschungen sowie der Flächenanteil pro räumliche Einheit, beginnend bei der höchsten Rutschanfälligkeit, kumuliert. Somit stellt die Vorhersagerate die kumulierten Rutschungen dem kumulierten Flächenanteil des Untersuchungsgebietes gegenüber, beginnend mit jenen Bereichen, welche die höchste Eintrittswahrscheinlichkeit besitzen. Diese Berechnung zeigte, dass bereits mit 10% der

Karte (mit höchster Rutschanfälligkeit) 95% der unabhängigen Rutschungen erfasst, also durch das Modell „vorhergesagt“ werden konnten (vgl. Abb. 9).

5 Diskussion

Mit Hilfe der Evidenzgewichtung konnten in der vorliegenden Arbeit jene Hänge beurteilt werden, für die keine Informationen über Rutschungen vorlagen. Die Zielsetzung der räumlichen Vorhersage wurde erreicht. Die Methode der Evidenzgewichtung berechnet mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverhältnissen und Chancen einen Grad der Überzeugung, dass Rutschungen bei den untersuchten Steuerungsfaktoren auftreten. Es können Zonen ausgewiesen werden, mit unterschiedlichen Grad an Überzeugung, dass Rutschungen unter gegebenen Faktorenkonstellationen auftreten. Es trifft also Aussagen über die Möglichkeit, des Auftretens von Rutschungen. Die Rutschanfälligkeit ist definiert als die Mög-

lichkeit, dass ein Ereignis in einem bestimmten Gebiet auftritt und bestimmt diese auf der Basis des Zusammenhangs zwischen den Steuerungsfaktoren für Rutschungen und der räumlichen Verteilung von in der Vergangenheit aufgetretenen Rutschungen (BRABB 1984). Damit eignet sich diese Methode zur Untersuchung der Rutschanfälligkeit. Diese konnte durch die berechneten Wahrscheinlichkeitsverhältnisse (A-Posteriori-Logits) auf regionalem Niveau quantifiziert werden, obwohl sie im Modell systematisch überschätzt wurden. Betrachtet man die berechneten Werte jedoch nicht als absolute Größen, sondern als *relative Werte* für die Rutschanfälligkeit, so haben sie dennoch Gültigkeit und Aussagekraft.

Die angewandte Methodik stuft den gesamten Albrauf als mehr oder weniger rutschanfällig ein. Dies ist auf die wenig detaillierten Eingangsdaten zurück zu führen, welche nur einen allgemeinen Überblick über das Gebiet geben können. Sowohl der Erfassungsmaßstab der Geologie und Böden, als auch die Auflösung des Höhenmodells geben auf lokaler Ebene generalisierend Auskunft über die vorliegenden Bedingungen. Um das Kleinrelief und alle Rutschungen detailgenau zu erfassen, müsste die Auflösung des Geländemodells mindestens 10 m betragen. Auf regionalem Niveau (1:150.000) ist die resultierende Karte allerdings eine geeignete Basis, da sie eine Abschätzung der Hangstabilität in diesem Maßstab ermöglicht. Sie dient in erster Linie dazu, Gebiete einzugrenzen, die einer Geländeuntersuchung vor Ort oder sogar einer detaillierten geotechnischen Analyse unterzogen werden sollen. Deshalb kann sie für raum- und landschaftsplanerische Zwecke zum Einsatz kommen und eine Entscheidungsgrundlage für Siedlungsentwicklung, Landnutzung und Infrastrukturplanung darstellen (PAPATHOMA-KOEHLE et al. 2007).

Generell konnte herausgestellt werden, welche der vorhandenen Faktoren den größten Zusammenhang zu den Rutschungen aufweisen und daher als Indikatoren betrachtet werden können. Das generierte Modell trifft somit für seinen räumlichen Geltungsbereich Aussagen über Zusammenhänge in dem natürlichen System über Hangstabilität und -instabilität.

Die Grundannahme der Evidenzgewichtung über die Unabhängigkeit der Steuerungsfaktoren hinsichtlich des Auftretens von Rutschungen, stellte sich bei der Anwendung des Modells als Nachteil heraus. Totale bedingte Unabhängigkeit ist in der Praxis sehr unwahrscheinlich. Diese Annahme steht prinzipiell den komplexen Zusammenhängen in einem geomorphologischen System entgegen und ist daher nicht immer auf die verfügbaren Daten zureffend. Daher wird eine teilweise Abhängigkeit (bis 50%) toleriert. Erst bei Überschreitung dieses Grenzwertes wird von bedingter Abhängigkeit gesprochen. Eine Verletzung dieser Annahme resultiert in unrealistischen Wahrscheinlichkeitswerten. Dieses Problem kann aber umgangen werden, indem die Daten hinsichtlich ihrer Unabhängigkeit getestet werden und nur die unabhängigen Faktoren im Modell miteinander kombiniert werden. Dies erfordert das Verwerfen der abhängigen Faktoren, wodurch die Datenverfügbarkeit und somit die Beurteilungskriterien für die Rutschanfälligkeit reduziert werden. Diese Grundannahme ist allerdings die Voraussetzung dafür, dass die Steuerungsfaktoren getrennt von einander beurteilt werden können und so ihre Bedeutung für den Rutschungsprozess überhaupt bewertet werden kann.

Wie oben erwähnt, ist die angewandte Methodik durch die Annahme der bedingten Unabhängigkeit eingeschränkt. Sie ist aber im Gegensatz zu anderen parametrischen Methoden nicht durch die Bedingungen der klassischen Statistik eingeschränkt, wie zum Beispiel die Hypothese über die Verteilung der Daten. Daten mit Raumbezug können beispielsweise nur selten die Annahme der Normalverteilung erfüllen. Häufig angewendete Methoden für die Rutschanfälligkeitsbewertung sind die multiple logistische Regressionsanalyse, die Diskriminanzanalyse, Faktorenanalyse und Clusteranalyse. Bei diesen Methoden werden derartige Bedingungen allerdings oft vorausgesetzt.

Referenzen

- BAYES, T., 1958: Studies in the History of Probability and Statistics: IX. – THOMAS BAYES' Essay

- Towards Solving a Problem in the Doctrin of Chances. *Biometrika* **45**: 296–315. (Das Essay von BAYES von 1763 in moderner Notation).
- BIBUS, E., 1986: Die Rutschung am Hirschkopf bei Mössingen (Schwäbische Alb) – Geowissenschaftliche Rahmenbedingungen – Geoökologische Folgen. – *Geoökodynamik* **7**: 333–360.
- BIBUS, E. & TERHORST, B., 2001: Mass Movements in South-West Germany. Analyses and Results from the Tübingen Work Group of the MABIS Project. – *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., Suppl.-Bd. **125**: 53–63.
- BONHAM-CARTER, G.F., 2002: Geographic Information Systems for Geoscientist: Modelling with GIS. – In: *Computer Methods in the Geosciences* **13**: 302–334, Pergamon/Elsevier, New York.
- BONHAM-CARTER, G.F., AGTERBERG, F.P. & WRIGHT, D.F., 1989: Weights of Evidence Modelling: A New Approach to Mapping Mineral Potential. – *Statistical Applications in Earth Sciences* **89-9**: 171–183.
- BRABB, E., 1984: Innovative Approaches to Landslide Hazard and Risk Mapping. – *Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides*, Toronto, 307–323.
- BRUNSDEN, D. & PRIOR, D.B. (HRSG.), 1984: *Slope Instability*. – Wiley & Sons Inc., New York, USA, 257–355.
- CHUNG, C.-J.F. & FABBRI, A., 2003: Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. – *Natural Hazards*, Kluwer Academic Publishers **30**: 451–458.
- CHUNG, C.-J.F. & FABBRI, A. 2005: Systematic Procedures of Landslide Hazard Mapping for Risk Assessment using Spatial Prediction Models. – In: *Landslide Hazard and Risk Part I, Conceptual Models in Approaching Landslide Risk Nr. 4*. – John Wiley & Sons, Inc., 5–41.
- DAWID, A.P., 1979: Conditional Independence in Statistical Theory, *Journal of the Royal Statistical Society Series B* **41**: 1–31.
- DIKAU, R., BRUNSDEN, D., SCHRÖTT, L. & IBSEN, M., 1996: *Landslide Recognition: Identification, Movement and Causes*. – John Wiley & Sons, Inc., 251.
- DURWEN, K.-J., WELLER, F., TILK, C., BECK, H., BEUTTLER, H. & KLEIN, S., 1996: *Digitaler Landschaftsökologischer Atlas Baden-Württemberg*. – Institut für Angewandte Forschung (IAF) der Fachhochschule Nürtingen, CD.
- KALLINICH, J., 1999: Verbreitung, Alter und Geomorphologische Ursachen der Massenverlagerungen an der Schwäbischen Alb auf der Grundlage von Detail- und Übersichtskartierungen. – In: *Angewandte Studien zu Massenverlagerungen*, Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe D: Geoökologie und Quartärforschung **5**: 32–43.
- KREJA, R. & TERHORST, B., 2005: Naturgefahren in einem Baugebiet bei Öschingen an der Schwäbischen Alb: GIS-gestützte Ermittlung Rutschungsgefährdeter Gebiete am Schönberger Kapf bei Öschingen. – *Die Erde* **136** (4): 397–414.
- LEONARD, T. & HSU, J.S.J., 1999: *Bayesian Methods: An Analysis for Statisticians and Interdisciplinary Researchers*. – Cambridge University Press, Cambridge, UK, 42–53.
- LGRB – LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU BADEN-WÜRTTEMBERG, 1998. – *GEOWISSENSCHAFTLICHE ÜBERSICHTSKARTEN VON BADEN-WÜRTTEMBERG 1*: 350.000, CD.
- MALCZEWSKI J., 1999: *GIS and Multi-Criteria Decision Analysis*. – John Wiley & Sons, Inc., 127–130.
- NEUHÄUSER, B., 2005: GIS-gestützte, Probabilistische Beurteilung der Gefährdung durch Massenbewegungen: Einsatz von Geoinformationssystemen (GIS) zur Multikriterien Beurteilung der Rutschanfälligkeit dargestellt am Beispiel der Schwäbischen Alb. – Master Thesis, Zentrum für Geoinformatik, Universität Salzburg. Unveröffentlicht.
- NEUHÄUSER, B. & TERHORST, B., 2006: *Landslide Susceptibility Assessment Using Weights-of-Evidence Applied to a Study Area on the Jurassic Escarpment of the Swabian Alb (SW-Germany)*. – *Geomorphology* **86** (1–2): 23–34, Elsevier, Oxford.
- PAPATHOMA-KOEHLE, M., NEUHÄUSER, B., RATZINGER, K., WENZEL, H. & DOMINEY-HOWES, D., 2007: *Towards the Development of a Tool for Assessing the Vulnerability of Communities to Landslides*. – *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHES)* **7**: 765–779.
- SCHÄDEL, K. & STÖBER, I., 1988: *Rezente Großrutschungen an der Schwäbischen Alb*. – *Jahreshefte des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg* **30**: 413–439.
- SRTM – SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION, 2004: *SRTM Digital Topographic Data*. – US Geological Survey's EROS Data Center. <ftp://e0mss21u.ecs.nasa.gov/srtm/> (2007-11-12).
- TERHORST, B., 1997: *Formenschatz, Alter und Ursachenkomplexe von Massenverlagerungen an der Schwäbischen Juraschichtstufe unter besonderer Berücksichtigung von Boden- und Deckschichtenentwicklung*. – *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten* **D2**: 212–213.
- TERHORST, B., 1999: *Distribution of Soils and Solifluction Layers in Landslide Areas of South-West Germany*. – In: *Climatic Change: Paleopedological and Soil Rock Magnetic Approaches*, *Chinese Science Bulletin* **44**: 173–180.

- TERHORST, B., 2001: Mass Movements of Various Ages on the Swabian Jurassic Escarpment: Geomorphologic Processes and their Causes. – Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl.-Bd. **125**: 65–87.
- TERLIEN, M.T.J., VAN WESTEN, C.J. & VAN ASCH, T.W.J., 1995: Deterministic Modelling in GIS-Based Landslide Hazard Assessment. – In: Geographical Information System in Assessing Natural Hazards, Kluwer, Dordrecht, 57–77.
- THEILEN-WILLIGE, B., 2005: Lineament Analysis Based LANDSAT ETM Data for Geological Investigations. – Technical University of Berlin, Germany.
- THEIN, S., 2000: Massenverlagerungen an der Schwäbischen Alb: Statistische Vorhersagemodelle und Regionale Gefährdungskarten unter Anwendung eines Geographischen Informationssystems. – Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe D, Geoökologie und Quartärforschung **6**: 187–192.
- VARNES D.J., 1984: Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice United Nations Educational. – Scientific and Cultural Organization, UNESCO Press, Paris, 63–66.

Anschriften der Autoren:

Dipl.-Ing., MSc (GIS) BETTINA NEUHÄUSER, Tegelerweg 15/2, 1220 Wien, bettina.neuhaeuser@chello.at

Prof. Dr. BIRGIT TERHORST, Institut für Geographie der Universität Würzburg, Am Hubland, D-97074 Würzburg, birgit.terhorst@univie.ac.at

Manuskript eingereicht: März 2008

Angenommen: Dezember 2008