

# GEOROCK 2D

## VD Vrchlice – pádová simulace DB 2

### **Trajektorie padajících bloků podél svahu**

Pohyb padajícího bloku po svahu závisí na mnoha faktorech, které není snadné numericky vyjádřit. Trajektorie pádu bloků závisí na geometrii svahu, na tvaru padajícího balvanu a na jeho počáteční rychlosti v okamžiku oddělení od svahu, a také na hodnotě energie bloku postupně klesající v důsledku nárazů během pádu.

Padající balvany se mohou klouzat, kutálet nebo odskakovat (rotace, saltace) v závislosti na jejich tvaru (zploštělý nebo zaoblený) a na sklonu svahu.

Energie rozptýlená v důsledku nárazů se obvykle liší podle charakteristiky pohybu a závisí na mechanických vlastnostech bloku a na materiálech přítomných podél svahu (hornina, půda, vegetace), které působí proti pohybu balvanů.

Ve skutečnosti je však prakticky nemožné přesně určit morfologii svahu a detekovat tvar různých balvanů, které se mohou oddělit.

Kromě toho se geometrie svahu a povaha výchozích materiálů časem mění a jsou někdy citlivé v důsledku změny charakteru horniny, hromadění sutě v méně strmých oblastech a vývoje vegetace a jeho povahy.

Nakonec je prakticky nemožné modelovat pohyb balvanů v případech, kdy se tyto bloky tříští v důsledku nárazů, ani není možné určit oblasti svahů, kde k roztržení bloků může dojít.

Pro analýzu klesajících trajektorií musíme vycházet ze zjednodušených modelů: geotechnický návrh ochranných zásahů musí být proto vytvořen na základě rozsáhlého numerického experimentování, které umožní prozkoumat různé aspekty jevu a rozpoznat hlavní faktory, které ovlivňují pohyb pádu v konkrétní situaci.

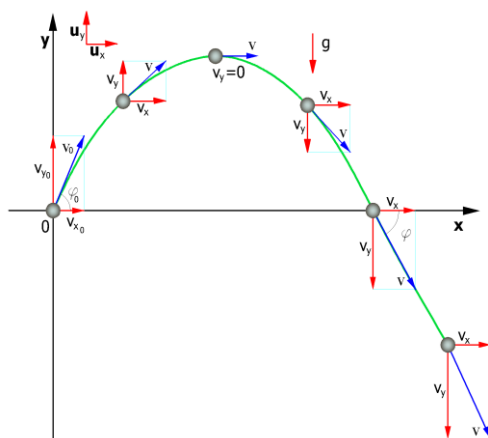
Ve složitějších případech může být nutné provést kalibraci modelu na základě analýzy trajektorií detekovaných kinematografií in situ po zhroucení balvanů.

### **Lumped Mass computation model (Model výpočtu soustředěné hmotnosti)**

Předpoklady modelu se soustředěnou hmotou jsou:

- 1) linie příčného řezu, profil svahu podobný přerušované linii skládající se z přímkových segmentů
- 2) bodové umístění bloku a zanedbatelný odpor vzduchu

V tomto případě lze trajektorii balvanu určit pomocí pohybových rovnic tuhého tělesa



*Znázornění trajektorie pádu bloku*

s odkazem na systém ortogonálních kartézských os jsou rovnice:

$$x = v_x \cdot t + x_0$$

$$y = y_0 + v_y \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2 \quad (1)$$

kde:

- $v_x$  = vodorovná složka rychlosti balvanu
- $v_y$  = vertikální složka rychlosti balvanu
- $t$  = čas
- $g$  = gravitační zrychlení
- $x_0$  = úsečka, kde je balvan oddělen od svahu nebo míst dopadů při padajícím pohybu
- $y_0$  = souřadnice bodu, kde je balvan oddělen od svahu nebo míst dopadů při padajícím pohybu

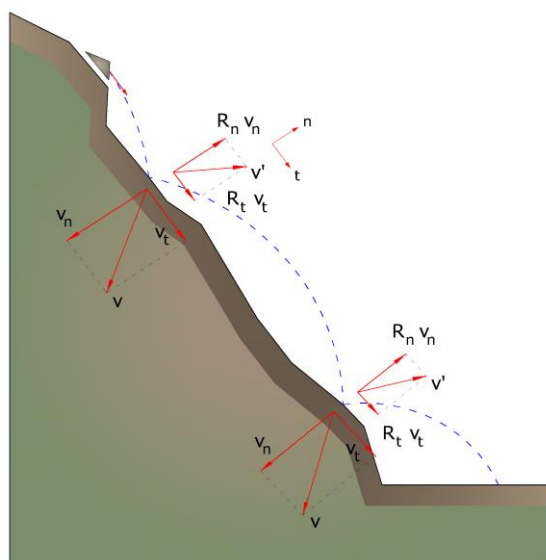
Podél osy x je pohyb rovnoměrný, zatímco podél osy y je pohyb rovnoměrně zrychlen.

Tímto způsobem se trajektorie pohybu balvanu skládá ze série parabol nakreslených mezi bodem, ve kterém dochází k odpojení, a bodem, ve kterém blok poprvé dopadne na svah (v počáteční fázi pohybu) a mezi dvěma po sobě následujícími místy dopadu na svah nebo na úpatí svahu (následně, do místa zastavení).

Souřadnice bodů nárazu a složky rychlosti jsou určeny řešením systému mezi rovnicí (1) a rovnicí přímky představující profil svahu.

V praxi postupujeme od bodu, kde dochází k odloučení balvanu, a řešíme tento systém rovnic s přihlédnutím k různým rovnicím přímek, které obsahují postupné segmenty přerušované čáry, až k nalezení souřadnic bodu, nárazu bod, který patří do paraboly, která představuje trajektorii a spadá do jednoho ze segmentů přerušované čáry, a je tedy současně bodem sklonu.

Tento bod je prvním bodem nárazu balvanu na svahu. Postup se od tohoto bodu opakuje, aby se určil další oblouk trajektorie a nový bod nárazu.



*Ukázka nárazových bodů, trajektorie balvanu  
a vektor rychlosti přiletu a odletu při každém odrazu*

Ztráta kinetické energie v důsledku tření a nárazů může být modelována snížením rychlosti padajícího balvanu, kdykoli dopadne na svah.

Zejména indikování pomocí  $V_n$  a  $V_t$  složek (normální a tangenciální) rychlosti před nárazem, po dopadu  $v'_n$ ,  $v'_t$  lze vypočítat pomocí vztahu:

$$V'_n = V_n \cdot R_n$$

$$V'_t = V_t \cdot R_t$$

kde  $R_n$  a  $R_t$  jsou restituční koeficienty, proměnné v rozsahu 0-1.

### CRSP výpočetní metoda

Model CRSP (Colorado Rockfall Simulation Program) byl vyvinut Pfeifferem a Bowenem (1989) za účelem modelování pohybu padajícího bloku ve tvaru koulí, válců nebo disků s kruhovým průřezem ve svislé rovině pohybu.

K popisu pohybu balvanů model CRSP aplikuje parabolickou rovnici pohybu bloku ve volném pádu a princip zachování celkové energie.

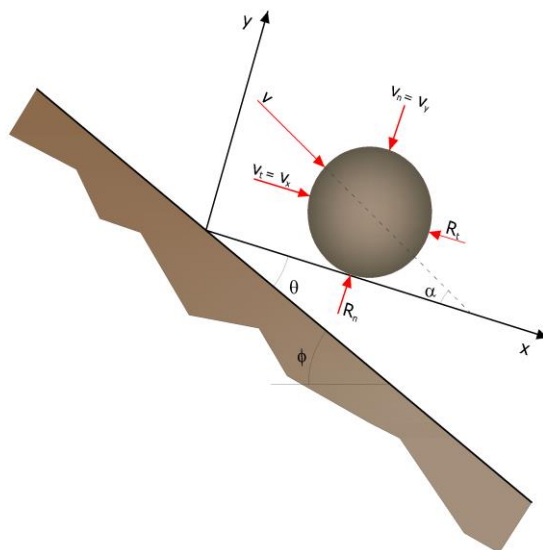
Fenomén nárazu je modelován s použitím dalších parametrů ve srovnání s metodou koncentrované hmoty, drsností svahu a velikostí balvanů.

Model CRSP zejména předpokládá, že úhel vytvořený mezi směrem balvanu a profilem svahu se mění podle statistiky, která musí být definována pro každý analyzovaný případ. Model statisticky zohledňuje také výsledky, které spočívají hlavně v rychlostech a výškách odrazů ve srovnání s povrchem svahu během trajektorie pádu. Model tedy bere v úvahu kombinace pohybů volného pádu, odrazu, odvalování a smýkání, které se mohou lišit v závislosti na velikosti balvanů a morfologii svahu.

Spolehlivost modelu byla ověřena porovnáním číselných výsledků s výsledky získanými z testů in situ.

Popis pohybu volného pádu začíná od bodu, ve kterém je známá počáteční rychlost, a je rozložen na horizontální a vertikální složku. Blok je vystaven pohybu volného pádu, dokud nenarazí na povrch svahu.

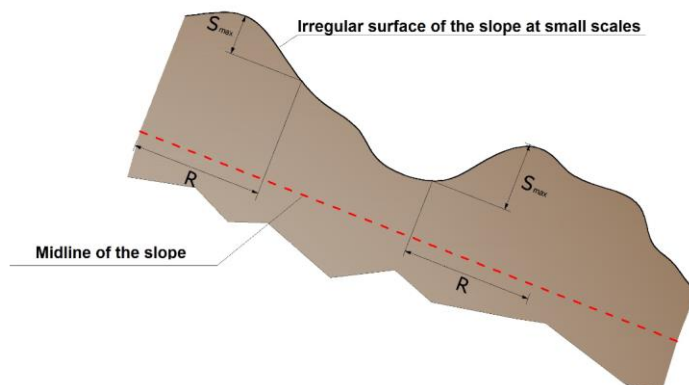
Z průsečíku se získají souřadnice bodu nárazu. Vektor rychlosti pre-dopadu  $V$ , tvoří úhel  $\alpha$  se sklonem.



*Znárodnění fáze nárazu:  $\alpha$ ) úhel nárazu je definován jako funkce trajektorie balvanu;  $\theta$ ) sklon svahu;  $\phi$ ) změna sklonu jako funkce místní drsnosti svahu*

U každého nárazu se úhel sklonu  $\phi$  náhodně mění v rozmezí hodnot mezi 0 a  $\theta_{\max}$ . Hodnota  $\theta_{\max}$  závisí na drsnosti svahu a na velikosti balvanu a je určena měřením in situ. Při uvažovaném poloměru uvažovaného bloku  $R$  máme:

$$\tan \theta_{\max} = \frac{S_{\max}}{R}$$



*Vliv drsnosti svahu na dráhu balvanu: poměr mezi výškou nerovností a poloměrem balvanu*

Rychlost bloku po nárazu je určena rovnicí zachování celkové energie vyjádřenou takto:

$$\left( \frac{1}{2} J \bar{\omega}_1^2 + \frac{1}{2} M_{t1}^2 \right) \cdot f(F) \cdot SF = \frac{1}{2} J \bar{\omega}_2^2 + \frac{1}{2} M_{t2}^2 \quad (1)$$

kde:

- $R$  = poloměr bloku
- $M$  = hmotnost bloku
- $J$  = moment setrvačnosti bloku
- $\omega_1$  = úhlová rychlost před nárazem
- $\omega_2$  = úhlová rychlost po nárazem
- $V_{t1}$  = tangenciální rychlost před nárazem
- $V_{t2}$  = tangenciální rychlost po nárazu

Funkce tření  $f(F)$  je definována kce tření:

$$f(F) = SF + \frac{(1 - R_t)}{\left[ \left( \frac{V_{t1} - \bar{\omega}_1 \cdot R}{20} \right)^2 + 1.2 \right]}$$

Zatímco je definována funkce měřítka  $SF$ :

$$SF = \frac{R_t}{\left[ \left( \frac{V_{n1}}{250 \cdot R_n} \right)^2 + 1 \right]}$$

kde:

- $R_n$  = normálový restituční koeficient
- $R_t$  = tangenciální restituční koeficient
- $R$  = poloměr bloku

Výrazy  $f(F)$  a  $SF$  lze získat empirickými výrazy, které se používají k hodnocení kinetické energie rozptýlené při srážkách mezi blokem a svahem v důsledku tření a nárazu.

Tření se primárně týká rozptýlení energie produkované tangenciální rychlostí, zatímco dopad energie produkované rychlostí kolmou na sklon.

Tangenciální a úhlové po kolizní rychlosti jsou ve vztahu dle následující rovnice:

$$V_{t2} = \omega_2 \cdot R$$

což předpokládá, že bloky opouštějí kontakt se svahem rotací, bez ohledu na předchozí úhlovou rychlost. Z (1) získáme  $V_{t2}$ , zatímco normální postkolizní rychlost se získá následujícím empirickým výrazem:

$$V_{n2} = V_{n1} \cdot \frac{R_n}{\left[1 + \left(\frac{V_{n1}}{9}\right)^2\right]}$$

to bude brát v úvahu skutečnost, rovněž ověřenou experimentálně, že poměr mezi normálovými rychlostmi po dopadu a před dopadem klesá s nárůstem samotné normálové rychlosti před dopadem.

## CHARAKTERISTIKY HORNINOVÉHO BLOKU

Boulder form Sphere	
Density	2800.0 Kg/m <sup>3</sup>
Elasticity	50000000.0 kPa
Initial velocity in x	5.0 m/s
Initial velocity in y	-3.0 m/s
Terminal limit velocity	0.01 m/s
Diameter	0.6 m

### DESIGN VELOCITY OF BLOCKS

Reliability coefficient for trajectory calculation	1
Quality coefficient of slope topography discretization	1
Velocity safety coefficient	1

### DESIGN BLOCK MASS

Mass calculation coefficient	1
Survey precision coefficient	1
Survey precision coefficient	1

### DESIGN STRESSING ENERGY

Energy amplifying coefficient	1
-------------------------------	---

### BARRIERS

Safety coefficient to apply to the energy values MEL or SEL...1

Mass	316.673 Kg
Weight	316.673 Kgf
Moment of inertia	11.4 Kgxm <sup>2</sup>

### Materials list

N	Description	Coefficient normal restitution Rn	Coefficient of restitution tangential Rt	Roughness (m)	Frequency (m)	Friction angle (°)	
1	Solid rock	0.9	0.8	0			
2	Degraded rock	0.7	0.7	0			
3	Sand	0.4	0.6	0			
4	Rock detritus	0.6	0.6	0			
5	Fine debris	0.32	0.82	0			
6	Debris with vegetation	0.29	0.8	0			
7	Debris with shrubs	0.3	0.7	0			
8	Terrain or grass	0.31	0.79	0			
9	Paved surface	0.4	0.9	0			

### SLOPE DATA

N	X (m)	Y (m)	Material
1	-0.11	32.76	Terrain or grass
2	1.47	32.76	Terrain or grass
3	2.84	32.18	Terrain or grass
4	6.89	31.77	Solid rock
5	7.98	31.61	Solid rock
6	8.6	30.88	Solid rock
7	9.7	30.29	Solid rock
8	10.48	27.17	Solid rock
9	10.91	24.98	Solid rock
10	11.74	23.96	Solid rock
11	11.88	22.53	Solid rock
12	18.85	18.34	Solid rock
13	21.17	16.82	Solid rock
14	23.2	15.34	Degraded rock
15	27.79	12.27	Solid rock
16	29.04	11.65	Solid rock
17	32.1	6.0	Solid rock
18	33.6	1.9	Paved surface
19	35.8	1.9	Paved surface
20	39.7	0.0	Paved surface

**(HpMax) Maximum height, (Vmax) Maximum velocity, (Emax) Maximum energy of the boulder upon the barrier**

Descr.	Xb (m)	Yb(m)	HpMax (m)	Vmax (m/s)	Emax (KJ)
DB2	29.04	11.647	0.853	10.755	28.114

**(HpMax) Maximum height** – maximální výška bloku v místě dynamické bariéry

**(Vmax) Maximum velocity** – maximální rychlost bloku v místě dynamické bariéry

**(Emax) Maximum energy of the boulder upon the barrier** – maximální kinetická energie bloku v místě dynamické bariéry

## VÝSLEDKY

Maximum velocity	11.058 m/s
Minimum velocity	7.527 m/s
Average velocity	9.643 m/s
Mean standard deviation	1.134 m/s
<b>Maximum pre-impact energy</b>	<b>25.71 KJ</b>
Average pre-impact energy	18.904 KJ
Energy standard deviation	4.933 KJ
Average stop abscissa	28.207 m
Maximum abscissa reached	29.058 m

## ZÁVĚR

Maximální energie horninového bloku v místě bariéry dosahuje hodnoty 28,114 kJ ve výšce 0,853 m nad terénem, který dopadá rychlostí 10,755 m.s<sup>-1</sup>.