

COMPUTER SIMULATION OF STONE FALLS AND ROCKFALLS

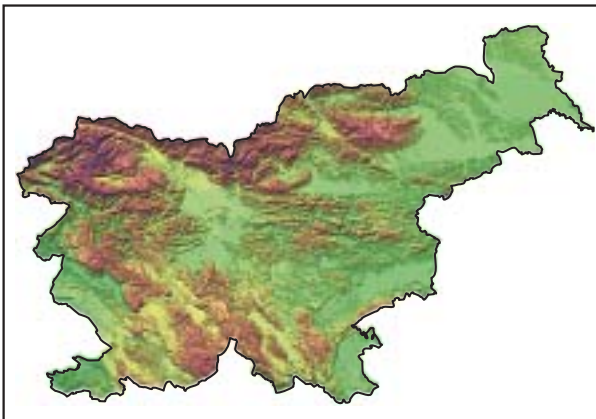
RAČUNALNIŠKO SIMULIRANJE SKALNIH ODLOMOV IN PODOROV

Urška Petje, Mihael Ribičič, Matjaž Mikoš



Part of the Big Rock and the Small Rock, lying at the foot of the Osojnik rockfall in the Trenta valley (photograph: Urška Petje, October 2004).

V vznožju skalnega podora Osojnik v dolini Trente ležita ogromni skali, ki ju domačini imenujejo »Ta veliki kamen« in »Ta mali kamen« (fotografija: Urška Petje, oktober 2004).



Computer simulation of stone falls and rockfalls

UDC: 551.435:004.94

COBISS: 1.02

ABSTRACT: The paper gives an overview of the literature on available computer (simulation) models of stone falls and rockfalls, divided into 2D and 3D models. 2D models consider single blocks in the rockfall mass as lumped mass or a rigid body, and are used to assess the single rockfall runout distance. Opposed to the 2D models, 3D models are composed not only of a dispositional model (depicting rockfall source areas) and friction model (determination of deposition areas and maximum runout distances), but also from a trajectory model (determination of travel areas).

KEY WORDS: geomorphology, denudation, stone falls and rockfalls, risk assessment, preventive activities, mathematical models.

The article was submitted for publication on November 14, 2005.

ADDRESSES:

Urška Petje, M. Sc.

Hidrosvet d. o. o.

Lava 11, SI – 3000 Celje, Slovenia

E-mail: urska.petje@lj.hidrosvet.si

Mihael Ribičič, Ph. D., Lecturer

Department of Geology, Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana

Aškerčeva cesta 8, SI – 1000 Ljubljana, Slovenia

E-mail: mrivicic@ntfgeo.uni-lj.si

Matjaž Mikoš, Ph. D., Associate professor

Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, University of Ljubljana

Jamova cesta 2, SI – 1000 Ljubljana, Slovenia

E-mail: matjaz.mikos@fgg.uni-lj.si

Contents

1	Introduction	95
2	Static (dispositional) models	95
3	Dynamic (process) models	99
4	Trajectory models	99
5	Friction models and modelling of runout distances	101
5.1	Rockfall mass	102
5.2	Slope characteristics	102
5.3	Topographic conditions	102
5.4	Friction models	103
6	Conclusion	106
7	Acknowledgements	106
8	References	106

1 Introduction

Gravitational movement of rock mass on slopes is a frequent phenomenon in the mountainous terrain, and thus also in the Slovenian mountainous and hilly environment (Brilly et al. 1999). In many places in Slovenia, stone falls (falling of single stones and rocks) prevail, for example in rock cut slopes along motorways (Petje et al. 2005a), elsewhere large movements of rock mass occur, having the form of large rock avalanches and rockfalls (Petje 2005). Since these natural processes are sudden processes, their hazard to man and his property is correspondingly higher (Mikoš 1997). In general, due to their velocity they are often unavoidable, whatever their releasing factor might be (earthquake, frost, rainfall).

With sudden and hazardous natural processes, prevention is the much more adequate solution to a problem than remediation (Mikoš et al. 2004). For planning of preventive measures against stone falls and rockfalls, the knowledge of characteristics of their kinematics is essential. On the one hand, from observations of movements of rockfall mass and their consequences (e. g. position of rockfall deposits or broken trees) one can induce empirical equations and estimate rockfall runout distances by simple models (Petje and Mikoš 2005), or, on the other hand, one can determine the empirical coefficients of basic dynamic equations of rockfall movements on slopes (Petje et al. 2005b), which are part of computer models shown in this paper. Such computer models help to establish risk maps on the basis of hazard maps, which are prepared using different methods; for one approach see Zorn and Komac (2004).

Kienholz et al. (1998) divide the models of natural hazards into static models, used for determination of hazard sources, and into dynamic models, used for simulation of dynamics of a hazard process. The static models are also called dispositional models. The dynamic models are also referred to as process models and they describe the process advancement and forecast velocity, energy, pressures and (kinetic) energy transformation while moving and finally determine deposition areas (process runout distances). Process models are thus trajectory models, which determine the possible pathways of process activity, and friction models, which describe velocity and energy transformation of a hazard process along its pathway.

This paper is focused on an overview of available computer models of rockfalls, and their division regarding the scale and special characteristics when used for determining risk areas due to rock slides and rockfalls in line with the Slovenian Water Law (Zakon o vodah 2002).

2 Static (dispositional) models

Dispositional models are based on the delineation of boundaries of possible rockfall source areas, which can be performed at the local scale (single rockfalls) manually by conventional field mapping, or with aerial photography; at the regional scale (rockfalls at a wider scale) less precise automatic delineation by the Geographic Information Systems (GIS) is applied.

Traditionally, the rockfall activity is measured from rock sampling data from rock faces. The sampling is demanding and time-consuming and due to its complexity it hardly gives any information on rockfall activity in larger geographical areas.

When investigating large areas, the method for automatic determination of boundaries of the rockfall source area can replace manual mapping, since cartographic information are easily obtained. Eventhough the quantification is less precise than in field mapping, errors are minimised by the increase of data quantity. The analysis is fast and yields consistent results, eventhough locally differences can arise when compared to field mapping. Field mapping is more precise than automatic mapping, because it contains geological criteria and takes into account the overlapping of several geomorphic processes or impact of smaller relief elements on the process activity.

For dispositional models at the regional scale normally not many detailed data (on lithology, relief, fractures ...) are available, and source areas have to be identified in a less precise way. The possible approaches are as follows:

- determination of a critical gradient reached by a rock slope to be considered potentially hazardous;
- consideration of all rock areas (bare areas in rocks) based on topographic maps;
- consideration of all hazard areas based on expert opinions of geologists or geomorphological maps.

All dispositional models at the regional scale incorporate a Digital Terrain Model (DTM) or a Digital Elevation Model (DEM). The DEM can be made from topographic maps. The appropriate modeling scale at regional scale is 1 : 10,000 to 1 : 25,000. The original data are usually stored in the vector form, and additional single height points can be added.

The transformation from the vector to the matrix format can be done by an intermediate Triangular Irregular Network (TIN) model. The final elevation model is a raster model with constant cell size. To choose the optimal cell size, a visual assessment of different models is performed, trying to find the most accurate DEM, however, with the least scope of interpolation. This type of validation is often used for the comparison of different interpolation methods (Zhu et al. 2001) and for assessment of impact of grid size on DEM (Gao 1998).

Rockfall source areas are determined by the DEM and functions available in commercial computer programs for determination of catchment areas and flow direction. This analysis can be combined further with other cartographic data from the digital elevation model. In this way, GIS reveals many relations between rockfall activities and environmental parameters (variables), it combines distribution of rock slopes with other thematic layers and in this way other variables are obtained, such as lithology, elevation above sea level, gradients, and orientation of rock slopes (faces), where rockfall processes appear.

To identify the rockfall source areas, one needs to map the deposition areas of rockfall debris. Topographic criteria and deposition areas are combined with maps of slope gradients. This method is based on an algorithm available in many commercial computer programs, which are originally used for analysis of water flow on the topographic surface. The results obtained by combining maps of rockfall source areas, geology and DEM shows the dependance between the distribution of rockfall debris and lithology, elevation and slope gradient, and a strong correlation between fracture type and its density. The impact of the elevation of the rockfall scar is connected to climatic conditions changing with elevation.

In order to delineate the areas of stone fall or rockfall, the area along the mountainous road in the vicinity of Sion, Switzerland (Baillifard et al. 2003) was assessed according to the presence or absence of five criteria:

- nearness of a fault (impact up to a distance of 300 m);
- scree slope within a distance (indicating activities in hinterland);
- rocky cliff (unstable rock slopes are usually within a short distance of rocky cliffs);
- steep slope (instabilities occur with slopes larger than 45°);
- road (influence to the maximum height of road cut, in this case up to 50 m).

These criteria were integrated into a Geographic Information System. Each parameter was formatted into the raster format. The sum of all five parameters gave the values of relative hazard, yielding a rating from 0 to 5. The matter of discussion is whether these 5 parameters were chosen correctly. The parameters of »rocky cliff« and »steep slope« would probably be sufficient. In areas yielding a high ranking according to these criteria, instabilities would occur more likely than in areas with lower ranking. The identification of an event leading into a potential instability is performed by field investigation, however, it can be also performed automatically.

The presence of rockfall deposits without vegetation is a widely used indicator of rock slope instability (Menéndez Duarte and Marquínez 2002), when other factors for vegetation growth on the talus scree are favourable (climatic-elevation factors, lithology, and clast size). Map of rockfall area source is obtained

by combining deposit's drainage basin with the rock slopes map. The rockfall area source map is made automatically from the DEM using the tools included in the GIS for determination of rockfall source and flow. This is carried out in ArcInfo, using the Flow Directions and Watershed functions. The function of Flow Direction uses an algorithm based on the direction of the steepest descent from the central pixel of the rockfall. The resulting matrix is part of the input data for the Watershed function, which, combined with the data from the map of scree sediments, determines the rockfall basin above a set of cells in the DEM grid. The map of scree sediments, once converted in the matrix format, provides the input data for the definition of the rockfall basin. The result of these two functions is a matrix model in which the rockfall basin is associated with each of the scree sediment that was mapped. The model is combined with the map of rocky slopes. The lithology of rocky slopes and lithology of scree are used to help the computer to carry out the allocation of rockfalls. The result is a new map in which the rocky slopes are put into one of two categories, i. e. active and non-active rockfall. The assignment is completed based on the absence of vegetation on screes.

The potential source area of rockfall is determined on the mean slope gradient map and the geological map. Areas, such as morainic and scree slopes, lakes, rivers, glaciers, and floodplains, are disqualified as potential rockfall source areas. Those areas or cells with the mean slope gradient (40° , Dorren and Seijmonsbergen 2003) and which are classified as bedrock according to the geological map, are considered as potential rockfall source areas. For identification of rockfall source areas in the Yosemite Valley, USA, different combinations of slope gradient and thematic maps were used, and the best results were obtained with a gradient slope larger than 60° (Guzzetti et al. 2003). For the making of the geomorphological map in the Montafon region, Austria, Dorren et al. (2004) measured the slope gradient and angle

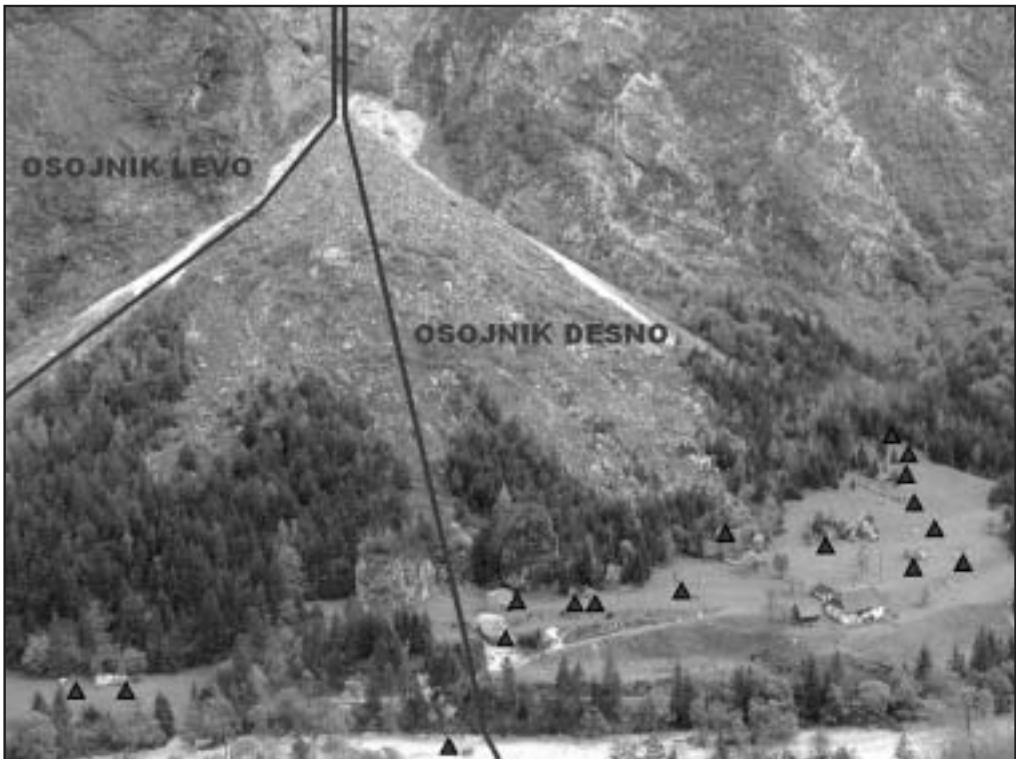


Figure 1: The Osojnik rockfall in the Trenta valley with two longitudinal profiles; in such profiles two-dimensional friction models are applied for rockfall runoff distance estimation. Silent witnesses, labelled with triangles, are also given, which are used for model validation (photograph: Urška Petje, 2004).

Table 1: Characteristics of two-dimensional models of rockfalls, used at the local scale (Meißl 1998, 81).

Model	Within limits randomly changeable variables	Modelled travel modes
Spang 1987, Spang and Soenser 1995	Initial conditions & surface features	Free fall, bouncing, rolling, sliding
Bozzolo et al. 1988	Initial conditions	Free fall, bouncing, rolling, sliding
Evans and Hungr 1988, 1993	Attenuation during collision	Bouncing, rolling
Barrett et al. 1989	Slope gradient during each impact (dependent on the surface features and size of the falling block)	Bouncing*
Zinggeler et al. 1991	Centricity of collision with trees (from brushing to full collision) and tree diameter of trees under impact	Bouncing, rolling

* rolling is a sequence of short bounces

Table 2: An overview of two-dimensional computer rockfall models, used at the regional scale.

Model	Dispositional model	Trajectory model	Friction model
Toppe 1987	Gradient $\geq 30^\circ$	User defined	Geometric angle $\geq 30^\circ$
Grunder 1984, Grunder and Kienholz 1986	Rock areas and rock ridges with gradients $\geq 30^\circ$	Lateral-spread method & DEM*	Runout determined in dependence on gradient, morphology and vegetation
van Dijke and van Westen 1990	Slope gradient $\geq 60^\circ$ (flysch) and areas from geomorphological maps	D-8 method & DEM	Energy conditions Block velocity
Mani and Kläy 1992	Rock areas from maps in scale 1 : 5,000	Vectorial method & TIN	Geometric angle $\geq 32^\circ$
Krummenacher 1995	Rockfall areas from maps in scale 1 : 25,000	Multiple-flow-direction method & DEM	Geometric angle $\geq 30^\circ$ – 38°
Meißl 1998		D-8 and D-16 methods & DEM	Geometric angle $\geq 31^\circ$, shadow angle Block velocity

* method does not give empirical values for its application and is not further treated in this paper

+ DEM = digital elevation model

of layers and cracks; Markland's test was performed. Engineering geologists use the Markland test to determine the kinematic possibility of plane or wedge failure on a rock slope. It was established that the rockfall source area gradient was between 50° and 90°.

3 Dynamic (process) models

First computer (simulation) stone fall and rockfall models were developed at the end of the 1970's. All models of this generation compute coordinates of falling blocks from input data (shape and size of rock block, slope roughness, slope profile). The majority of models also compute block velocity and maximum heights of trajectories (the envelope), which can be used for the design of countermeasures (e. g. wire nets).

The models consider a rockfall block as a lumped mass or a rigid body (Table 1). All models are two-dimensional and are pure friction models, used for determination of the rockfall runout distance. Prior to rockfall simulations by such models, we must define slope profiles, along which falling blocks travel, as a sequence of sections with different gradient (Figure 1). In these 2D models, the selected longitudinal slope profiles are also modelled trajectories of falling blocks that may be different from real trajectories.

Trajectory models considering the actual falltracks of rock blocks were first developed at the end of the 20th century. The reason for that was in the lack of precise digital information on the relief. In the last several years more and more precise digital elevation models have been made available, which has enabled the usage of 3D rockfall models at the regional scale. 3D models typically consist of three elements: dispositional model, trajectory model, and friction model (Table 2).

4 Trajectory models

The role of a trajectory model is the determination of possible pathways of falling rock blocks. The trajectory in the model is determined stepwise in the chosen computing grid. In the first step, the source cell of the block is determined, and in the second step the cells are determined, into which this block may move. For the trajectory determination a sequence of corresponding cells in the computing grid must be found. The often used methods for determination of direction of falling rock blocks are as follows:

- D-8 method;
- Rho8 method and random walk method;
- vectorial method;
- multiple-flow-direction method;
- D-16 method.

The D-8 method was applied for example by van Dijke and van Westen (1990). This method is a basis for the function »Flowdirection« in ArcInfo (ESRI 2002). The module for computing a trajectory is composed of a grid analysis of neighbouring cells in the window of 3 × 3 cells, and thus simulates 8 possible and different falling directions. For falltrack determination one needs to determine the gradient in all neighbouring cells (there are 8 such directions). The falltrack is in the direction of the maximum gradient. The gradient in cell A can be computed for all 8 neighbouring cells as follows:

$$f = \frac{h_A - h}{d}, \quad (1)$$

where h_A is the elevation in cell A, h is the elevation in the neighbouring cell, and d is the distance between the centres of both cells.

By the D-8 method, the number of falling directions is limited to 8, making an angle of 45°, and it can come to large deviations from the real falling block direction. Therefore, the Rho8 method was introduced (Fairfield and Leymarie 1991). For the four cardinal directions the gradient can be computed as follows:

$$f_{rho} = h_A - h \quad (2)$$

for diagonal directions the factor rho8 is also taken into account:

$$f_{rho} = rho8 \cdot (h_A - h). \tag{3}$$

Factor rho8 is within the interval (0.5–1), and its density distribution function can be approximately expressed by a random number r that is equally distributed in the interval (0–1):

$$rho8 = \frac{1}{2-r}. \tag{4}$$

Similar to it is the random walk method, where the gradient is computed using the D-8 method. Each neighbouring cell gets a random possibility, to be selected as the next cell on the trajectory.

Using any of both described methods the computed trajectory comes nearer to the actual falltrack, but in practice problems still arise: on slopes, where falltracks should be parallel, it comes to a situation where they come together.

The most accurate results are obtained by a combination of raster and vector data. First, from the neighbouring central points the height of points in the corners of the cell is interpolated. Then by using the least square method the approximate surface is calculated out of four points. If the SW point of the cell is chosen as the centre of the co-ordinate system, the plane equation can be expressed as:

$$z = Ax + By. \tag{5}$$

The exposition of the plane corresponds to the fall direction which can be expressed by vector $(-A, -B)$. If the vector is placed into the central point of the initial cell, the angle functions help us to determine the exit point of the vector of the fall. At the same time, the point represents the entering point for the neighbouring cell. A similar algorithm was introduced by Hegg and Kienholz (1995) for the Triangular Irregular Network.

The methods have in common that the pathway trajectory is directed in only one way from the previous cell into the next cell. In hydrology, when determining the surface runoff direction, a method was developed, which enables the delineation of flow in cells in all directions with a smaller height; the method may be termed as the multiple-flow-direction method. Out of each cell, the water flows into the neighbouring cells underneath, and the share of water is in direct proportion with the difference in height between pairs of cells:

$$w_i = w_A \cdot \frac{\Delta h_i}{h} \tag{6}$$

$$\Delta h_i = h_A - h_i \text{ for } h_A > h_i \tag{7}$$

$$\Delta h_i = 0 \text{ for } h_A \leq h_i \tag{8}$$

$$h = \sum \Delta h_i \text{ for } 1 \leq i \leq 4, h > 0 \tag{9}$$

where w_A is the water contents in a cell that contributes water, w_i is the water contents in a cell that receives water, h_A is the height of a cell that contributes water and h_i is the height of a cell receiving the water. As other models, this model has certain disadvantages, which are addressed by the authors in several ways, for example by introducing the minimum height difference of the next cell for the flow to enter the cell.

1	2	3	4	5
16				6
14		S		7
15				8
13	12	11	10	9

Table 3: Gradient computation with the D-16 method in cell »S« in the middle of the window with size 5×5 cells (Meißl 1998, 95).

In order to reduce the errors that occur in using the D-8 method, Meißl (1998) proposed the D-16 method. So instead of 8 nearest cells (surroundings of 3×3) the gradients are calculated for 16 »nearest cells« to cell S by a window size of 5×5 cells (Table 3). The gradient is calculated similarly to the D-8 method:

$$f = \frac{h_A - h}{d}, \quad (1)$$

where h_A is the height above the sea level in cell S, h is height above the sea level in the next cell, and d is the distance between the centres of both cells: $d = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \text{grid width}$ for cells 1, 5, 9, 13; $d = \sqrt{5} \cdot \text{grid width}$ for cells 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, and $d = 2 \cdot \text{grid width}$ for cells 3, 7, 11, 15.

The advantage of the D-16 method is obvious; there are 16 directions instead of 8, and thus the computed trajectory is approximated to the actual falltrack. However, the method has a systematic weakness in skipping the surrounding area of cell S of window 3×3 , thus we may ask ourselves whether these cells have higher height above the sea level than cell S. The improvement proposed by the D-16 method in relation to the D-8 method can be introduced by a more accurate DEM used as the basis.

5 Friction models and modelling of runout distances

In developing computer programs for the calculation of the runout zones it is essential to understand and choose the following:

- appropriate parameters to describe the rockfall runout area;
- factors influencing the runout.

The parameter to describe the rockfall runout zones can be an angle (geometric angle, angle of reach (syn. travel angle), mean gradient, and shadow angle) or the horizontal distance (projection = absolute runout) (Figure 2). The absolute runout area is usually expressed by the vertical and horizontal distance, the latter being defined differently by different authors. According to Heim (1932) the vertical and horizontal projections are in a certain relationship and form an angle that describes the relative distance. The angle is not a constant, and changes in an interval for similar types of movement. In practice, the relative runout of a rockfall is of high significance in allowing us to make rough, but simple, estimates about the hazard zones based on the angle.

In the continuation, first the factors influencing the runout zone are described: characteristics of the rockfall mass, slope and topographic conditions. This is followed by an overview of friction models.

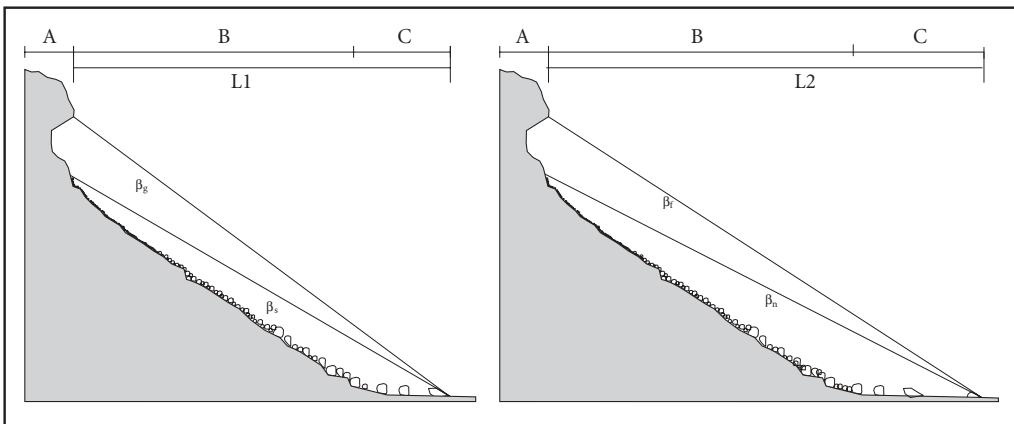


Figure 2: Geometric angle (β_g), shadow angle (β_s), travel angle (β_t) and average gradient (β_n). »A« is source area, »B« is falltrack area, and »C« is runout area. L1 is the shortest distance between the start and end of movement, L2 represents the length of the horizontal projection of the trajectory.

5.1 Rockfall mass

The runout distance of rockfalls is dependent upon their volume as well as shape and size of falling blocks and the material that they consist of. The shape and size of the block influence the length and height of the trajectory (in the parabolic form), velocity of rolling and time of the change from bouncing to rolling (Petje et al. 2005b). Larger blocks often move farther than smaller ones. Upon impact, smaller blocks and rocks bounce into another direction and their runout reach is smaller (Abele 1994). Field work has shown that by larger size of blocks the travel angle, and other angles increase. It may thus happen that larger blocks stop sooner. The reasons for this are the following:

- larger blocks sink deeper into the ground;
- the interaction between blocks is often not negligible and the blocks may stop sooner because of it;
- larger blocks can disintegrate into smaller, but still considerable, blocks, whereby a lot of kinetic energy is released and the movement ends.

Additionally, shape is also an important aspect influencing the runout of the movement. Blocks of round shapes achieve larger distances in rolling.

There is a negative correlation between the volume of major rockfalls (bergsturz) and the travel angle. With the same fall height the runout distance increases with volume (Moser 1986). However, this is the case only with major rockfalls.

5.2 Slope characteristics

The runout is influenced by the type of rock and roughness of slope, which provide the conditions whether during an impact there would be changes of kinetic energy into plastic deformations or into fragmental rockfall mass. For example, the dolomite may disintegrate into fine debris, while conglomerate stays in blocks of several m³. However, there are no available data about the relationships between geological characteristics and length of runout area. Roughness, plasticity and potential obstacles are the most important slope features. Slope roughness and plasticity influence the loss of energy during impacts and the size of the friction coefficient during sliding and rolling. The smaller the undulation of the slope compared to the size of the block, the larger is the runout. The slope roughness does not depend only on vegetation and scree, but also on small relief changes, which range from several decimetres to several metres. The influence of smaller relief changes is larger with smaller blocks. Slope roughness is determined by field investigation, since the DEM is not precise enough for such a task.

On impacts with obstacles, such as trees, houses or protective works, there are large losses of kinetic energy and the velocity reduces considerably. The size of the block has an important role. For smaller boulders even the shrubs represent a big obstacle, but with large blocks even the forest might not represent an obstacle big enough. It should be noted that the rockfall runout zone can be much farther in a forest, which was previously damaged by a rockfall.

5.3 Topographic conditions

The most significant topographic factors influencing the runout are: total height difference of the rockfall, the freefall height of the rockfall, slope gradient, slope concavity – convexity.

The height of the slope, where the trajectory is located, is determined with the gradient of the slope, on which the block travels and finally stops. The slope apex determines the highest potential energy of the block. There is no linear correlation between the fall height and shadow angle and/or other angles.

After Evans and Hungr (1993) there is a correlation between the freefall height and travel angle, while there is supposedly no correlation between the shadow angle and the freefall angle. Field investigations

should show (Meißl 1998) that there is also a correlation with the shadow angle. The same is true with the horizontal distance.

Slope inclination has a direct influence on shear force (friction) and the normal force and is therefore the most important factor in determination of velocity and runout distance. The higher the inclination of a slope, the lower are the energy losses during impacts with the ground. The trajectory length and deposition path are decisive for the point of deposition.

In terms of slope curvature, two different protrusions can be distinguished: vertical and horizontal. The slope concavity and convexity influence the velocity and energy losses. With larger slope concavity the runout distance is substantially larger.

5.4 Friction models

Trajectory models enable the computation of rockfall trajectories. In doing this, a condition must be added under which, when fulfilled, the travel process stops; this condition is incorporated into the friction model. In friction models used at the regional scale (Table 2):

- most often the geometric angle is taken for determining the boundaries of rockfall areas;
- dynamic (energy) equations may be taken to compute the velocity of the falling block – until the velocity equals zero, which is most often used in two-dimensional models (Table 1).

Heim (1932) found out that large rock slides and rockfalls travel much more economically than the smaller ones. Heim defined the geometric angle and the travel angle as the characteristic quantities for determination of the runout distance. The travel angle is the angle between the horizontal plane and the line that connects the highest point of the scar in the rockfall source area and the most distant point at which the falling rocks stopped. It is essential that this line follows the true trajectory. The line is therefore not the shortest distance, but it takes into account the horizontal projection of the trajectory.

The geometric angle can be easily determined, but it is strongly dependent on slope irregularities and concavity, thus the travel angle is frequently used instead. The travel angle (angle of reach) is always flatter than the geometric angle (Figure 3).

The travel angle can be determined in the field, even when the majority of fall debris was eroded. The fall debris that stopped on the slope or in the valley bottom is often transported by torrents and rivers. The influence of rockfalls triggered by earthquakes in the Soča River valley in 1998 and 2004 on sediment and water regime of the Soča River was investigated by Mikoš et al. (2005). Nevertheless, it can be presumed

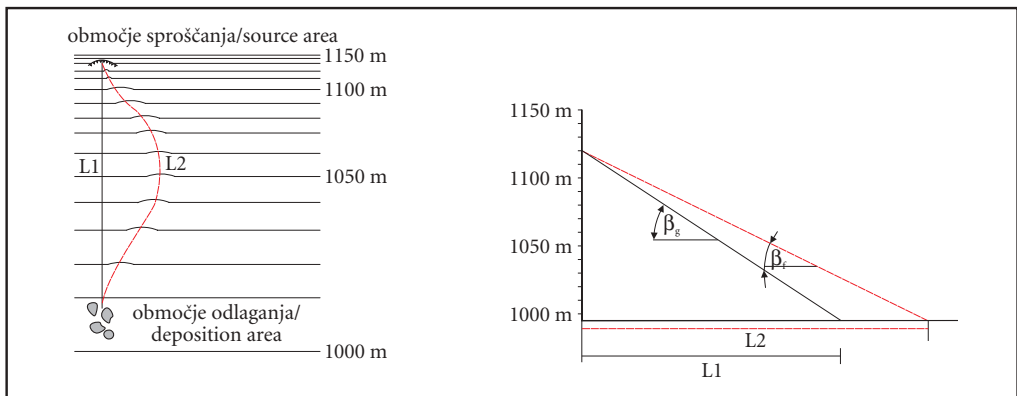


Figure 3: Comparison between geometric angle β_g and travel angle β_t .

that the scar as well as the fall debris deposited farthest from the source (usually the largest components) are still visible even after longer periods. Additionally, the average slope gradient does not differ much from the energy line, being one of the most important rockfall parameters. However, the travel angle is useful not only with the analysis of historic rockfall events but also when forecasting future events.

Heim (1932) also discussed the gravity angle defined as the geometric angle of the rockfall gravity centre. Because the gravity centre of rockfall mass is rarely known, this angle is rarely used. The gravity angle differs little from the travel angle, because the gravity centres of both masses are usually far apart. Experiments show that the travel angle is always smaller than the gravity angle. Another expression used is the lump angle (Pauschalgefälle), which is defined as tangent of the gravity angle. Often the travel angle is used instead of the gravity angle.

For the physical explanation of the travel angle it is usually assumed that tangent of the gravity angle or tangent of the travel angle equals the friction coefficient. With the known friction coefficient one can determine the runout distance. Or the other way around, one can get the friction coefficient from a known travel angle (Tables 4 and 5) or gravity angle. Nevertheless, such a derivation is problematic. Namely, the friction coefficient does not depend only on the properties of the falling mass (volume, form, material properties) and of slope.

Table 4: Values of travel angle β_t after different authors.

Author	Travel angle β_t
Hsü 1975	31°
Moser 1986	33°–42°
Grunder 1984	32.6°–33.4°
Onofri and Candian 1979	28.34°–40.73°
Domaas 1985	32°
Gerber 1994	33°–37°

Table 5: Travel angle β_t at different sizes of falling blocks and slope ground properties (vegetation, irregularities, soil composition) (Gerber 1994; Meißl 1998, 56).

Size of falling blocks	Travel angle β_t and slope roughness		
	$\beta_t = 33^\circ$ – small	$\beta_t = 35^\circ$ – medium	$\beta_t = 37^\circ$ – large
stones	meadow no irregularities shallow soils	bush small irregularities deep soils	trees large irregularities talus scree
Small to medium size blocks	bush small irregularities shallow soils	trees large irregularities deep soils	
Large blocks	trees large irregularities deep soils		

The way of travel is also of importance. With freefall one must consider only the air resistance, and with sliding and rolling different friction coefficients are important (sliding friction coefficient, rolling friction coefficient). Thus tangent of the gravity angle depends on the duration of each travel phase (Petje et al. 2005b).

Hsü (1975) introduced the excessive travel distance (ETD) to replace the travel angle. This parameter is defined as a difference between the total horizontal distance of a certain event and the distance of a virtual event at angle $\beta_f = 32^\circ$ with the same height of fall (Figure 4). However, the excessive travel distance yields no new information, which could not be part of the travel angle since one may define: $ETD = L(1 - \tan 32^\circ)$.

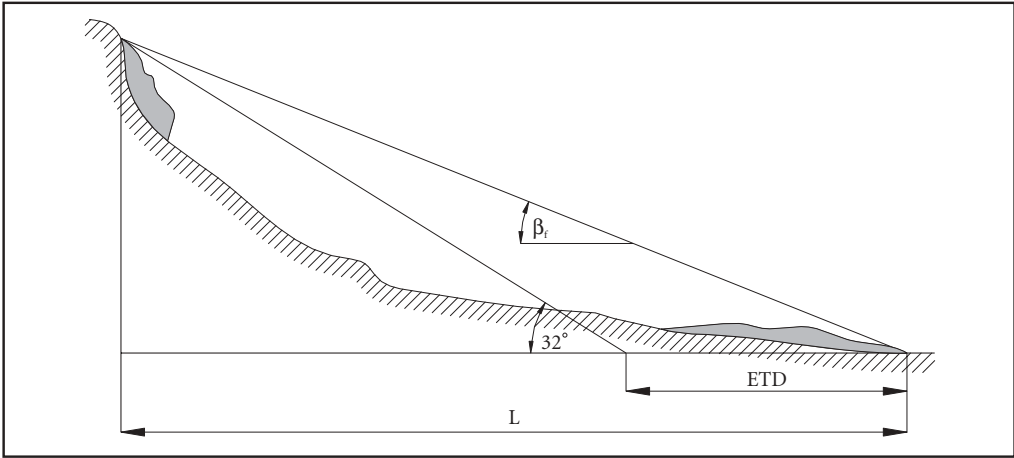


Figure 4: Definition of the excessive travel distance (ETD) after Hsü (1975).

When determining the travel angle two problems arise (Evans and Hungr 1993):

- The travel angle value is dependent on the elevation difference. A large part of kinetic energy stored in a free falling block is lost at the first collision. Despite the height of freefall each fragment continues to roll downslope.
- The precise positions of the rockfall source and the deposition area are not always known.

Evans and Hungr (1988) thus introduced the minimum shadow angle, which is based on Lied (1977), and defined by the apex of the slope and not by the rockfall source area above the slope. This is an angle between the horizontal line and the line connecting the highest point of talus and the point where the rocks stop. This approach does not require the knowledge of the precise location of each rockfall release, because the rockfall activity is integrated in time by taking into account the largest distance travelled by blocks. The minimum shadow angle is the smallest shadow angle of an area. Minimum values were given by several authors and are between 22° and 30°. Lied (1977) proposed the shadow angle between 28° and 30°, some authors also a value of 25°. Evans and Hungr (1993) performed a research in British Columbia and came to a conclusion that the shadow angle is at least 27.5°, regardless of rock face height, trajectory length and slope gradient. Where talus slope is rather smooth, authors suggest lower values (23°–24°).

Meißl (1998) investigated 21 areas in the western Bavarian Alps, and, based on maps in a scale of 1 : 10,000 and field investigations, established that the geometric angle and travel angle differ from each other by less than 1°. The average value of both angles is about 38° (minimum travel angle is 29°, and maximum 47.5°; minimum geometric angle is 29.5°, and maximum 48.5°). Meißl determined the shadow angle from 26 rockfall areas, and found out that the minimum value of the shadow angle was 26°. The mean angle of the falltrack was about 25°. The shadow angle and the mean angle differ from each other by a maximum of 1° at low slope gradients in the same way as the geometric angle and the travel angle. The higher the shadow angle the higher the values of the travel angle.

Both, the travel angle and the minimum shadow angle may be used only for the first assessment of the rockfall runout distance.

With the minimum shadow angle, similar problems arise as with the geometric angle, therefore another angle was introduced in the same way as the travel angle, namely the average gradient. The mean gradient thus connects the highest point of the slope (point where a block hits the slope) and the point where the block stops; in doing so, the real travel distance is taken into account and not the shortest distance as with the geometric or shadow angles.

For the Yosemite Valley, California, USA, two hazard maps for stone falls and rockfalls were prepared using the shadow angle and computer program STONE (Guzzetti et al. 2003). For the shadow angle the value of 22° was chosen (maximum runout distance where debris flows are possible (Evans and Hungr 1993)). A comparison of both maps shows a good agreement, though the runout distances, determined by the program STONE, were mainly underestimated as compared to the shadow angle. However, in some places the runout distance as determined by the STONE program is larger than the one determined by the shadow angle, which may present a hazardous situation.

6 Conclusion

An ever-larger human presence in the mountain environment increases the risk potential, where different hazard natural processes (among them rockfalls) for man and his property interlink.

In the modern information society, man has started to behave more and more rationally and thus reacted in a preventive way rather than by remediation. Knowledge of hazard areas due to rockfall activity is the basis of preventive activities (Mikoš et al. 2004), which include the retreat of human presence from hazard areas, or design of technical (structural) measures.

For such an approach the knowledge of rock mass dynamics is of paramount importance. The development of computer techniques makes possible the preparation of bases for usage of modern computer models that make accurate estimates of rockfall runout distances at the regional scale.

The models, discussed in this paper, can be successfully applied for preparation of rockfall hazard maps only after the completion of pilot projects, which will determine the most important parameters for Slovenia. We propose the completion of pilot projects in different geological conditions: flysch, limestone, dolomite, igneous rocks.

Of similar importance for Slovenia is also the making of geomorphological maps that will provide an upgrade of the geological map, and should be prepared in a scale of 1 : 50,000.

7 Acknowledgements

The methods discussed in the paper were compiled within the framework of a Targeted Research Programme »Methodology for determination of risk areas and the way of classification of land into risk classes due to landslides and rockfalls«, funded by the following ministries: Ministry of Education, Science and Sports, Ministry of the Environment, Physical Planning and Energy and Ministry of Defense.

8 References

- Abele, G. 1994: Felsgleitungen im Hochgebirge und ihr Gefahrenpotential. *Geographische Rundschau* 46, 7–8. Braunschweig.
- Baillifard, F., Jaboyedoff, M., Sartori, M. 2003: Rockfall hazard mapping along a mountainous road in Switzerland using a GIS-based parameter rating approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3. Katlenburg-Lindau.
- Bozzolo, D., Pamini, R., Hutter, K. 1988: Rockfall analysis – a mathematical model and its test with field data. *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides in Lausanne, Balkema*. Rotterdam.
- Brilly, M., Mikoš, M., Šraj, M. 1999: Vodne ujme. *Varstvo pred poplavami, erozijo in plazovi*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Ljubljana.
- Corominas, J. 1996: The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal* 33. Ottawa.
- Domaas, P. 1985: *Rekkevidden av steinsprang*. Elaborat, Norges Geotekniske Institutt. Oslo.

- 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. Amsterdam.
- Dorren, L. K. A., Berger, F., Imeson, A. C., Maier, B., Rey, F. 2004: Integrity, stability and management of protection forests in the European Alps. *Forest Ecology and Management* 195. Amsterdam.
- ESRI 2002: Introduction to ArcGIS I, II. ESRI educational services. Redlands.
- Evans, S. G., Hungr, O. 1988: Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. *Landslides, Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides in Lausanne* 1. Balkema. Rotterdam.
- Evans, S. G., Hungr, O. 1993: The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal* 30. Ottawa.
- Fairfield, J., Leymarie, P. 1991: Drainage networks from grid digital elevation models. *Water resources research* 27–5. Washington.
- Gao, J. 1998: Impact of sampling intervals on the reliability of topographic variables mapped from grid DEMs at a micro-scale. *International Journal Geographical Information Science* 12. London.
- Gerber, W. 1994: Beurteilung des Prozesses Steinschlag. V: Ganzheitliche Gefahrenbeurteilung. Unveröffentlichte Kursunterlagen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Forstliche Arbeitsgruppe für Naturgefahren (FAN), 20.–22. 10. 1994. Poschiavo.
- Grunder, M. 1984: Ein Beitrag zur Beurteilung von Naturgefahren im Hinblick auf die Erstellung von mittelmasstäbigen Gefahrenhinweiskarten – mit Beispielen aus dem Berner Oberland und der Landschaft Davos. *Geographica Bernensia* 23. Bern.
- Grunder, M., Kienholz, H. 1986: Gefahrenkartierung. *WSL Berichte* 289. Birmensdorf.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Wieczorek, G. F. 2003: Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3. Katlenburg-Lindau.
- Hegg, C., Kienholz, H. 1995: Determining paths of gravity-driven slope processes; the »vector tree model«. *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- Heim, A. 1932: *Bergsturz und Menschenleben*. Fretz & Wasmuth A. G. Zürich.
- Hsü, K. 1975: Catastrophic debris streams (Sturzstroms) generated by rockfalls. *Geological Society of America Bulletin* 86. Boulder.
- Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Marro, Ch., Philippossian, F., Rouiller, J.-D. 1999: Detection of rock instabilities: MATTEROCK methodology. *Medmrežje*: http://www.quanterra.org/Matterock_methodology.pdf (20. 11. 2005).
- Kienholz, H., Zeilstra, P., Hollenstein, K. 1998: Begriffsdefinitionen zu den Themen: Geomorphologie, Naturgefahren, Forstwesen, Sicherheit, Risiko – Arbeitspapier. *Elaborat, BUWAL*. Bern.
- Lied, K. 1977: Rockfall problems in Norway. *Publication Nr. 90. Istituto Sperimentale Modelli e Strutture (ISMES)*. Bergamo.
- Meißl, G. 1998: Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum. *Innsbrucker Geographische Studien* 28. Innsbruck.
- Menéndez Duarte, R., Marquinez, J. 2002: The influence of environmental and lithologic factors on rockfall at a regional scale: an evaluation using GIS. *Geomorphology* 43. Amsterdam.
- Mikoš, M. 1997: Ocena ogroženosti alpskega sveta z naravnimi ujmami. *Gradbeni vestnik* 46, 1-2-3. Ljubljana.
- Mikoš, M., Batistič, P., Đurovič, B., Humar, N., Janža, M., Komac, M., Petje, U., Ribičič, M., Vilfan, M. 2004: Metodologija za določanje ogroženih območij in način razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti zaradi zemeljskih plazov: končno poročilo. *Elaborat, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani*. Ljubljana. *Medmrežje1*: http://www.sos112.si/slo/tdocs/met_zemeljski_1.pdf (10. 11. 2005). *Medmrežje2*: http://www.sos112.si/slo/tdocs/met_zemeljski_2.pdf (10. 11. 2005).
- Mikoš, M., Fazarinc, R., Ribičič, M. 2005: Sediment production and delivery from recent large landslides and earthquake-induced rock falls in the Upper Soča River valley, Slovenia. *Engineering Geology*. Amsterdam. In press.
- Moser, M. 1986: Unveröffentlichtes Skriptum zur Ingenieurgeologie II. Böschungen, Hangbewegungen. *Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Univ. Erlangen – Nürnberg*.
- Onofri, R., Candian, C. 1979: Indagine sui limiti di massima invasione dei blocchi rocciosi franati durante il sisma del Friuli del 1976. *Considerazioni sulle opere di difesa*. Regione Autonoma Friuli – Venezia Giulia, Cluet. Trieste.

- Petje, U. 2005: Analiza nevarnosti padajočega kamenja na cestah v alpskem prostoru. Magistrsko delo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani. Ljubljana.
- Petje, U., Mikoš, M. 2005: Modeliranje skalnih podorov in odlomov kamenja. Acta hydrotechnica. Ljubljana. In press.
- Petje U., Mikoš, M., Ribičič, M. 2005a: Ocena nevarnosti padajočega kamenja za odsek regionalne ceste v dolini Trente, Slovenija. Geologija. Ljubljana. In press.
- Petje, U., Ribičič, M., Majes, B., Mikoš, M. 2005b: Načini premikanja skalnih gmot po pobočjih. Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering. Ljubljana. In press.
- Spang, R. M. 1987: Protection against rockfall – Stepchild in the design of rock slopes. Proceedings of the 6th International Congress on Rock Mechanics 1. Montreal.
- Spang, R. M., Soenser, T. 1995: Optimized rockfall protection by »ROCKFALL«. Proceedings of the 8th International Congress on Rock Mechanics 3. Tokyo.
- Toppe, R. 1987: Terrain models – A tool for natural hazard mapping. IAHS Publication 162.
- van Dijke, J. J., van Westen, C. J. 1990: Rockfall hazard: a geomorphological application of neighbourhood analysis with ILWIS. ITC Journal 1990–1.
- Zakon o vodah. Uradni list RS 67. 2002. Ljubljana.
- Zhu, H., Eastman, J. R., Toledano, J. 2001: Triangular irregular network optimization from contour data using bridge and tunnel edge removal. International Journal Geographical Information Science 15. London.
- Zinggeler, A., Krummenacher, B., Kienholz, H. 1991: Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern. Berichte und Forschungen 3. Geographisches Institut der Universität Freiburg. Freiburg.
- Zorn, M., Komac, B. 2004: Deterministic modeling of landslide and rockfall risk. Acta geographica Slovenica 42-2. Ljubljana.

Računalniško simuliranje skalnih odlomov in podorov

UDK: 551.435:004.94

COBISS: 1.02

IZVLEČEK: V prispevku je prikazan pregled v svetu razpoložljivih računalniških (simulacijskih) modelov gibanja skalnih odlomov in podorov, razdeljenih v dvodimenzijske in tridimenzijske modele. Dvodimenzijski modeli upoštevajo posamezni blok v podorni masi kot masno točko ali togo telo in so namenjeni oceni dosega posameznega podora. Tridimenzijski modeli so za razliko od dvodimenzijskih modelov sestavljeni ne le iz dispozijskega modela (določitev območja sproščanja) in trenjskega modela (določitev območja odlaganja in ocena maksimalnega dosega), temveč tudi iz modela poti (določitev dejanskega območja gibanja).

KLJUČNE BESEDE: geomorfologija, erozija, denudacija, skalni odlomi, skalni podori, ocena tveganja, preventivno delovanje, matematični modeli.

Uredništvo je prejelo prispevek 14. novembra 2005.

NASLOVI:

Urška Petje, mag.

Hidrosvet d. o. o.

Lava 11, SI – 3000 Celje, Slovenija

E-pošta: urska.petje@lj.hidrosvet.si

Mihael Ribičič, dr., docent

Oddelek za geologijo Naravoslovnotehniške fakultete Univerze v Ljubljani

Aškerčeva cesta 8, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: mrubicic@ntfgeo.uni-lj.si

Matjaž Mikoš, dr., izredni profesor

Oddelek za gradbeništvo Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani

Jamova cesta 2, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: matjaz.mikos@fgg.uni-lj.si

Vsebina

1	Uvod	111
2	Statični (dispozijski) modeli	111
3	Dinamični (procesni) modeli	113
4	Modeli poti (trajektorij)	113
5	Trenjski modeli in modeliranje dosega podora	116
5.1	Podorna masa	117
5.2	Lastnosti pobočja	117
5.3	Topografske razmere	117
5.4	Trenjski modeli	118
6	Sklep	120
7	Zahvala	120
8	Literatura	120

1 Uvod

Gibanje kamninskih gmot po pobočjih pod vplivom težnosti je pogost pojav v gorskem svetu, tako tudi v slovenskem gorskem in hribovitem svetu (Brilly in sodelavci 1999). Mnogokje prevladujejo odlomi kamenja (padanje posameznih kamnov in skal), kakor na primer v skalnih usekih ob prometnicah (Petje in sodelavci 2005a), drugje pa pride lahko do obsežnejših premikov kamninskih gmot v obliki različno velikih kamnitih plazov in skalnih podorov (Petje 2005). Ker gre v tem primeru za nenadne naravne procese, je njihova nevarnost za človeka in njegovo imetje toliko večja (Mikoš 1997). Praktično se jim je zaradi hitrosti njihovega premikanja nemogoče umakniti, kakršenkoli je že njihov sprožilni dejavnik (potres, zmrzal, padavine).

Za nenadne in nevarne naravne procese je toliko bolj pomembno, da se na njih pripravimo, in v tem smislu je preventiva mnogo bolj ustrezna rešitev kakor kurativa (Mikoš in sodelavci 2004). Za načrtovanje preventivnih ukrepov varstva pred skalnimi odlomi in podori je nujno poznavanje zakonitosti njihovega gibanja. Na eni strani lahko iz opazovanja gibanja skalnih gmot in njihovih posledic (npr. položaja odkladnin ali polomljenega drevja) razvijemo empirične enačbe in z enostavnimi modeli napovemo doseg skalnega podora (Petje in Mikoš 2005) ali pa iz njih določimo empirične koeficiente osnovnih enačb gibanja skalnih gmot po pobočjih (Petje in sodelavci 2005b), ki jih vsebujejo v tem prispevku prikazani računalniški modeli. Taki računalniški modeli pomagajo pripraviti karte tveganja na osnovi kart nevarnosti, ki smo jih pripravili ob uporabi različnih metod; možen pristop prikažeta Zorn in Komac (2004).

Kienholz s sodelavci (1998) deli modele, ki opisujejo naravne nevarnosti, v statične modele, namenjene določanju izvorov nevarnosti, in v dinamične modele, ki so namenjeni simuliranju dinamike nevarnega procesa. Statične modele imenujemo tudi dispozicijski modeli. Dinamični modeli se imenujejo tudi procesni modeli in naj bi opisovali potek procesov ter napovedovali hitrosti, energijo, tlačno delovanje in pretvorbo (kinetične) energije v območju gibanja ter končno določevali območja odlaganja (doseg procesa). Procesni modeli so tako modeli poti (trajektorij), ki določajo možne poti delovanja procesa, in trenjski modeli, ki opisujejo hitrost in pretvorbo energije nevarnega procesa vzdolž njegove poti.

Ta prispevek je torej usmerjen v pregled razpoložljivih računalniških modelov gibanja skalnih gmot, v njihovo razvrstitev glede na merilo obravnave in v posebnosti pri njihovi rabi v smislu določanja ogroženih območij zaradi delovanja hribinskih plazov (pravni izraz, ki obsega tudi pojave skalnih odlomov in podorov) po Zakonu o vodah (2002).

2 Statični (dispozicijski) modeli

Dispozicijski modeli temeljijo na določitvi meje možnih območij sproščanja podorov, ki se lahko izvede za lokalno merilo (posamezni odlom ali podor) ročno z uporabo konvencionalnega terenskega kartiranja ali s pomočjo aerofoto posnetkov; za regionalno merilo (podori na širšem območju) pa se mora uporabiti manj natančno avtomatično določanje z uporabo geografskega informacijskega sistema.

Tradicionalno se aktivnost podora meri s pridobivanjem podatkov iz vzorca kamnine, odvzetega v skalni steni. Vzorcavanje je naporno, dolgotrajno in zaradi kompleksnosti pridobivanja vzorcev težko daje informacije o aktivnosti podorov na širšem geografskem območju.

Metoda za avtomatsko določitev mej območij sproščanja lahko zamenja ročno kartiranje, kadar gre za velika območja, saj kartografskih informacij ni težko dobiti. Čeprav kvantifikacija gotovo ni tako natančna kot pri terenskem kartiranju, se napake minimizirajo z naraščanjem števila podatkov. Analiza je hitra in daje dosledne rezultate, čeprav lokalno lahko pride do razlik v primerjavi s kartiranjem na terenu. Terensko kartiranje je bolj natančno od avtomatskega, ker vsebuje geološke kriterije in upošteva prekrivanje več geomorfnihih procesov ali vpliv manjših reliefnih elementov na aktivnost procesov.

Za dispozicijske modele v regionalnem merilu navadno ne obstaja veliko podrobnih podatkov (o litologiji, reliefu, razpokah ...), zato moramo določiti območja sproščanja na manj natančen način. Možni pristopi so:

- določitev mejnega naklona, ki ga mora skalno pobočje preseči, da je potencialno nevarno;
- prevzem vseh v topografski karti označenih skalnih površin (goličav);
- prevzem vseh površin iz geoloških mnenj ali na geomorfoloških kartah označenih nevarnih površin.

Vsi dispozicijski modeli v regionalnem merilu vsebujejo digitalni model reliefa ali višin. Digitalni model višin DMV lahko naredimo iz topografskih kart. Primerno merilo za modeliranje v regionalnem merilu je 1 : 10.000 do 1 : 25.000. Originalni podatki so navadno shranjeni v vektorski obliki, doda se lahko tudi posamezne višinske točke.

Transformacijo iz vektorskega v matricni format opravimo z oblikovanjem vmesnega modela trikotne nepravilne mreže (Triangular Irregular Network). Končni model višin je rastrski model s konstantno velikostjo celic. Za izbiro najprimernejše velikosti celice vidno ovrednotimo različne modele, iščoč najbolj natančen DMV z najmanjšim obsegom interpolacije. Ta tip validacije je pogosto uporabljen za primerjavo različnih interpolacijskih metod (Zhu in sodelavci 2001) in za oceno vpliva velikosti celice na DMV (Gao 1998).

Območja sproščanja podorov določimo z uporabo digitalnega modela višin in funkcijami, ki jih zagotavljajo komercialni računalniški programi za določitev prispevnih površin in smeri toka vode. Ta analiza se lahko nadalje kombinira z drugimi kartografskimi podatki v digitalnem modelu višin. Na ta način GIS odkriva veliko odvisnosti med aktivnostjo skalnih podorov in okoljskimi spremenljivkami, porazdelitev skalnih pobočij kombinira z drugimi tematskimi sloji in tako dobimo pojavnost drugih spremenljivk, kot so litologija, nadmorska višina, nakloni in orientacija skalnatih pobočij (sten), kjer se pojavljajo podorni procesi.

Da se identificirajo območja sproščanja podorov, je treba kartirati tudi območja odlaganja podornega materiala. Topografske kriterije in območja odlaganja se kombinira s kartami naklonov pobočij. Ta metoda temelji na algoritmu, ki je dostopen v veliko komercialnih računalniških programih, ki so v originalu namenjeni za analiziranje toka vode po topografski površini. Rezultat, dobljen s kombiniranjem karte območij sproščanja podorov, geologije ter digitalnim modelom višin, kaže odvisnost med porazdelitvijo odkladnin skalnega podora in litologijo, nadmorsko višino in naklonom pobočja ter močno odvisnost med vrsto razpok in gostoto. Vpliv nadmorske višine sprostitve skalnega podora je povezan s klimatskimi razmerami, ki se spreminjajo z nadmorsko višino.

Z namenom določiti območja, kjer se lahko pojavi odlom kamenja ali skalni podor, je bilo območje ob gorski cesti v bližini Siona v Švici (Baillifard in sodelavci 2003) razdeljeno glede na prisotnost ali odsotnost petih kriterijev:

- bližina preloma (vpliv naj bi bil do razdalje 300 m);
- bližina melišča (to nakazuje aktivnost v zaledju);
- skalna stena (nestabilna skalna pobočja so ponavadi blizu skalnih sten);
- strmo pobočje (nestabilnosti se pojavljajo pri naklonih večjih od izbrane vrednosti 45°);
- cesta (vpliv do maksimalne višine useka ceste, v tem primeru 50 m).

Ta merila so vnesli v GIS. Vsak parameter je bil preoblikovan v rastrski format. Vsota vseh petih parametrov je dala vrednosti relativne nevarnosti, ki je bila rangirana od 0 do 5. Ob tem se postavlja vprašanje, ali je teh pet parametrov pravilno izbranih. Že samo parametra »skalna stena« in »strmo pobočje« bi verjetno lahko zadoščala. Na območjih, ki so visoko rangirana po teh dveh merilih, bo bolj verjetno prišlo do nestabilnosti kot pri nižje rangiranih območjih. Prepoznavanje dogodka, ki vodi v nestabilnost, se opravi s terensko raziskavo, vendar se lahko del opravi tudi avtomatično.

Prisotnost podornih odkladnin (melišč) brez vegetacije je splošno uporabljen kazalec nestabilnosti skalnega pobočja (Menendez Duarte in Marquinez 2002), kadar so drugi faktorji za rast vegetacije na melišču sicer ugodni (podnebje, nadmorska višina, litološka in zrnavostna sestava). Karto območja sproščanja podorov dobimo s kombiniranjem prispevnega območja melišč s karto skalnatih pobočij. Karta območja sproščanja podorov je narejena avtomatično iz digitalnega modela višin z uporabo orodij, ki so vključena v GIS za določitev prispevnih območij in toka vode. Izvede se v ArcInfo z uporabo funkcij Flow Directions in Watershed. Funkcija Flow Direction uporablja algoritem, ki temelji na smeri največjega naklona iz centralne točke podora. Na podlagi tega izdelana matrika je del vhodnih podatkov za funkcijo Watershed, ki skupaj s podatki iz karte melišč določa prispevno območje podora nad skupkom celic v mreži DMV.

Ko je enkrat karta melišč v matričnem formatu, postane vhodni podatek, iz katerega se definira prispevna površina podora. Rezultat teh dveh funkcij je matrični model, v katerem je prispevna površina podora povezana z vsemi melišči, ki so bila kartirana. Ta model je nato kombiniran s karto skalnatih pobočij. Litologija skalnatih sten in litologija melišč se uporabi za pomoč računalniku pri izvedbi razporeditve podorov. Rezultat je nova karta, v kateri so skalnata pobočja razporejena v eno od dveh kategorij; aktivni in neaktivni podor. Razporeditev sloni na odsotnosti vegetacije na meliščih.

Potencialno območje sproščanja podora se lahko določi na osnovi karte srednjega naklona pobočij in geološke karte. Območja, ki jih prekrivajo morene, melišča, jezera, reke, ledeniki in poplavne ravnice, se zavrže kot potencialna območja sproščanja podorov. Območja oziroma celice s srednjim naklonom pobočja, večjim od nekega kota (40° , Dorren in Seijmonsbergen 2003) in klasificirana kot matična kamnina v geološki karti, so potencialna območja sproščanja podorov. Za identifikacijo območij sproščanja v dolini Yosemite, ZDA, so poskušali različne kombinacije naklona pobočja in tematskih kart, najboljše rezultate so dobili z izbiro naklona pobočja, ki je bil večji od 60° (Guzzetti in sodelavci 2003). Za izdelavo geomorfološke karte v regiji Montafon, Avstrija, je Dorren s sodelavci (2004) meril naklon pobočja ter vpade plasti in razpok; narejen je bil Marklandov test. Inženirski geologi uporabljajo Marklandov test, da določijo kinematično verjetnost nastanka ravnega ali klinastega zdrsa na skalnem pobočju. Ugotovljeno je bilo, da se giblje naklon območja sproščanja podorov med 50° in 90° .

3 Dinamični (procesni) modeli

Prvi računalniški (simulacijski) modeli skalnih odlomov in podorov so bili razviti konec sedemdesetih let 20. stoletja. Vsi modeli te generacije izračunajo iz vhodnih podatkov (oblika in velikost skalnega bloka, hrapavost pobočja, vzdolžni profil pobočja) koordinate gibanja podornih blokov. Modeli večinoma izračunajo tudi hitrost bloka in maksimalne višine parabol (ovojnico), na katere nato dimenzioniramo varovalne objekte (npr. lovilne mreže).

Omenjeni modeli upoštevajo podorni blok kot masno točko ali kot togo telo (preglednica 1). Vsi modeli so dvodimenzijski in so čisti trenjski modeli, namenjeni oceni dosega podora. Če pred simulacijo s takimi modeli moramo podati vzdolžne profile pobočja, po katerem se gibljejo podorni bloki, kot zaporedje odsekov različnih naklonov (slika 1). Pri teh dvodimenzijskih modelih so izbrani vzdolžni profili pobočja že tudi modelirane poti podornih blokov, ki so lahko različne od dejanskih poti.

Slika 1: Podor Osojnik v dolini Trente z dvema vzdolžnima profiloma, v kakršnih uporabimo dvodimenzijske trenjske modele za oceno dosega podora. Na sliki so tudi neme priče, označene s trikotniki, ki jih uporabimo pri validaciji modela (fotografija: Urška Petje, 2004). Glej angleški del prispevka.

Modeli poti, po katerih se dejansko gibljejo skalni bloki po pobočju, so se začeli razvijati šele konec 20. stoletja. Razlog leži v pomanjkanju natančnih digitalnih informacij o reliefu. V zadnjih letih je na voljo čedalje več natančnih digitalnih modelov višin, kar omogoča uporabo tridimenzijskih modelov v regionalnem merilu. Tridimenzijske modele tako sestavljajo trije elementi: dispozicijski model, model poti in trenjski model (preglednica 2).

4 Modeli poti (trajektorij)

Vloga modela poti je določitev možnih poti gibanja podornih blokov. Pot se v modelu določi korakoma v izbrani računski mreži. V prvem koraku se določi celice izvora bloka, v drugem koraku pa se določi celice, v katere se ta podorni blok lahko premakne. Za določitev poti se mora najti zaporedje ustreznih celic računske mreže. Pogosto uporabljene metode za določitev smeri gibanja podornega bloka so:

- metoda D8;
- metoda Rho8 in metoda naključnega korakanja;
- vektorska metoda;
- metoda raztekanja;
- metoda D16.

Preglednica 1: Lastnosti dvodimenzijskih modelov podorov, uporabnih za lokalno merilo (Meißl 1998, 81).

model	v določenih mejah slučajno spremenljivi parametri	modelirane vrste gibanja
Spang 1987, Spang in Soenser 1995	začetni pogoji & lastnosti površine	prosti pad, poskakovanje, kotaljenje, drsenje
Bozzolo in sodelavci 1988	začetni pogoji	prosti pad, poskakovanje, kotaljenje, drsenje
Evans in Hungr 1988, 1993	dušenje pri trku	poskakovanje kotaljenje
Barrett in sodelavci 1989	naklon pobočja pri vsakem trku (odvisen od lastnosti površine in velikosti skalnega bloka)	poskakovanje ¹
Zinggeler in sodelavci 1991	centralnost trka z drevesi (od oplazenja do polnega trka) in premer dreves, v katere trčijo bloki	poskakovanje kotaljenje

¹ kotaljenje je zaporedje kratkih poskokov

Preglednica 2: Pregled tridimenzijskih računalniških modelov podorov, uporabnih za regionalno merilo.

avtor modela	dispozicijski model	model poti	trenjski model
Toppe 1987	naklon $\geq 30^\circ$	določi uporabnik	geometrijski kot $\geq 30^\circ$
Grunder 1984,	območja skal in območja grebenov $\geq 30^\circ$	metoda razširjanja ¹ & DMV ²	doseg določen v odvisnosti od
Grunder in Kienholz 1986			naklona, morfologije in vegetacije
van Dijke in van Westen 1990	naklon pobočja $\geq 60^\circ$ (fliš) ali površine iz geomorfoloških kart	metoda D8 & DMV	energijski pogoji hitrost bloka
Mani in Kläy 1992	območja skal v pregledni karti 1 : 5.000	vektorska metoda & TIN	geometrijski kot $\geq 32^\circ$
Krummenacher 1995	področja podorov iz kart 1 : 25.000	metoda raztekanja & DMV	geometrijski kot $\geq 30^\circ$ – 38°
Meißl 1998		metoda D8 & D16 & DMV	geometrijski kot $\geq 31^\circ$, senčni kot hitrost bloka

¹ metoda ne podaja empiričnih vrednosti za njeno uporabo in v tem prispevku ni podrobneje obravnavana

² digitalni model višin (DMV)

Metodo D8 sta uporabila npr. van Dijke in van Westen (1990). Ta metoda je osnova ukaza Flowdirection v programskem orodju ArcInfo (ESRI 2002). Modul za izračun poti sestoji iz rastrske analize sosednjih celic z velikostjo okna 3×3 celice in torej simulira 8 možnih, a različnih smeri padanja. Za določitev smeri padanja je treba določiti padec v vseh sosednjih celicah (teh smeri je osem). Pot padanja je v smeri največjega naklona. Naklon v celici A za vseh osem sosednjih celic se izračuna po enačbi:

$$f = \frac{h_A - h}{d}, \quad (1)$$

kjer je h_A nadmorska višina v celici A, h nadmorska višina v sosednji celici in d razdalja med središčema obeh celic.

Pri metodi D8 je omejeno število smeri padanja na osem, ki oklepajo medsebojni kot 45° . Zato lahko pride do znatnega odklona v modelu od dejanske smeri padanja podornega bloka. Zato se je začela uporabljati metoda Rho8 (Fairfield in Leymarie 1991). Za štiri glavne smeri neba se izračuna naklon:

$$f_{rho} = h_A - h \quad (2)$$

za diagonalne smeri pa se upošteva še faktor rho8:

$$f_{rho} = rho8 \cdot (h_A - h). \quad (3)$$

Rho8 leži na intervalu (0,5–1) in njena porazdelitev se lahko približno izrazi s pomočjo naključnega števila r , ki je enakomerno porazdeljeno na intervalu (0–1):

$$rho8 = \frac{1}{2-r}. \quad (4)$$

Podobna je metoda naključnega korakanja, pri kateri se izračuna naklon po metodi D8. Vsaka sosednja celica tako dobi naključno verjetnost, da bo izbrana kot naslednja celica.

Obe opisani metodi pomenita približevanje računske poti k dejanski smeri padanja, vendar se kljub temu v praksi pojavljajo težave: pri pobočjih, kjer bi morale smeri padanja potekati vzporedno, pride do tega, da se združijo.

Najnatanejše rezultate dobimo s kombinacijo rastrskih in vektorskih podatkov. Najprej se iz sosednjih središčnih točk celice interpolira višino točk v vogalih celice. Po metodi najmanjših kvadratov se nato izračuna iz štirih točk približno površino. Če izberemo jugozahodno točko celice kot izhodišče koordinatnega sistema, lahko zapišemo enačbo ravnine kot sledi:

$$z = Ax + By. \quad (5)$$

Ekspozicija ravnine ustreza smeri padanja in to lahko zapišemo z vektorjem $(-A, -B)$. Če postavimo ta vektor v središčno točko začetne celice, lahko s pomočjo kotnih funkcij določimo izstopno točko vektorja linije padanja. Hkrati pa ta točka predstavlja tudi vstopno točko za sosednjo celico. Podoben algoritem sta uvedla tudi Hegg in Kienholz (1995) za trikotno nepravilno mrežo (TIN).

Prej opisanim metodam je skupno, da je pot padanja lahko le v eni smeri iz predhodne celice v sosednjo celico. V hidrologiji, kjer je treba določiti smer površinskega odtoka, pa se je razvila metoda, ki omogoča smer toka v celice v vseh smereh z manjšo višino, metodo lahko imenujemo metodo raztekanja. Iz vsake celice teče voda v vse nižje ležeče sosednje celice, delež vode pa je premosorazmeren višinski razliki med parom celic:

$$w_i = w_A \cdot \frac{\Delta h_i}{h} \quad (6)$$

$$\Delta h_i = h_A - h_i \text{ za } h_A > h_i \quad (7)$$

$$\Delta h_i = 0 \text{ za } h_A \leq h_i \quad (8)$$

$$h = \sum \Delta h_i \text{ za } 1 \leq i \leq 4, h > 0 \quad (9)$$

kjer je: w_A vsebnost vode v celici, ki oddaja vodo, w_i vsebnost vode v celici, v katero voda priteka, h_A višina celice, ki vodo oddaja ter h_i višina celice, ki vodo sprejema. Tako kot vsi drugi modeli, ima tudi ta model pomanjkljivosti, ki jih poskušajo avtorji rešiti na različne načine, npr. z vpeljavo minimalne višinske razlike, ki jo mora imeti sosednja celica, da tok teče v to celico.

1	2	3	4	5
16				6
14		S		7
15				8
13	12	11	10	9

Preglednica 3: Račun naklona pri metodi D16 v celici S v sredini okna velikosti 5×5 celic (Meißl 1998, 95).

Da bi se zmanjšale napake, ki nastanejo z uporabo metode D8, je Meißl (1998) razvila metodo D16. Tako namesto za 8 najbližjih sosednjih celic (okolica 3×3) izračunamo naklone za 16 »najbližjih celic« celici S v okolici z velikostjo okna 5×5 celic (preglednica 3). Naklon se izračuna podobno kot pri metodi D8:

$$f = \frac{h_A - h}{d}, \tag{1}$$

kjer je h_A nadmorska višina v celici S, h nadmorska višina v sosednji celici in d razdalja med središčema obeh celic: $d = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \text{širina rastra}$ za celice 1, 5, 9, 13; $d = \sqrt{5} \cdot \text{širina rastra}$ za celice 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 ter $d = 2 \cdot \text{širina rastra}$ za celice 3, 7, 11, 15.

Prednost metode D16 je jasna: namesto 8 imamo 16 smeri in s tem dosežemo, da se računaska pot približa dejanski poti padanja. Metoda ima tudi sistemsko slabost, da preskoči okolico celice S okna 3×3, zato se moramo vprašati, ali nimajo mogoče te celice višje nadmorske višine kot celica S. Izboljšanje, ki ga uvaža metoda D16 v primerjavi z metodo D8, lahko vpeljemo z natančnejšim digitalnim modelom višin, ki ga uporabimo kot podlago.

5 Trenjski modeli in modeliranje dosega podora

Pri razvoju računalniških programov za račun dosega skalnega podora (angl.: *runout distance*) je posebno pomembno, da razumemo in izberemo:

- primerne parametre za opis dosega skalnega podora;
- faktorje, ki vplivajo na doseg skalnega podora.

Parameter za opis dosega podora je lahko kot: geometrijski kot (angl.: *geometric angle*, nem.: *geometrisches Gefälle*), kot gibanja (angl.: *travel angle*, *angle of reach*; nem.: *Fahrböschung*), srednji naklon (angl.: *mean gradient*; nem.: *mittlere Neigung*) in senčni kot (angl.: *shadow angle*; nem.: *Schattenwinkel*) ali vodoravna razdalja (tlorisna projekcija, absolutni doseg) (slika 2). Absolutni doseg podora se navadno opiše z navpično in vodoravno razdaljo, kjer slednjo različni avtorji različno definirajo. Heim (1932) je trdil, da sta navpična in vodoravna projekcija v določenem razmerju in tvorita kot, ki opisuje relativno razdaljo. Kot ni konstanten, vendar pa se spreminja v določenem intervalu za podobne vrste gibanja. V praksi je poznavanje relativnega dosega podora velikega pomena, saj lahko že samo s kotom zelo grobo, a vseeno enostavno določimo ogrožene površine.

Slika 2: Geometrijski kot (β_g), senčni kot (β_s), kot gibanja (β_j) ter srednji naklon (β_n). Z »A« je označeno območje sproščanja, z »B« območje gibanja in s »C« območje ustavljanja. L1 predstavlja najkrajšo razdaljo med začetkom in koncem gibanja, L2 predstavlja dolžino horizontalne projekcije poti.

Glej angleški del prispevka.

V nadaljevanju so najprej podrobneje opisani faktorji, ki vplivajo na doseg podora: lastnosti podorne mase, lastnosti pobočja in topografske razmere. Temu opisu sledi pregled trenjskih modelov.

5.1 Podorna masa

Na doseg skalnega podora vpliva njegova prostornina ter oblika in velikost podornih blokov ter material, iz katerega so sestavljeni. Oblika in velikost bloka zelo vplivata na dolžino in višino poti (v obliki parabole), hitrost kotaljenja in na čas, kdaj pride do prehoda iz poskakovanja v kotaljenje (Petje in sodelavci 2005b). Večji bloki se pogosto gibljejo dlje kot manjši. Manjši bloki in skale se pri trku od večjih blokov odbijejo v drugo smer in njihov doseg se zmanjša (Abele 1994). Terenske raziskave kažejo, da se z naraščanjem velikosti blokov povečujejo tudi kot gibanja in ostali koti. Lahko se tudi zgodi, da se večji bloki ustavijo prej. Vzroki za to so lahko naslednji:

- večji bloki se globlje ugreznejo v podlago;
- interakcija med bloki včasih ni zanemarljiva in se lahko zaradi tega bloki prej ustavijo;
- večji bloki se lahko razletijo v še zmeraj sorazmerno velike bloke, pri tem se porabi veliko kinetične energije in sledi konec gibanja.

Poleg velikosti ima velik pomen tudi oblika, saj vpliva na iztek gibanja. Bloki bolj okrogle oblike dosežejo pri kotaljenju večje razdalje.

Med prostornino gorskega podora (angl.: *major rockfall*, nem.: *Bergsturz*) in kotom gibanja obstaja negativna povezava. Pri isti višini padanja se doseg s prostornino poveča (Moser 1986). Za skalne podore, ki so manjšega obsega od gorskih podorov, tega ne moremo trditi.

5.2 Lastnosti pobočja

Vrsta kamnine in razbrazdanost pobočja imata gotovo vpliv na doseg podora, saj vplivata na to, ali bo pri trku prišlo do spremembe kinetične energije v plastične deformacije ali v razpad bloka. Dolomit se npr. lahko razleti na droben drobir, medtem ko lahko konglomerat ostane v blokih, velikih več m³. Vendar podatkov o povezavi med geološkimi lastnostmi in dolžino dosega podora ni na voljo. Najpomembnejša lastnost pobočja je hrapavost in plastičnost kot tudi morebitne ovire. Hrapavost in plastičnost pobočja vplivata na energijske izgube pri trku blokov ter na velikost koeficienta trenja pri drsenju in kotaljenju. Doseg je toliko večji, kolikor manjše so neravnine v primerjavi z velikostjo bloka. Hrapavost podlage ni odvisna zgolj od vegetacije in gruča, temveč tudi od manjših sprememb reliefa, ki so velike od nekaj decimetrov do nekaj metrov. Vpliv manjših sprememb reliefa je toliko večji, čim manjši so bloki. Hrapavost podlage se določi s terenskim ogledom, ker je DMV za kaj takega premalo natančen.

Pri trkih z ovirami, kot so drevesa, hiše ali varovalni objekti, pride do velikih izgub kinetične energije in s tem do zmanjšanja hitrosti. Pomembno vlogo pri tem ima velikost bloka. Pri manjših skalah predstavljajo veliko oviro že grmovje, pri velikih blokih pa gozd ne predstavlja bistvene ovire. Paziti pa je treba na to, da pri poškodovanem gozdu, ki je že doživel podor, doseže nov podor lahko bistveno večji doseg.

5.3 Topografske razmere

Najpomembnejši topografski faktorji, ki vplivajo na doseg, so: skupna višinska razlika podora, višina prostega pada podora, naklon pobočja, vbočenje in izbočenje pobočja.

Višina pobočja, kjer poteka pot, je določena z naklonom pobočja, po katerem se blok giblje in nato ustavi. Vrh pobočja obenem določa največjo potencialno energijo, ki jo je blok imel. Med višino padanja in senčnim kotom oziroma drugimi koti ni linearne povezave.

Po Evansu in Hungru (1993) obstaja povezava med višino prostega pada in kotom gibanja, medtem ko naj med senčnim kotom in višino prostega pada ne bi bilo povezave. Terenske raziskave naj bi pokazale (Meißl 1998), da obstaja ravno tako tudi povezava s senčnim kotom. Enako pa velja tudi za horizontalno razdaljo.

Naklon pobočja ima neposreden vpliv na strižno silo (trenje) in na normalno silo ter je zato najpomembnejši faktor za določitev hitrosti in dosega. Bolj ko je strmo pobočje, tem manjše so energijske izgube pri trku s tlemi. Odločilna za mesto ustavljanja je dolžina poti gibanja in pot ustavljanja.

Pri ukrivljenosti pobočja ločimo vertikalno in horizontalno izbočenje. Izbočenje in vbočenje pobočja vpliva na hitrost in na energijske izgube. Pri večjem vbočenju (konkavno) pride do bistveno večjega dosega.

5.4 Trenjski modeli

Modeli poti omogočajo račun poti podornih blokov. Ob tem potrebujemo še pogoj, pri katerem se proces gibanja konča, in ta je vgrajen v trenjski model. Pri modelih dosega, uporabnih za regionalno merilo (preglednica 2), se:

- najpogosteje za določitev meje podornega območja vzame geometrijski kot;
- lahko uporabi energijske enačbe, hitrost padajočega bloka – računa se, dokler hitrost ni enaka nič, kar najpogosteje uporabijo dvodimenzijski modeli (preglednica 1).

Heim (1932) je ugotovil, da veliki kamniti plazovi in podori potujejo veliko bolj ekonomično kot manjši. Geometrijski kot in kot gibanja je Heim definiral kot karakteristično količino za določitev dosega. Kot gibanja je kot med horizontalno ravnino in črto, ki povezuje najvišjo točko odlomnega roba izvora podora, in najbolj oddaljeno točko, kjer se skale ustavijo. Pomembno je, da omenjena črta sledi dejanski poti. Črta tako ni najkrajša razdalja, temveč upošteva horizontalno projekcijo poti.

Geometrijski kot lahko zelo hitro določimo, vendar pa je močno odvisen od nepravilnosti in izbočenosti pobočja, zato se večinoma pogosteje uporablja kot gibanja. Kot gibanja je vedno položnejši od geometrijskega kota (slika 3).

Slika 3: Primerjava geometrijskega kota β_g in kota gibanja β_i . Glej angleški del prispevka.

Kot gibanja se da določiti na terenu, četudi je večino podornega materiala že odnesla erozija. Podorno gradivo, ki se ustavi na pobočju ali v dolinskem dnu, pogosto odnesejo hudourniki in reke. Vpliv podorov po potresih v Posočju leta 1998 in 2004 na prodni in vodni režim reke Soče je obravnaval Mikoš s sodelavci (2005). Vseeno lahko predpostavimo, da je odlomni rob in tudi najbolj oddaljen odložen podorni material (običajno najbolj grobe komponente) še vedno viden tudi po daljšem časovnem obdobju. Poleg tega se povprečni naklon pobočja ne razlikuje veliko od energijske črte, ki je eden od najpomembnejših parametrov pri podorih. Kot gibanja pa ni uporaben samo pri analizi preteklih podornih dogodkih, lahko se ga uporabi tudi pri napovedih prihodnjih dogodkov.

Heim (1932) je pisal tudi o naklonu težišča podora (nem.: *Schwerpunktgefälle*), ki je določen kot geometrijski kot težišča. Ker pa je težišče podorne mase zelo redko znano, se tudi ta kot redko uporablja. Naklon težišča se zelo malo razlikuje od kota gibanja, ker sta navadno težišči daleč narazen. Iz eksperimentov je znano, da je kot gibanja vedno manjši od naklona težišča. Naslednji izraz, ki se uporablja, je pavšalni naklon (nem.: *Pauschalgefälle*), ki je definiran kot tangens naklona težišča. Velikokrat pa se namesto naklona težišča vzame kar kot gibanja.

Preglednica 4: Vrednost kota gibanja β_i po različnih avtorjih.

Avtor	kot gibanja β_i
Hsü 1975	31°
Moser 1986	33°–42°
Grunder 1984	32,6°–33,4°
Onofri in Candian 1979	28,34°–40,73°
Domaas 1985	32°
Gerber 1994	33°–37°

V fiziki ponavadi kot gibanja razložimo tako, da je tangens naklona težišča oziroma tangens kota gibanja enak koeficientu trenja. Pri znanem koeficientu trenja lahko določimo doseg podora. Obratno lahko iz znanega kota gibanja (preglednici 4 in 5) ali naklona težišča dobimo koeficient trenja. Vseeno pa je taka izpeljava problematična. Koeficient trenja ni odvisen samo od lastnosti podorne mase (prostornina, oblika, lastnosti materiala) in pobočja.

Preglednica 5: Kot gibanja β_i pri različnih velikostih podornih blokov in lastnostih podlage pobočja (vegetacija, neravnine, sestava tal) (Gerber 1994, vir: Meišl 1998, 56).

velikost padajočih podornih blokov	kot gibanja β_i in upor pobočja $\beta_i = 33^\circ$ – majhen	$\beta_i = 35^\circ$ – srednji	$\beta_i = 37^\circ$ – velik
kamenje	travnik ni neravnin	grmovje majhne neravnine	drevesa velike neravnine
manjši do srednji bloki	plitva prst (tla) grmovje majhne neravnine	globoka prst (tla) drevesa velike neravnine	pobočni drobir
veliki bloki	plitva prst (tla) drevesa velike neravnine globoka prst (tla)	globoka prst (tla)	

Pomembno vlogo ima tudi vrsta gibanja. Pri prostem padu moramo upoštevati le upor zraka, pri drsenju in kotaljenju različne koeficiente upora (koeficient trenja pri drsenju, koeficient trenja pri kotaljenju). Tako je tangens naklona težišča odvisen od časa trajanja posamezne faze gibanja (Petje in sodelavci 2005b).

Hsü (1975) je uvedel parameter presežne razdalje gibanja ETD (angl.: *excessive travel distance*), ki naj bi zamenjal kot gibanja. Ta parameter je definiran kot razlika med skupno horizontalno razdaljo določene-ga dogodka s poljubnim kotom gibanja in razdaljo virtualnega dogodka s predpisanim kotom gibanja $\beta_f = 32^\circ$, pri enaki višini padanja (slika 4). Vendar pa nam presežna razdalja gibanja ne da nobene nove informacije, ki je ne bi vseboval že kot gibanja, saj se lahko zapiše: $ETD = L(1 - \tan 32^\circ)$.

Slika 4: Definicija presežne razdalje gibanja (ETD) po Hsüju (1975).
Glej angleški del prispevka.

Pri določitvi kota gibanja nastopita po Evansu in Hungru (1993) dve težavi:

- Velikost kota gibanja je odvisna od višinske razlike. Velik del kinetične energije, ki jo ima blok, se pri prvem trku po koncu prostega padanja izgubi. Ne glede na višino padanja se vsak fragment kotali naprej.
- Vedno ni poznana natančna lega izvora kot tudi ne lega odlaganja.

Evans in Hungr (1988) sta zato vpeljala minimalni senčni kot (angl.: *minimum shadow angle*), ki temelji na Liedu (1977) in je definiran z vrhom pobočja in ne z izvorom nad pobočjem. To je kot med črto, ki povezuje najvišjo točko pobočja, in točko, kjer se skale ustavijo, ter horizontalo. Ta pristop ne zahteva poznavanja točne lokacije vsakega posameznega sproščanja kamenja, saj je učinek aktivnosti padanja kamenja integriran s časom z upoštevanjem najdaljše razdalje, ki jo naredi blok. Minimalni senčni kot je najmanjši senčni kot na določenem območju. Minimalne vrednosti so podali različni avtorji in se gibljejo med 22° in 30° . Lied (1977) je predlagal senčni kot med 28° in 30° , nekateri avtorji tudi 25° . Evans in Hungr (1993) sta v raziskavi v Britanski Kolumbiji prišla do ugotovitve, da je senčni kot minimalno $27,5^\circ$, ne glede na višino stene, dolžino poti in naklon pobočja. Kjer je površina pobočja bolj gladka, avtorji predlagajo manjši kot (23° – 24°).

Meišl (1998) je v raziskavah 21 območij v zahodnih Bavarskih Alpah iz kart v merilu 1 : 10.000 in iz teren-skih raziskav ugotovila, da se geometrijski kot in kot gibanja razlikujeta za manj kot 1° . Srednja vrednost obeh naklonov je okoli 38° (kot gibanja minimalno 29° , maksimalno $47,5^\circ$, geometrijski kot minimalno $29,5^\circ$, maksimalno $48,5^\circ$). Senčni kot je določila za 26 območij podorov in ugotovila je, da je njegova najmanjša vrednost 26° . Srednji naklon padnice znaša okoli 25° . Senčni kot in srednji naklon se tako kot

geometrijski kot in kot gibanja razlikujeta maksimalno za 1° pri majhnih naklonih pobočja. Čim večji je senčni kot, večje vrednosti zavzame tudi kot gibanja.

Tako kot gibanja kot minimalni senčni kot se lahko uporabita le za prvo oceno dosega podora.

Pri minimalnem senčnem kotu nastopajo podobni problemi kot pri geometrijskem kotu, zato je bil podobno kot kot gibanja uveden še en kot, in sicer srednji naklon (angl.: *mean gradient*). Srednji naklon torej povezuje vrh pobočja (točko, kjer udari kamen ob pobočje) in točko, kjer se kamen ustavi, pri tem, da se upošteva dejanska dolžina prepotovane razdalje, in ne najkrajša razdalja, tako kot pri geometrijskem naklonu in senčnem kotu.

Za dolino Yosemite, Kalifornija, ZDA, sta bili izdelani karti nevarnosti za skalne odlome in podore, in sicer z uporabo senčnega kota ter z uporabo programa STONE (Guzzetti in sodelavci 2003). Za senčni kot je bila izbrana vrednost 22° (maksimalni možni doseg, kjer so možni tudi drobirski tokovi (Evans in Hungr 1993)). Primerjava obeh kart kaže dobro ujemanje, čeprav je bil večinoma doseg podorov, ki ga je določil program STONE, podcenjen v primerjavi s senčnim kotom. Vendar pa je bil na nekaterih mestih doseg podorov z uporabo programa STONE tudi večji, kot ga dobimo s senčnim kotom; to pa je lahko nevarno.

6 Sklep

Vedno večja človekova prisotnost v gorskem svetu povečuje škodni potencial na tem območju, ki ga prepletajo številni za človeka in njegovo imetje nevarni naravni procesi, med njimi tudi skalni podori.

V moderni informacijski družbi se človek obnaša vedno bolj razumsko in zato raje deluje preventivno kot kurativno. Poznavanje nevarnih območij zaradi delovanja skalnih podorov je osnova preventivnega ukrepanja (Mikoš in sodelavci 2004), ki lahko pomeni umik človekove prisotnosti iz nevarnega območja ali pa načrtovanje ustreznih tehničnih (gradbenih) ukrepov.

Za tak pristop je izjemnega pomena poznavanje dinamike gibanja skalnih gmot. Razvoj računalniške tehnike omogoča pripravo ustreznih podlag za uporabo sodobnih računalniških modelov, ki omogočajo bolj zanesljive napovedi dosegov skalnih podorov za regionalno merilo.

V tem prispevku predstavljeni modeli bodo lahko uspešno uporabljeni pri izdelavi ustreznih kart nevarnosti delovanja skalnih podorov šele po izdelavi pilotnih projektov. Ti naj bi za slovenske razmere določili modelne parametre, kot so na primer geometrijski kot, senčni kot ali mejni naklon skalnatga pobočja, ki je potencialno nevarno. Predlagamo izvedbo pilotnih projektov v različnih geoloških razmerah, npr.: fliš, apnenec, dolomit, magmatske kamnine.

Podobnega pomena za Slovenijo je tudi izdelava geomorfoloških kart, ki bodo nadgradile osnovno geološko karto, morda izdelane v merilu 1 : 50.000.

7 Zahvala

V prispevku prikazane metode so bile zbrane v okviru dela na Ciljnem raziskovalnem programu »Metodologija za določanje ogroženih območij in način razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti zaradi zemeljskih plazov«, ki so ga finansirala naslednja ministrstva: Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport, Ministrstvo za okolje, prostor in energijo ter Ministrstvo za obrambo.

8 Literatura

Glej angleški del prispevka.

