

MoNOE – Modellierung der Sturzprozesse

Herwig PROSKE & Christian BAUER

1. Einleitung

Steinschlag- und Felssturzereignisse stellen aufgrund ihrer hohen zerstörerischen Energie und meist kurzen Vorwarnzeit eine große Gefahr für Menschenleben und Sachwerte dar (siehe z.B. GUZZETTI, 2000, CROSTA & AGLIARDI, 2003). Eine der Vorgaben des Projekts MoNOE war es, durch Modellierung von Sturzprozessen auf der regionalen Ebene (Zielmaßstab 1:25.000) eine Planungsgrundlage für die Raumplanung zu schaffen und kritische Bereiche für Detailuntersuchungen auf der lokalen Ebene zu identifizieren. Dadurch werden große Anforderungen an die Modellierung gestellt, um den Bearbeitungsaufwand trotz des Ausmaßes der zu bearbeitenden Fläche (ca. 15.800 km²) in einem finanzierbaren Rahmen zu halten.

Für die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten für Sturzereignisse müssen sowohl die Disposition für die Auslösung des Prozesses (Abbruchgebiete) als auch die Reichweiten (Sturzbahnen und Ablagerungsgebiete) modelliert werden. Ein entsprechender zweistufiger Modellierungsansatz gewährleistet, dass die resultierenden Gefahrenhinweiskarten den gesamten Wirkungsbereich der Sturzprozesse (Ablösung, Transit, Ablagerung) darstellen.

2. Dispositionsmodellierung

Für die Disposition im Hinblick auf die Auslösung von Steinschlägen und Felsstürzen sind in erster Linie die geologische Situation, die topographischen Verhältnisse sowie die Vegetationsbedeckung ausschlaggebend (MEISL, 1998). Sturzprozesse können in allen steilhangbildenden Festgesteinen, aber auch in Lockergesteinszonen (z.B. Sturzmaterial, Hangschutt, Moränen), auftreten. Das Volumen der potenziellen Sturzmassen ist dabei stark von der Lithologie - vor allem von der Verwitterungsanfälligkeit des Gesteins - abhängig. Eine große Rolle spielt darüber hinaus das Trennflächengefüge und damit die tektonische Beanspruchung der Gesteine. Neben den geologischen gibt es auch zahlreiche topographische Faktoren, welche die Auslösung von Sturzprozessen begünstigen. In erster Linie entscheiden Hangneigung, Reliefausprägung und Oberflächenrauigkeit, ob eine abgelöste Felsmasse in Bewegung geraten kann (JOHN & SPANG, 1979). Aber auch andere Faktoren, wie etwa die Hangwölbung, wirken sich auf die Disposition aus: konvexe Bereiche sind erhöhten Zugspannungen ausgesetzt, wodurch sich die Wahrscheinlichkeit für Sturzprozesse erhöht; konkave Hangbereiche stützen sich dagegen ab.

Der im Projekt MoNOE gewählte methodische Ansatz der Dispositionsmodellierung basiert auf der empirischen Definition von Grenzneigungswinkeln – das sind jene Minimal-Winkel, ab denen es zur Ablösung von Sturzblöcken kommen kann (siehe Tab. 1). Auf dieser Grundlage erfolgt dann die Ausscheidung potenzieller Abbruchzonen durch Verschneidung mit dem hoch aufgelösten Geländemodell auf Basis von Laserscanneraufnahmen.

Geologische Einheit	GNW
Massige kristalline Gesteine der Böhmisches Masse (Pluton)	50°
Schiefrige kristalline Gesteine der Böhmisches Masse (inkl. autochthone Bedeckung)	48°
Unter- und mittelostalpine schiefelige kristalline Gesteine	47°
Quarzite und Schiefer des Zentralalpinen Permomesozoikums	44°
Oberostalpine Kalke und Dolomite und Kalke des zentralalpinen Permomesozoikums	42°

Mergelige Gesteine der Nördlichen Kalkalpen	46°
Klippen-, Flysch- und Molassezone	46°
Hangschutt & glaziale Ablagerungen	38°

Tab. 1: Grenzneigungswinkel (GNW) für die in Niederösterreich auftretenden geologischen Großeinheiten

Für die Kalibrierung und die Verifizierung der Grenzneigungswinkel war es erforderlich, für jeden der definierten lithologischen Homogenbereiche (siehe Tab. 1) möglichst „flache“ Abbruchzonen (d.h. eindeutig als Steinschlag-Herkunftsbereich fungierende Hangabschnitte mit möglichst geringen Hangneigungen) zu identifizieren und im Gelände oder auf Basis von Orthofotos und Geländemodell entsprechend zu vermessen. Spezielle topographische und tektonische Verhältnisse (das betrifft insbesondere ausgeprägte Geländekanten und Störungszonen) wurden über Korrekturwerte für diese Grenzneigungswinkel berücksichtigt. Auch für die Kalibrierung dieser Korrekturwerte sind Daten aus dem Gelände bzw. von Orthofotos wesentlich.

3. Ermittlung repräsentativer Sturzblockgrößen

Für die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten ist die Definition der repräsentativen Größe von Einzelblöcken, die sich aus einem Abbruchgebiet lösen können (Bemessungsereignis) eine weitere wesentliche Voraussetzung. Dafür wurden unter Berücksichtigung des regional-geologischen Rahmens und der geotechnischen Gebirgsfazies der potenziellen Abbruchgebiete Blockgrößen gewählt, die eine für die jeweilige Lokalität angemessene und repräsentative Größe darstellen. Als repräsentatives Ereignis wurde dabei nicht die in den Ablageungsgebieten auf den Sturzhalden maximal zu beobachtende Blockgröße herangezogen, sondern eine Sturzblockgröße, die einer „erheblichen Wahrscheinlichkeit“ von etwa 95% entspricht. Durch die nachfolgende Klassifizierung der Blockgrößen in nur vier Klassen (siehe Tab. 2) besitzt diese Definition für Bemessungsereignisse aber schlussendlich nur mehr relativ geringe Konsequenzen für das Ergebnis der Modellierung. Die Bandbreite der ermittelten Volumina von Blöcken mit einer „erheblichen“ Abbruchwahrscheinlichkeit im Untersuchungsgebiet beträgt ungefähr 0,001 – 5,0 m³.

Volumenklasse	Volumen (cm ³)	Kantenlänge (cm)	Beispiele
I	> 125.000	> 50	Wettersteinkalk, Dachsteinkalk, Gföhler Gneis
II	8.001 – 125.000	20 – 50	Wettersteindolomit, Hauptdolomit, Reiflinger Kalk
III	1.001 – 8.000	10 - 20	Gesteine der Flyschzone
IV	< 1.000	< 10	Hangschutt, quartäre Terrassen

Tab. 2: Volumenklassen und relevante Größenmaße

4. Reichweitenmodellierung

Die Reichweite der Sturzblöcke hängt von zahlreichen Faktoren ab, welche die Eigenschaften der Sturzmasse selbst (Gesamtvolumen; Form, Größe und Materialeigenschaften der Einzelblöcke), die Oberflächenbeschaffenheit des Hanges (Rauigkeit, Plastizität der

Sturzbahn, Hindernisse in der Sturzbahn) und die topographischen Verhältnisse (Böschungshöhe, Fallhöhe, Hangneigung, vertikale Wölbung) betreffen (MEIßL, 1998).

Für die Modellierung der Reichweiten von Sturzereignissen können entweder empirische oder prozessbasierte Verfahren eingesetzt werden. Empirische Methoden basieren auf Zusammenhängen von topographischen Faktoren und der Auslaufdistanz dokumentierter Ereignisse. Diese Methoden führen erfahrungsgemäß zu pessimistischeren Aussagen, also zu größeren Gefahrenhinweisbereichen (DORREN & SEIJMONSBERGEN, 2003). Empirische Ansätze haben vor allem dann ihre Berechtigung, wenn die physikalischen Zusammenhänge nicht ausreichend bekannt sind oder wenn zu wenige Daten zu ihrer Modellierung zur Verfügung stehen - was auf Arbeiten im regionalen Maßstab fast immer zutrifft.

Prozessbasierte Simulationsmodelle beschreiben die Bewegung einzelner Sturzkomponenten nach physikalischen Grundsätzen. Alle Simulationen erfordern möglichst detaillierte Daten über die Hangeigenschaften, um die richtige Dimensionierung der vom Programm verwendeten Parameter zu erlauben. Aufgrund der Leistungsfähigkeit moderner Rechner und der flächendeckenden Verfügbarkeit detaillierter Gelände- und Oberflächenmodelle können einige dieser prozessbasierten Methoden nun auch für regionale Anwendungen eingesetzt werden.

Im Rahmen des Projekts MoNOE wurden je eine empirische und eine prozessbasierte Methode ausführlich getestet, wobei als empirische Methode die Software CONEFALL 1.0 (JABOYEDOFF, 2003) und als prozessbasierte Methode das SAGA Modul RockHazardZone (WICHMANN, 2006) ausgewählt wurden. Nach diesen Tests wurde mit der Abt. für Raumordnung und dem Geologischen Dienst des Landes Niederösterreich vereinbart, die Reichweitenmodellierung für die Gefahrenhinweiskarte ausschließlich auf Basis empirischer Methoden vorzunehmen. Die Ergebnisse der prozessorientierten Modellierung wurden als zu detailliert für den Anwender in der Praxis empfunden. Auch die bremsende Wirkung des Waldes soll in der Modellierung in dieser Phase nicht berücksichtigt werden, wodurch in den Gefahrenhinweiskarten ein „worst case“-Szenario dargestellt wird. Kurzfristige Änderungen der Waldbedeckung, etwa durch Windwurf oder Rodungen, erfordern damit auch keine Neumodellierung.

Für die empirische Reichweitenmodellierung wurde die Software CONEFALL 1.0 (JABOYEDOFF, 2003) verwendet. Das Prinzip der CONEFALL-Methode ist relativ einfach und basiert auf dem Pauschalwinkelansatz. Die Maße zur Beschreibung der Reichweite von Felsstürzen leiten sich dabei in erster Linie aus dem Verhältnis zwischen vertikalem und horizontalem Versatz des von der Massenbewegung betroffenen Materials ab. Diese zwei Strecken spannen einen Winkel auf, der zwar nicht konstant ist, für Bewegungen ähnlichen Typs aber einen eingeschränkten charakteristischen Wertebereich aufweist. Der Pauschalwinkelansatz ist in der Literatur ausführlich beschrieben (z.B. EVANS & HUNGR, 1993, MEIßL, 1998, WIECZOREK et al., 1999). Um empirische Sturzmodelle bestmöglich zu kalibrieren, werden Beobachtungen bezüglich vergangener repräsentativer Sturzprozesse (vor allem Sturzhalden und -blöcke) herangezogen.

Eine möglichst zutreffende Dispositionsmodellierung (Modellierung der potenziellen Abbruchzonen) ist eine entscheidende Voraussetzung. Die dadurch definierten Startpunkte stellen einen der beiden zentralen Eingangsdatensätze für die Reichweitenmodellierung dar. Für diese Startpunkte wird ein Rasterdatensatz generiert. Der zweite Eingangsdatensatz ist ein ebenfalls im Rasterformat vorliegendes flächendeckendes Digitales Geländemodell. Darüber hinaus müssen in der Eingabemaske der Kegelwinkel und die Blockmasse definiert werden. Der Kegelwinkel liegt generell in einem Bereich zwischen 27 und 37° (MEIßL, 1998, JABOYEDOFF, 2003). Im Projekt MoNOE wurde nach zahlreichen Tests und umfangreichen Geländeverifizierungen schließlich ein Winkel von 33° verwendet.

Das Ergebnis der Modellierung erlaubt eine erste Einschätzung der betroffenen Flächen und der Transitdichten. Darüber hinaus ermöglichen einfache mathematische Beziehungen zusätzlich die Abschätzung der erreichten Geschwindigkeiten und der freigesetzten Energien der Sturzkörper (siehe JABOYEDOFF, 2003).

Die Modellierung erfolgte getrennt für die einzelnen Volumenklassen (siehe Tab. 2). Die daraus resultierenden vier Einzelergebnisse wurden für die Darstellung in der Gefahrenhinweiskarte zusammengeführt und anschließend klassifiziert.

5. Klassifizierung

Angelehnt an das Schweizer Risikokonzept für Naturgefahren (WINKLER et al., 2009) erfolgte die Ausweisung der einzelnen Gefährdungsklassen für die Sturzprozesse auf Basis der modellierten Intensität, d.h. der Energie mit der die stürzenden Blöcke auf ein mögliches Hindernis einwirken (in kJ). In der höchsten Gefährdungsklasse sind Stürze mit hohen Intensitäten von mehr als 30 kJ zu erwarten, in der mittleren Gefährdungsklasse Stürze mit niedrigen Intensitäten von weniger als 30 kJ. In der geringsten Gefährdungsklasse sind keine Stürze zu erwarten, aber auch nicht ganz auszuschließen. Durch diese Klassifizierung in nur drei Klassen ist allerdings ein beträchtlicher Informationsverlust im Vergleich mit den ursprünglichen Modellierungsergebnissen in Kauf zu nehmen.

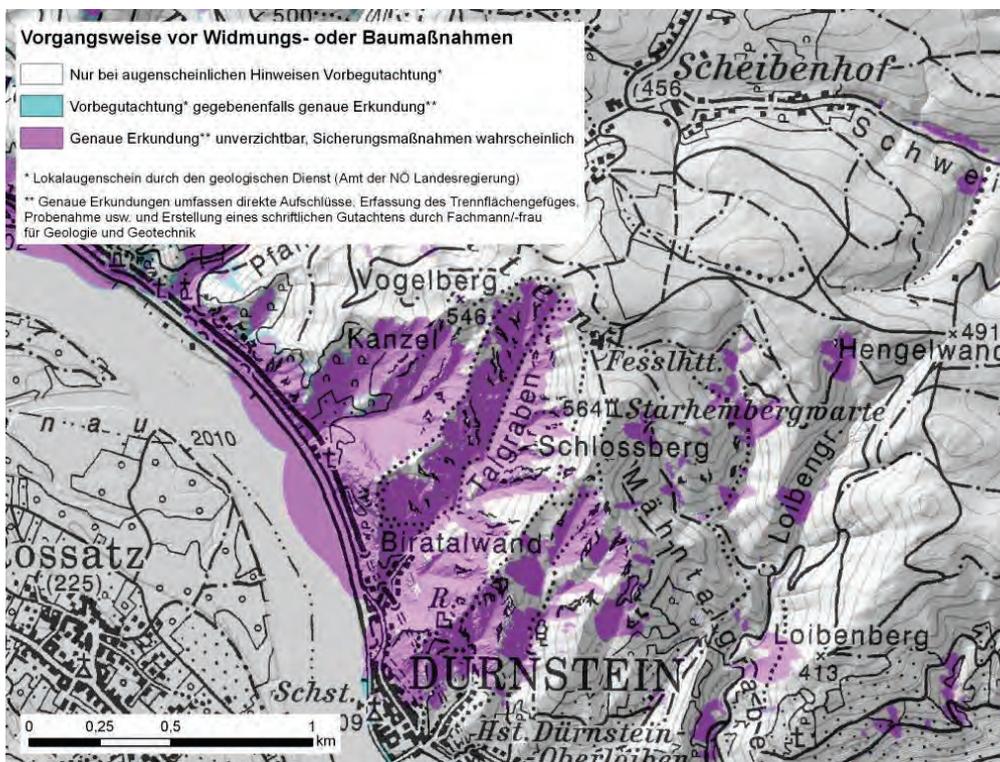


Abb. 1: Ausschnitt aus der Gefahrenhinweiskarte für Sturzereignisse im Raum Dürnstein. Neben der Bahnlinie und der Bundesstraße liegen auch Teile der Stadt Dürnstein innerhalb potenzieller Ablagerungszonen.

In der **Klasse 1 (weiß)** ist zu prüfen, ob augenscheinliche Hinweise auf Sturzprozesse vorhanden sind. Das können am Grundstück oder in der näheren Umgebung liegende Steinbrocken, eine steile Felswand im oder am Rand (hangaufwärts) des Grundstücks oder in Archiven (Baugrunderkater) dokumentierte Sturzprozesse sein. Sofern solche Hinweise nicht bestehen, kann davon ausgegangen werden, dass eine Gefährdung nicht besteht. Andernfalls ist der Geologische Dienst hinzuzuziehen, der dann über die weitere Vorgangsweise entscheidet. Diese Klasse entspricht einer geringen Wahrscheinlichkeit für das tatsächliche Auftreten einer Gefährdung.

In der **Klasse 2 (blau)** wird empfohlen, sich unmittelbar an den geologischen Dienst zu wenden, der nach einem Lokalaugenschein darüber befindet, ob genauere Erkundungen erforderlich sind. Diese Klasse entspricht einer mittleren Wahrscheinlichkeit für das tatsächliche Auftreten einer Gefährdung.

In der **Klasse 3 (violett)** ist die Wahrscheinlichkeit einer tatsächlichen Steinschlaggefahr so hoch, dass von der planenden Gemeinde als Grundlage für die Flächenwidmung eine Expertise eines einschlägigen Fachmanns / einer Fachfrau einzuholen ist. Nur wenn darin eine Eignung festgestellt wird, kann eine Baulandwidmung (oder auch spezielle Grünlandwidmung) erfolgen. In solcherart dargestellten Gebieten ist damit zu rechnen, dass mehr oder weniger aufwendige Sicherungsmaßnahmen erforderlich sein werden. Diese Klasse weist auf eine hohe Wahrscheinlichkeit für das tatsächliche Auftreten einer Gefährdung hin.

6. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Sturzgefährdungsmodellierung können nach Überprüfung mit dem Sturzinventar und umfangreichen Geländeverifizierungen als sehr gut eingestuft werden. Die Gefahrenhinweiskarten können demnach die Gefährdungen im Gelände sehr gut darstellen. Durch die Kombination eines Modells für die Modellierung potenzieller Abbruchzonen und eines Reichweitenmodells für die Modellierung potenzieller Transit- und Ablagerungszonen werden die gesamten Wirkungsbereiche erfasst.

Die Gefahrenhinweiskarte gibt flächendeckend Auskunft über den Grad der Gefährdung durch Sturzprozesse (Steinschlag und Felssturz). In der höchsten Gefährdungsklasse („Genaue Erkundung unverzichtbar“) befinden sich ca. 5% der Fläche aller untersuchten Gemeinden, in der mittleren Gefährdungsklasse („Vorbegutachtung, gegebenenfalls genaue Untersuchung“) ca. 1% und in der niedrigsten Klasse („Nur bei augenscheinlichen Hinweisen Vorbegutachtung“) ca. 94%. Der relativ geringe Anteil an Flächen in der mittleren Gefährdungsklasse ist auf die Wahl der Klassengrenze bei einem Energiewert von 30 kJ entsprechend dem Schweizer Risikokzept für Naturgefahren zurückzuführen. Als potenzielle Abbruchzonen wurde etwa 1% der Fläche des Untersuchungsgebiets klassifiziert. Die höchsten Gefährdungen finden sich in hoher Dichte in den wandbildenden Kalken und Dolomiten der Nördlichen Kalkalpen sowie in geringerer Dichte in den massigen kristallinen Gesteinen entlang der tief eingeschnittenen Haupttäler in der Böhmisches Masse im Waldviertel.

Es ist darauf hinzuweisen, dass aufgrund des gewählten Modellierungsverfahrens eher pessimistische Ergebnisse in die Gefahrenhinweiskarte einfließen, welche die tatsächliche Gefährdungssituation in manchen Fällen überschätzen und dass auch die schützende Wirkung der aktuellen Waldbedeckung nicht berücksichtigt wird.

Eine Einschränkung, auf die noch hinzuweisen ist, ergibt sich aus der Verwendung des Laserscanner-Geländemodells, das lokal Geländestrukturen zeigt, welche in der Natur nicht vorkommen. In diesen Gebieten ist die Modellierung der Abbruchzonen und demzufolge die Reichweitenmodellierung unter Umständen nicht ganz vollständig. Dabei handelt es sich jedoch generell um sehr kleinräumige Strukturen.

7. Literatur

CROSTA, G.B. & AGLIARDI, F. (2003): A Methodology for Physically-based Rockfall Hazard Assessment.- *Natural Hazards and Earth System Sciences* (4), 583 – 598.

DORREN, L.K.A. & SEIJMONSBERGEN, A.C. (2003): Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale.- *Geomorphology* 56(1-2), 49 – 64.

EVANS, S.G. & HUNGR, O. (1993): The Assessment of Rock Fall Hazards at the base of Talus Slopes.- *Canadian geotechnical Journal* (30/4), 620 – 636.

GUZZETTI, F. (2000): Landslide Fatalities and the Evaluation of Landslide Risk in Italy.- *Eng. Geol.* (58), 89 – 107.

JABOYEDOFF, M. (2003): CONEFALL 1.0: A program to estimate propagation zones of rockfall based on cone method. Quanterra, (<http://www.quanterra.ch>)

JOHN, K.W. & SPANG, R.M. (1979): Steinschläge und Felsstürze. Voraussetzungen – Mechanismen – Sicherungen.- Vortrag UIC-Tagung, Kandersteg.

MEIBL, G. (1998): Modellierung der Reichweite von Felsstürzen – Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum.- Innsbrucker Geographische Studien (28), 249 S., Innsbruck.

WICHMANN, V. (2006): Modellierung geomorphologische Prozesse in einem alpinen Einzugsgebiet – Abgrenzung und Klassifizierung der Wirkungsräume von Sturzprozessen und Muren mit einem GIS.- Eichstätter Geographische Arbeiten, 15, Profil, München, Wien.

WIECZOREK, F.G., MORRISSEY, M.M., IOVINE, G. & GODT, J. (1999): Rockfall Potential in the Yosemite Valley, California, U.S. Geological Survey Open-File Report 99 – 578.

WINKLER, C., BURCHARD, U. & BRÜNDL, M. (2009): Risikokonzept für Naturgefahren – Leitfaden. Anwendung des Risikokonzepts: Prozess Sturz.- Schweizer Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT.