



Frane in Roccia: Approcci Integrati per la Valutazione e la Mitigazione del Rischio

Tatiana Rotonda

Analisi della fase di propagazione di frane in roccia

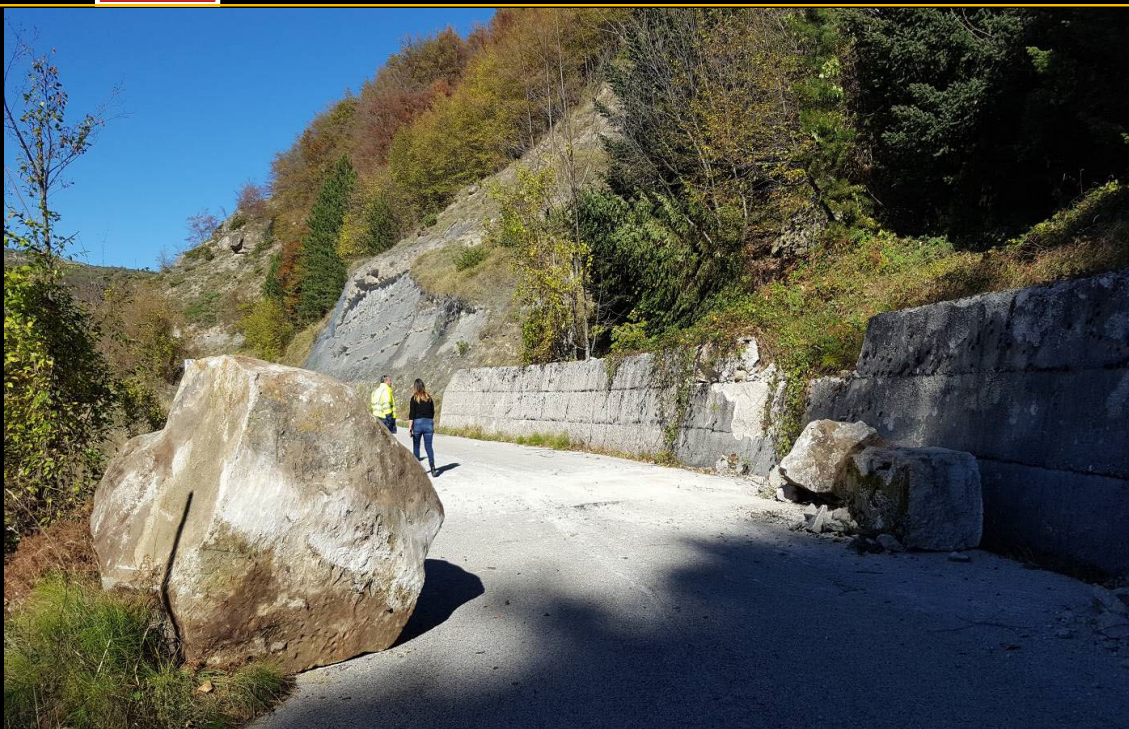
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
STRUTTURALE E GEOTECNICA



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

10 luglio 2025

Analisi della fase di propagazione di frane in roccia



Cervaro (TE),
sisma 2016

Valutazione del Rischio

PERICOLO (Hazard) x VULNERABILITA' x VALORE ESPOSTO

Pericolo (Hazard)	Probabilità che un evento (<i>occurrence probability</i>) di una certa intensità si verifichi in un dato luogo e tempo (Varnes 1984)
Vulnerabilità	Grado di danno subito da un elemento esposto in caso di evento
Valore esposto	Numero di persone, edifici, infrastrutture potenzialmente coinvolti

Iter Valutazione del Rischio (Stabilità in Roccia)





Instabilità dei versanti rocciosi

Si distinguono due fasi:

- ✓ fase di innesco: sono raggiunte condizioni limite sotto l'azione delle forze inerziali (peso proprio e sisma), spinte dell'acqua, carichi esterni
 - ✓ fase di propagazione: fase di moto
-
- due fasi: due metodi di analisi differenti
 1. fase di innesco: modelli per valutare il margine di sicurezza
 2. fase di propagazione: modelli per valutare traiettoria, energia e punto d'arresto della massa in moto

Per i diversi tipi di instabilità, entrambi gli studi, ma con attenzione all'una o all'altra fase:

- scivolamenti: fase dell'innesco (in pendii di grandi dimensioni la propagazione può verificarsi in modo continuo o con fasi alterne di quiescenza/moto (le riattivazioni si studiano con gli stessi metodi di fase dell'innesco))
- caduta massi: fase di propagazione (instabilità gravitativa)

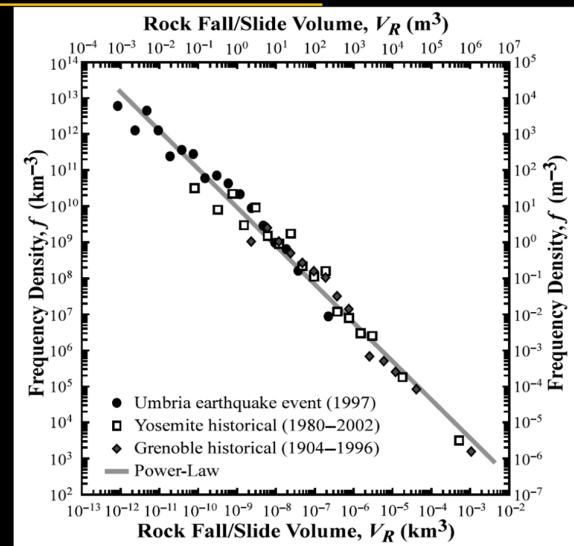


Pericolosità per caduta massi

- ✓ Pericolosità (*hazard*) per caduta massi richiede la stima di:
 1. probabilità che si verifichi il crollo
 2. probabilità che i blocchi raggiungano un certo luogo
 3. intensità dell'evento
- Pericolosità (*hazard*) per caduta massi: probabilità che una zona del pendio sia raggiunta da blocchi con una certa intensità [Jaboyedoff et al. 2005]
- Valutazione della pericolosità richiede la stima di:
 1. probabilità temporale e spaziale dell'evento
 2. traiettorie dei blocchi e punto di arresto
 3. distribuzione dell'intensità lungo il percorso

Probabilità temporale e spaziale

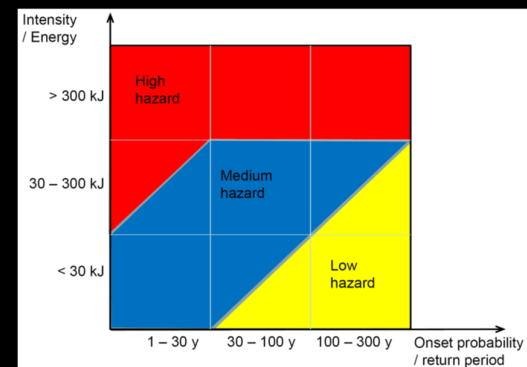
- ✓ Probabilità: frequenza misurata degli eventi avvenuti nella zona
 - rapporto tra frequenza e volume dei blocchi [Hungar 1999]:
 - volumi minori di 1 m^3 con frequenza di 50/anno
 - volumi di 10000 m^3 con frequenza di 1/10-50 anni
 - frequenza degli eventi di un certo volume V ben rappresentato da una legge logaritmica [Malamud et al 2004]
- ✓ Suscettibilità: probabilità teorica che un pendio sia affetto da un evento con una determinata frequenza



[Malamud et al 2004]

Probabilità temporale e spaziale

- ✓ Studio della pericolosità (*hazard*) per caduta massi: definire una zonazione di probabilità o suscettibilità per valutare le priorità di intervento
- ✓ Esempio di lineeguida di pericolosità per caduta massi (Svizzera)
 - basato sul tempo di ritorno (frequenza) e sulla intensità (energia cinetica)
 - trascura la probabilità di punto d'arresto e la variabilità spaziale dell'energia cinetica
 - Jaboyedoff et al (2005) propongono una carta che porta in conto la probabilità che blocchi con uno specifico periodo di ritorno raggiungano un luogo predefinito



[Raetzo et al. 2002]



Vulnerabilità e Valore Esposto per caduta blocchi

Da valutare:

- pericolo per la vita umana
- danni nelle zone abitate o sede di reti viarie e ferroviarie ed infrastrutture varie

Alla grande scala le mappe del rischio portano in conto le zone a diverso valore esposto:

- punteggi relativi ad ogni aspetto che contribuisce al rischio (altezza del pendio, dimensione tipica dei blocchi, presenza di acqua, efficacia di una trincea, tempo di reazione alla vista del crollo, etc.)



Caratteristiche dell'instabilità per caduta massi?

Instabilità per caduta massi [Ribacchi et al. 2018] quando:

- ✓ pendii ripidi
- ✓ le dimensioni dei blocchi sono piccole rispetto alle altre dimensioni che caratterizzano la geometria del pendio
- ✓ (la distribuzione dei volumi dei blocchi movimentata è spostata verso valori minori rispetto a quella dei blocchi potenzialmente instabili)
- ✓ distacchi preceduti da spostamenti molto modesti e improvvisi

Fattori contribuenti alla caduta massi

Processo di evoluzione naturale dei versanti, di azione gravitativa, le cui principali cause (predisponenti e/o innescanti):

- caratteristiche delle discontinuità: orientamento, spaziatura, resistenza, riempimento, etc..
- processi di alterazione provocati da agenti atmosferici: cicli gelo-disgelo, piogge, etc..
- disomogeneità di comportamento meccanico tra gli strati: erosione dello strato di minore qualità (tipici i casi di strato inferiore di minore qualità)
- fattori geomorfologici: pendenza del versante, altezza della parete
- fattori idrologici: erosione da parte di corsi d'acqua, circolazione di acqua nelle discontinuità

Può essere accelerato/innescato anche da:

- ✓ vibrazioni indotte da eventi sismici o da uso di esplosivo
- ✓ interventi antropici, modifiche dello stato tensionale (operazioni di scavo o applicazione di carichi)

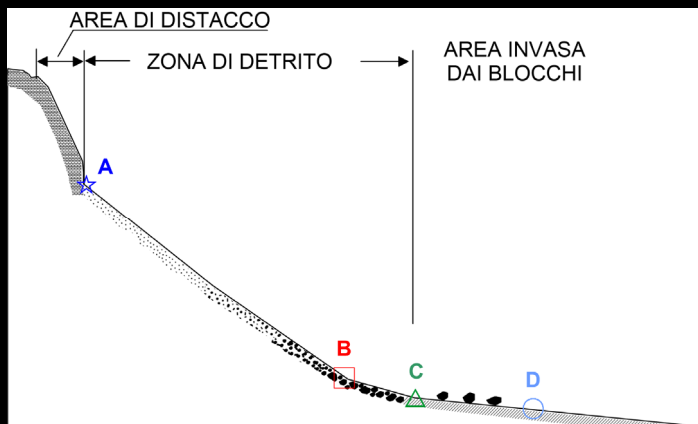
Fattori contribuenti alla caduta massi

<i>Cause of rock fall</i>	<i>Percentage of falls</i>
Rain	30
Freeze-thaw	21
Fractured rock	12
Wind	12
Snowmelt	8
Channeled runoff	7
Adverse planar fracture	5
Burrowing animals	2
Differential erosion	1
Tree roots	0.6
Springs or seeps	0.6
Wild animals	0.3
Truck vibrations	0.3
Soil decomposition	0.3

Percentuale di eventi associati a diverse cause (in assenza di eventi sismici):

- ✓ 68 % eventi associati alla acqua
- ✓ 70 % eventi avviene in inverno-primavera (ottobre-marzo) (acqua)
- ✓ acqua può essere fattore sia predisponente (gelo-disgelo, alterazione, erosione fluviale), sia innescante (spinta dell'acqua)
- ✓ 17 % eventi associati all'assetto strutturale e qualità della roccia
- ✓ 85 % eventi associati all'acqua e alle rocce

Osservazioni in sito



- tre zone: area di distacco, area di detrito, area dei blocchi
- a lungo termine si forma un pendio detritico:
 - zona sommitale (zona di detrito) A-B ($38^\circ \div 42^\circ$) con blocchi di dimensione minore
 - zona intermedia B-C ($32 \div 38^\circ$)
 - zona ai piedi C-D ($10 \div 20^\circ$) con blocchi di maggiori dimensioni

Osservazioni in sito



da osservare:

- tre zone:
alimentazione, detrito e
blocchi
- distribuzione dei volumi

Termeno (BZ)
maggio 2015

Osservazioni in sito



da osservare:

- disomogeneità tra gli strati
- interfaccia calcari-argilla
- distribuzione dei volumi blocchi caduti (zona di detrito poco acclive)

San Leo (Rimini)

Osservazioni in sito



da osservare:

- diverse nicchie di distacco
- pendio detritico, sede di precedenti cadute blocchi
- distribuzione dei volumi

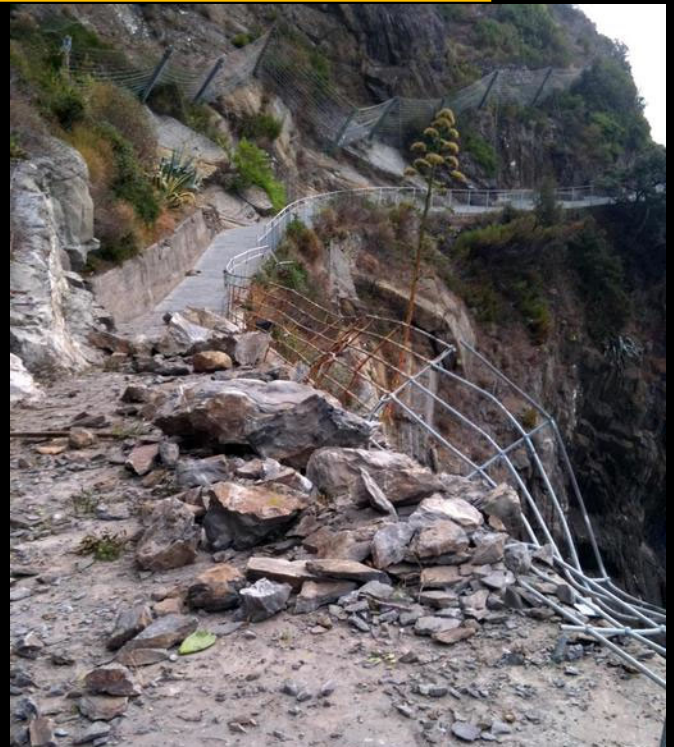
Vulcano

Osservazioni in sito

da osservare:

- orientamento piani di debolezza (scistosità)
- forma dei blocchi tabulare associata alla scistosità

sentiero Cinque Terre (Liguria)
settembre 2012



Osservazioni in sito

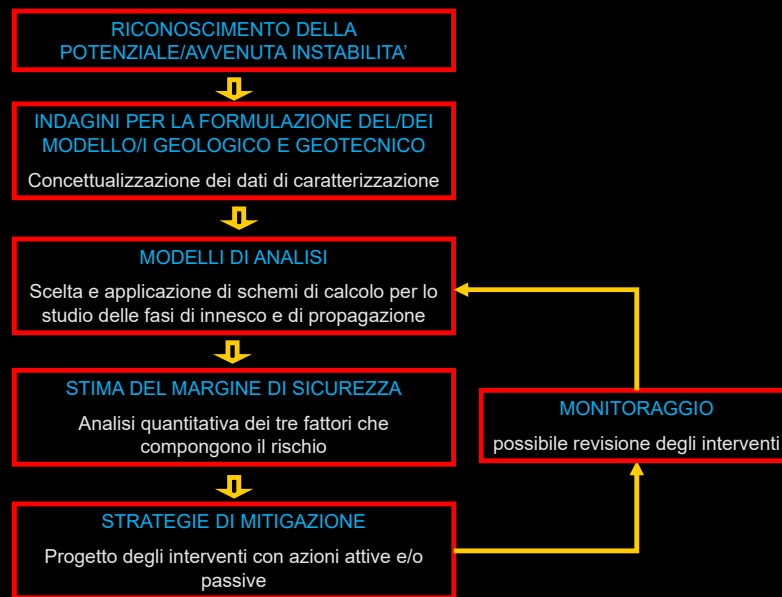


da osservare:

- orientamento discontinuità (nicchia di distacco)
- morfologia zona di detrito
- distribuzione dei volumi

Crognaleto (TE), SP45-E
Sisma 2017

Iter Valutazione del Rischio (Stabilità in Roccia)



Modelli di probabilità della traiettoria, intensità

□ Modelli analitici e numerici:

- simulazione del percorso dei blocchi (traiettorie, energia cinetica, altezza di rimbalzo)
- modelli analitici 2D
- modelli numerici 2D e 3D (es. RocFall, CRSP, RocPro, etc.)
- modellazione complessa per la difficoltà di schematizzare fenomeni dinamici, per la scelta dei parametri meccanici e geometrici
- se possibile, validazione del modello attraverso prove in sito

✓ Input:

- topografia dettagliata (DTM), proprietà meccaniche delle rocce, assetto strutturale dell'ammasso, coefficienti di restituzione all'urto

Indagini per i modelli di probabilità della traiettoria, intensità

Indagini:

- ✓ carta geologica: riconoscimento delle litologie coinvolte; grandi strutture geologiche
- ✓ rilievi strutturali: assetto e caratteristiche delle discontinuità
- ✓ sondaggi geognostici: stratigrafia e prelievo di campioni
- ✓ prove di laboratorio: caratterizzazione fisico-meccanica dei litotipi coinvolti
- ✓ fotogrammetria e Laser Scanner 3D: modelli dettagliati della morfologia; anche per assetto strutturale in zone non raggiungibili

Modelli di probabilità della traiettoria, intensità

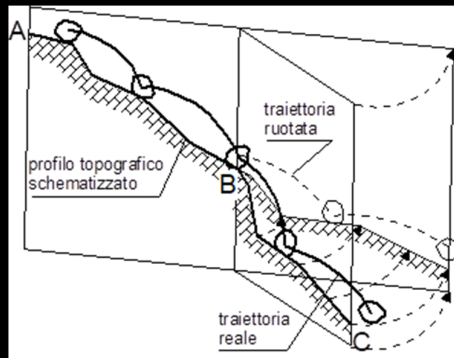
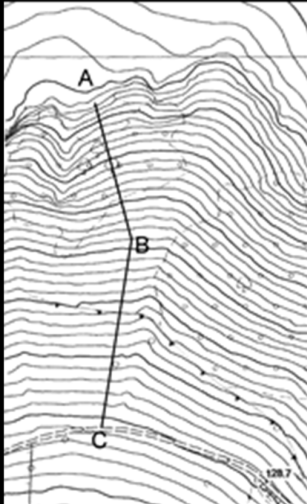
- blocco puntiforme (*lumped mass*):
 - ✓ metodo più comune
 - ✓ blocco come punto materiale (massa concentrata)
 - ✓ simulano la traiettoria come successione di eventi: rimbalzo, rotolamento, scivolamento
 - ✓ moto dipende da parametri, quali: coefficienti di restituzione normali e tangenziali (per l'energia dissipata all'impatto), coefficienti di attrito
 - ✓ approccio spesso (sempre) integrato con analisi statistiche (incertezza dei parametri)
 - ✓ analisi 2D e 3D
- blocco con forma e massa (modelli a corpo rigido):
 - ✓ includono forma (sezione circolare, ellittica, etc) e dimensioni del blocco, nonché la rotazione durante il moto
 - ✓ simulano in modo più realistico rimbalzo, rotolamento, scivolamento
 - ✓ analisi 2D e 3D

Modelli di probabilità della traiettoria, intensità

Modelli 2D :

- ✓ forniscono una più accurata descrizione della traiettoria, ovvero del punto di arresto, e della distribuzione dell'energia cinetica
- ✓ per contro, trascurano la vera geometria e gli effetti dinamici della reale morfologia 3D

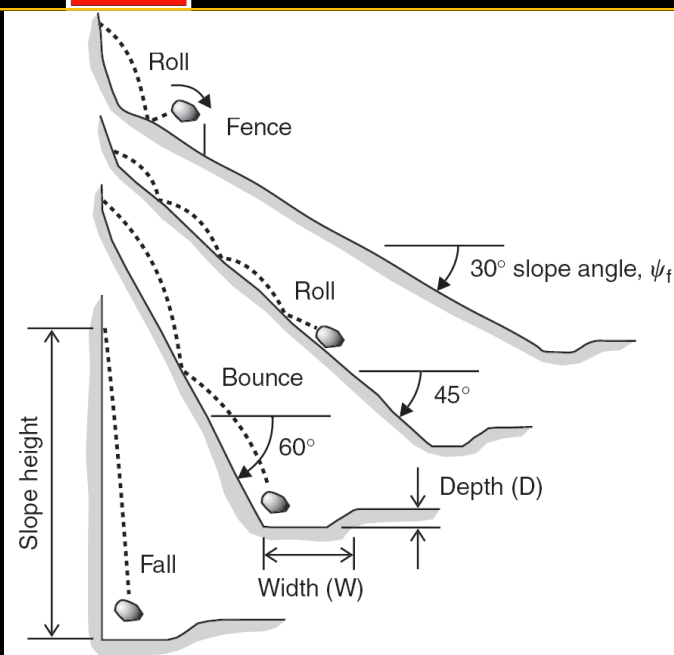
Planimetria



[Bozzolo et al. 1988]

- ✓ analisi frequente in campo bidimensionale: spezzata tridimensionale sulla planimetria + correzione su una sezione piana (tratteggio in figura)
- ✓ profilo semplificato ottenuto congiungendo i punti topografici lungo una spezzata a gradiente massimo

Modelli di previsione della traiettoria. Equazione del moto

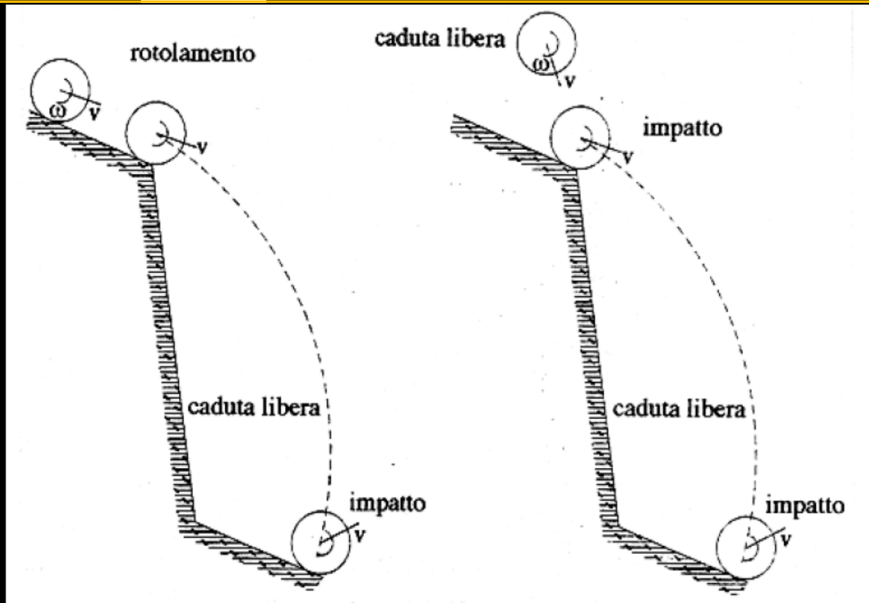


[Ritchie 1963 (carta per il dimensionamento di una trincea)]

Dopo il distacco il moto dei blocchi è caratterizzato (in dipendenza dell'angolo di inclinazione del pendio e della resistenza attrittiva offerta dal blocco) da una sequenza delle seguenti fasi [Ribacchi et al. 2018]:

- volo
- impatto con il suolo
- rotolamento
- scivolamento

Equazioni del moto



✓ blocco caratterizzato da velocità lineare e velocità angolare

✓ traiettoria calcolata separatamente per le componenti elementari del moto:

- volo
- impatto
- roto-scivolamento

Equazioni del moto

Equazioni della dinamica per un generico blocco di massa m :

$$m\vec{a}_g = m\vec{g}$$

1. secondo principio della dinamica (a_g accelerazione del baricentro)

$$\vec{M}_g^{(e)} = \frac{d\vec{P}}{dt}$$

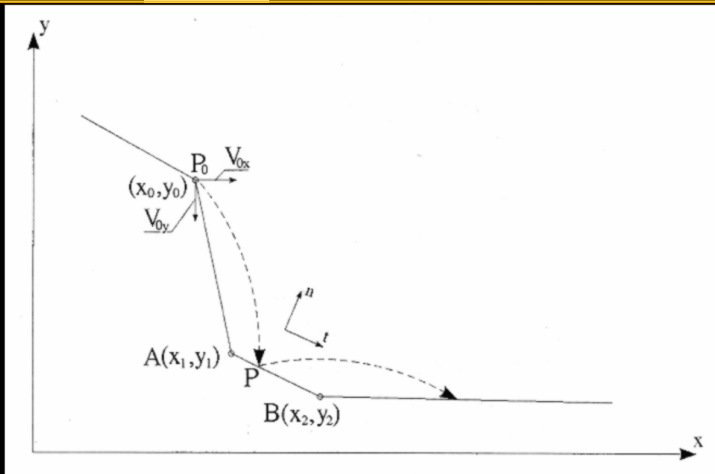
2. equazione della dinamica rotazionale; bilancio del momento della quantità di moto, ovvero del momento angolare di un corpo rigido in rotazione:

$M_g^{(e)}$ momento quantità di moto forze esterne (e) sul baricentro

=

momento della quantità di moto P (massa x velocità) forze interne

Equazioni del moto. Fase di volo



- si verifica al distacco o dopo un impatto con il terreno
- si trascura la resistenza dell'aria
- condizioni iniziali punto P_0 : accelerazione di gravità g , accelerazione orizzontale nulla

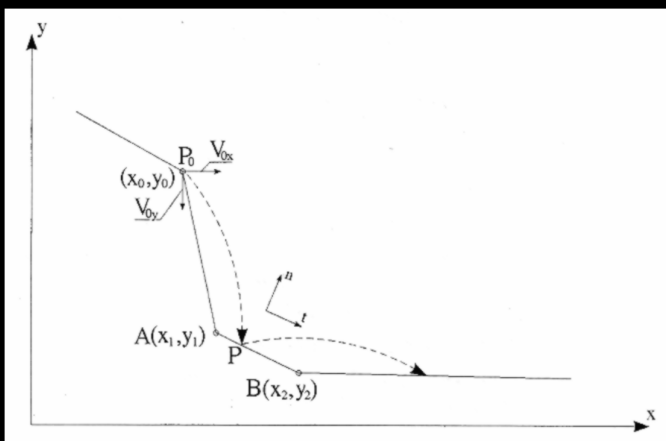
- per un punto materiale (*lumped mass*) e in condizioni piane si ricava per integrazioni successive la traiettoria balistica :

$$\begin{array}{l} a_x = 0 \\ a_y = -g \end{array} \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} v_x = v_{x0} \\ v_y = -gt + v_{y0} \end{array} \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} x = v_{x0}t + x_0 \\ y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0 \end{array}$$

Equazioni del moto. Fase di volo

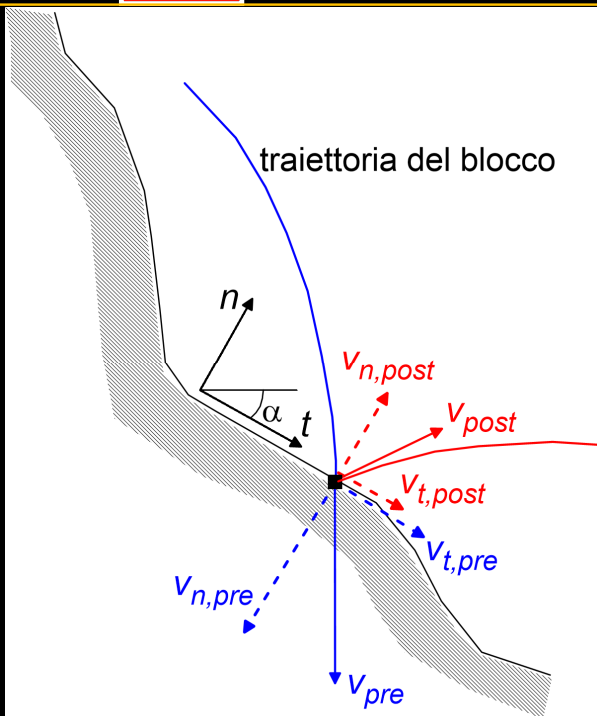
- si ricava il tempo t dalla prima equazione e si sostituisce alla seconda equazione, ricavando la traiettoria da P_0 in fase di volo:

$$\begin{array}{l} x = v_{x0}t + x_0 \\ y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0 \end{array} \quad \Rightarrow \quad y = -\frac{1}{2}g \frac{(x - x_0)^2}{v_{x0}^2} + (x - x_0) \frac{v_{y0}}{v_{x0}} + y_0$$



- equazione della traiettoria da P_0 (fase di volo) messa a sistema con la geometria del pendio (tratto A-B)
- si ricava la coordinata di P del punto di impatto
- si passa dal sistema di riferimento globale (x, y) al sistema di riferimento locale (n, t) nel tratto A-B
- si ricava il vettore velocità all'impatto v_{pre} nel sistema di riferimento locale

Equazioni del moto. Fase di impatto



- è noto v_{pre} dalla fase precedente
- durante l'urto energia cinetica traslazionale può trasformarsi in energia cinetica rotazionale e viceversa (bilancio dei momenti lineari ed angolari)
- si ricava il vettore velocità post-impatto v_{post} dall'assunzione di coefficienti di restituzione:
 - K_n coefficiente di restituzione all'urto normale
 - K_s coefficiente di restituzione all'urto trasversale

$$K_n = \frac{v_{n,post}}{v_{n,pre}}$$

$$K_t = \frac{v_{t,post}}{v_{t,pre}}$$

Equazioni del moto. Fase di impatto

Valori tipici dei coefficienti di restituzione all'urto [Hoek 1987]:

Tipo di superficie:	K_n	K_t
roccia compatta	0,53	0,99
strada asfaltata	0,40	0,90
versante roccioso con grossi blocchi	0,35	0,85
terreno di copertura	0,32	0,82
terreno di copertura con vegetazione	0,32	0,80
terreno soffice con poca vegetazione	0,30	0,80

- la fase di impatto riduce la velocità, e, di conseguenza, l'altezza di rimbalzo e l'energia
- si succedono fasi di volo e impatto con punti di impatto sempre più ravvicinati, finché si verifica $v_{n,post} \cong 0$

Equazioni del moto. Fase di scivolamento e/o rotolamento

- per $v_{n,post} \cong 0$ il moto è di tipo scivolamento e/o rotolamento
- il moto è tipicamente misto (raro che il blocco proceda con solo uno dei due moti)
- schema : blocchi rigidi che scivolano o rotolano su superfici piane:

$$m\vec{a}_g = m\vec{g} + \vec{r} \quad r, \text{ reazioni vincolari}$$

- equazioni del moto per un punto materiale in condizioni piane (per integrazioni successive):

$$a_t = g \cos \alpha (tg\alpha - tg\phi)$$

$$v_t = g \cos \alpha (tg\alpha - tg\phi)t + v_{t0}$$

$$x_t = \frac{1}{2} g \cos \alpha (tg\alpha - tg\phi)t^2 + v_{t0}t + x_{t0}$$

α = inclinazione del tratto, $tg\phi$ = coefficiente d'attrito al roto-scivolamento (si adotta un unico coefficiente per un moto eterogeneo caratterizzato da rotolamento, scivolamento)

- ✓ se $\alpha > \phi$, moto uniforme accelerato (no stop)
- ✓ se $\alpha < \phi$, moto decelerato fino a $v_t = 0$

Equazioni del moto. Fase di scivolamento e/o rotolamento

Coefficienti di restituzione all'urto e angolo di attrito da analisi a ritroso [Crosta & Agliardi 2003]:

Terrain class	e_n	range	e_t	range	$\tan(\Phi)$	range
Outcropping limestone, forested	0.60	± 0.0300	0.75	± 0.0375	0.50	± 0.0250
Outcropping limestone, bare	0.65	± 0.0325	0.85	± 0.0425	0.40	± 0.0200
Subcropping limestone, forested	0.50	± 0.0250	0.60	± 0.0300	0.55	± 0.0200
Subcropping limestone, non forested	0.60	± 0.0300	0.75	± 0.0375	0.40	± 0.0275
Glaciofluvial deposit, forested	0.30	± 0.0150	0.65	± 0.0325	0.75	± 0.0375
Glaciofluvial deposit, non forested	0.30	± 0.0150	0.70	± 0.0350	0.60	± 0.0300
Glacial deposit, forested	0.25	± 0.0125	0.55	± 0.0275	0.70	± 0.0350
Glacial deposit, non forested	0.25	± 0.0125	0.65	± 0.0325	0.65	± 0.0325
Talus, forested	0.35	± 0.0175	0.70	± 0.0350	0.55	± 0.0275
Talus, bush covered	0.35	± 0.0175	0.75	± 0.0375	0.50	± 0.0250
Talus, bare	0.35	± 0.0175	0.70	± 0.0350	0.65	± 0.0325
Cemented talus, forested	0.45	± 0.0225	0.65	± 0.0325	0.50	± 0.0250
Cemented talus, bare	0.50	± 0.0250	0.70	± 0.0350	0.45	± 0.0225

- coefficienti che tengono in conto in modo combinato la litologia e l'uso del terreno

Equazioni del moto. Energia cinetica

- energia cinetica totale del blocco rigido si ricava dalle velocità traslazionale e angolare:

$$K_c = \frac{1}{2} m (v_x^2 + v_y^2) + \frac{1}{2} I \omega$$

$$I = \frac{2}{3} m r^2 \quad (\text{blocco circolare})$$

- I , momento di inerzia dipende dalla forma del blocco (circolare, prismatico, etc.)
- nel metodo *lumped-mass* il blocco ha massa unitaria; dall'energia cinetica traslazionale si ricava la massa ammissibile
- ✓ scelta della barriera: individua la massa ammissibile e l'altezza massima
- ✓ (massa ammissibile sulla base dell'energia cinetica massima dell'opera di difesa)

Modelli numerici per la probabilità della traiettoria, intensità

[Volkwein et al. 2011] propongono una tabella riassuntiva dei più diffusi modelli numerici

- RocFall (Rocscience):
 - ✓ versione 2D (RocFall2, metodo *lumped-mass*) e 3D (RocFall3, metodo a corpo rigido)
 - ✓ analisi statistica, progettazione di barriere e visualizzazione dettagliata delle traiettorie, energie e altezze di rimbalzo
 - ✓ codice più diffuso
- ROTOMAP (Geo&Soft Int):
 - ✓ morfologia (DTM) trasformata in griglia regolare 3D
 - ✓ approccio statistico e modello fisico-probabilistico
 - ✓ analisi a ritroso per raffinare i parametri iniziali
 - ✓ mappe di densità delle traiettorie, progettazione di barriere

Modelli numerici per la probabilità della traiettoria, intensità

- RocPro3D:
 - ✓ formulazione ibrida "lumped-mass" che integra gli effetti di rotazione dei blocchi (energia traslazionale e rotazionale)
 - ✓ analisi dettagliate delle traiettorie e statistiche per il dimensionamento delle protezioni
- CRSP (Colorado Rockfall Simulation Program):
 - ✓ modello storico in campo 2D e 3D
 - ✓ corpo rigido con una forma specifica (sferica, cilindrica, o poligonale) che include la rotazione dei blocchi
 - ✓ utilizza il Metodo degli Elementi Discreti (DEM) per modellare l'interazione dinamica tra il blocco e il pendio

Analisi a ritroso di un caso reale



Crognaleto (TE)

- banco di arenaria, sovrastante ammasso marnoso
- sisma 2017 ha causato una caduta blocchi che ha interessato la SP45-E
- ✓ blocco di analisi: 65 m³, 162500 kg
- ✓ analisi di risposta sismica locale in campo 2D (Quad4M)
- ✓ PGV (*peak ground velocity*) applicata nelle simulazioni di caduta blocchi
- ✓ analisi RocFall2D e RocPro3D

Analisi a ritroso di un caso reale

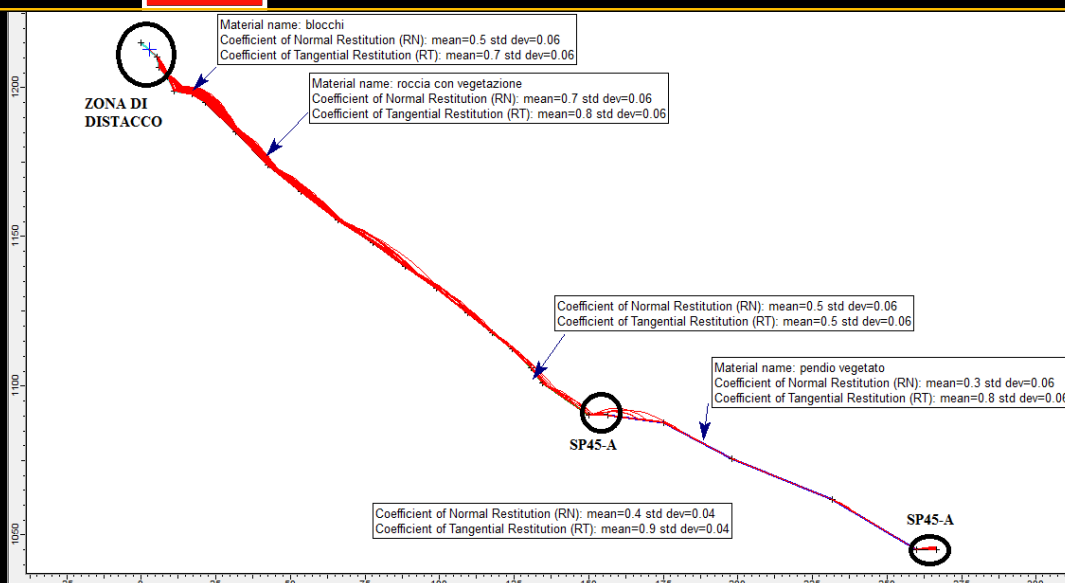


zona di distacco

- ✓ blocchi separati dall'ammasso
- ✓ strato di contatto arenaria-marna sottoposto ad erosione



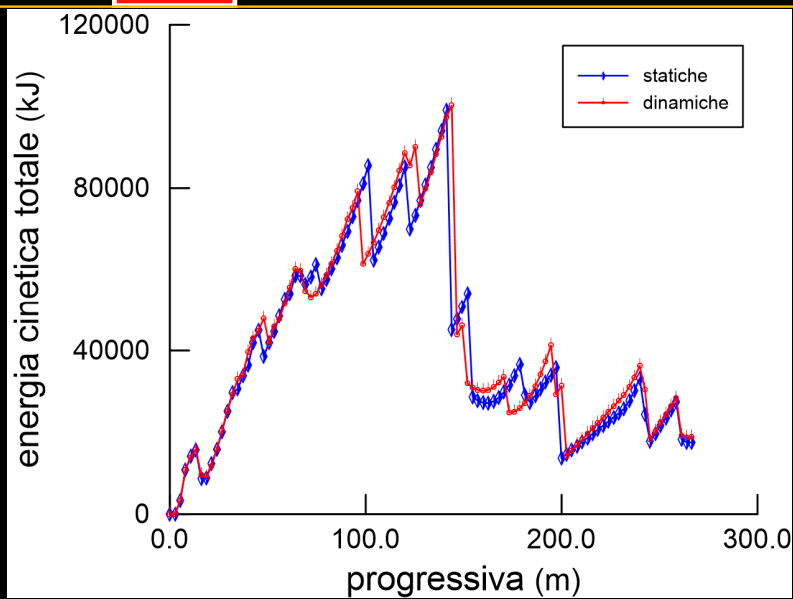
Codice RocFall2D. Traiettorie



traiettoria 100 lanci
(condizioni statiche)

- ✓ differenze tra condizioni statiche e dinamiche modeste

Codice RocFall2D. Energia cinetica



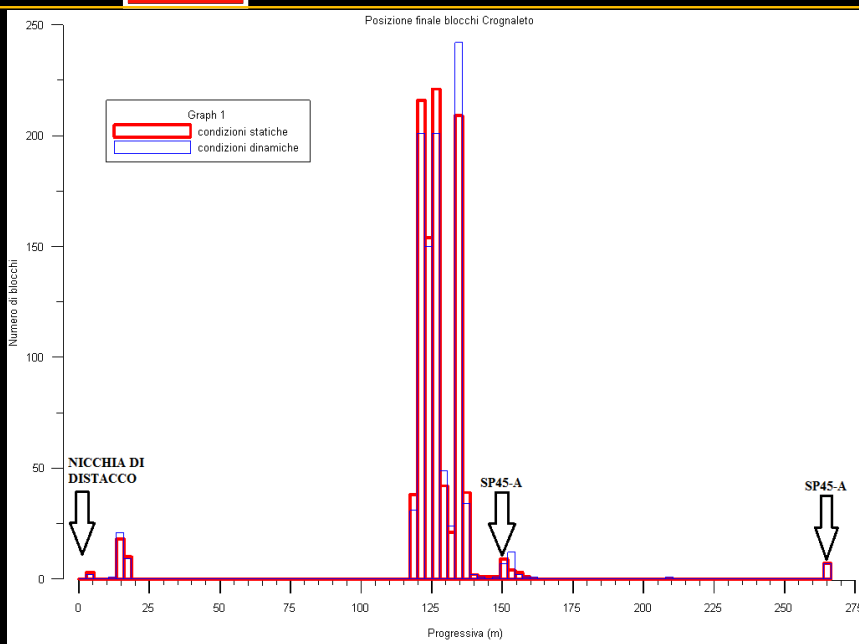
- energia cinetica del blocco rigido (per unità di massa) si ricava dalle velocità:

$$K_c = \frac{1}{2}(v_x^2 + v_y^2)$$

- ad ogni impatto si riduce l'energia

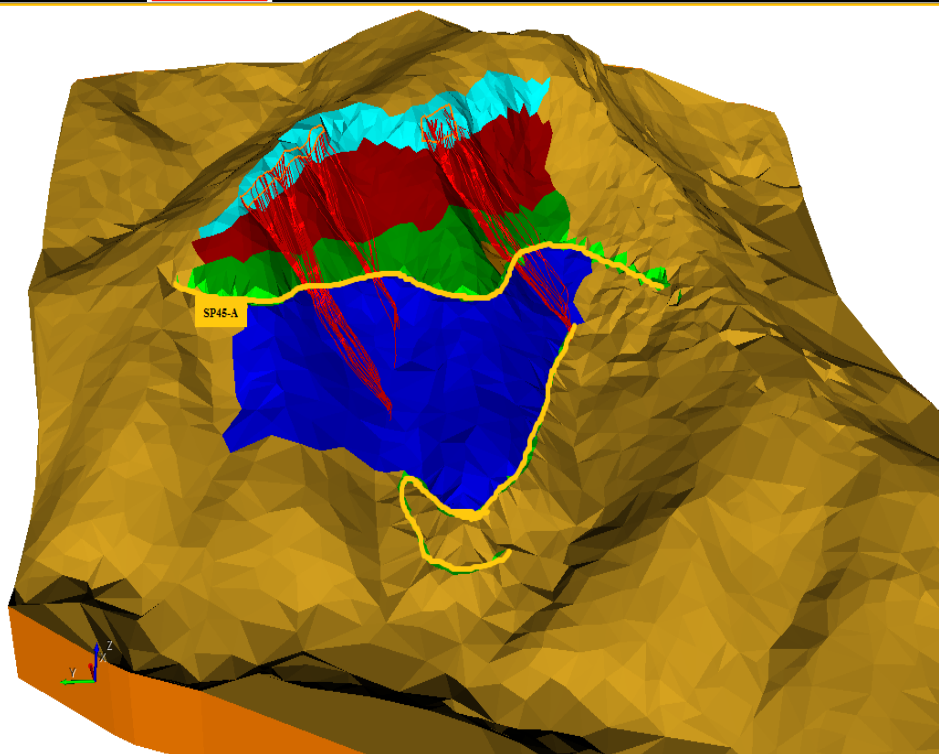
- ✓ differenze tra condizioni statiche e dinamiche modeste
- ✓ energia cinetica massima 100 MJ (ma localizzata sul pendio; non raggiunge la SP45- E)

Codice RocFall2D. Punto d'arresto



- un modesto numero di blocchi raggiunge la progressiva della SP45-A
- modesta energia a quella progressiva, ma superiore ai valori tipici delle barriere

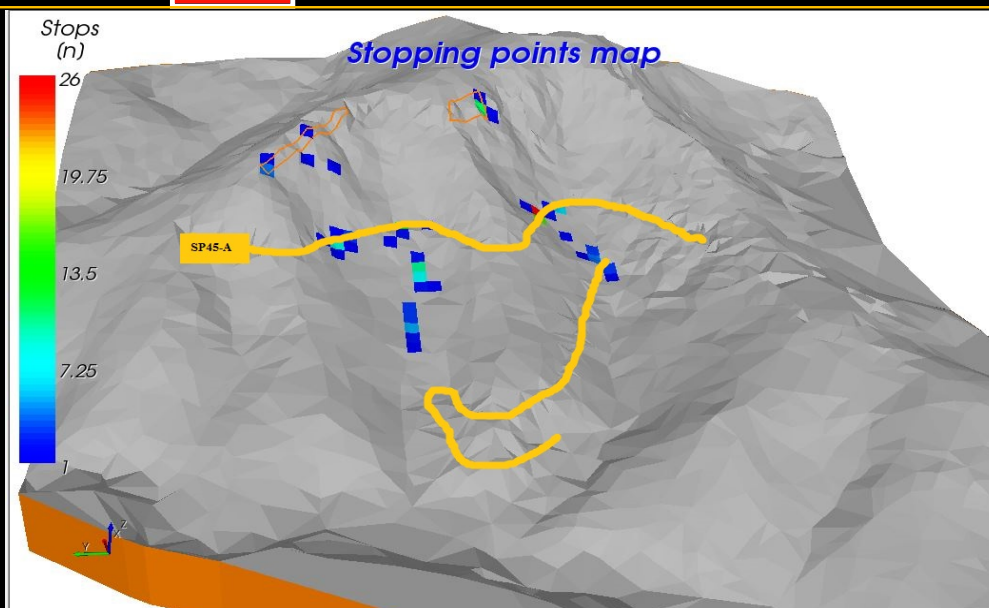
Codice RocPro3D. Traiettorie



- codice RocPro3D (modello blocchi rigidi)
- blocco di analisi: 65 m³, 162500 kg
- analisi in condizioni statiche e dinamiche (risultati non dissimili)
- traiettorie concordi con i percorsi individuati

analisi statica

Codice RocPro3D. Punti di sosta



Si ringrazia l'Ing. Valerio Sabatini

Grazie per l'attenzione



Bibliografia

- Bozzolo D., Pamini R., Hutter K. (1988). Rockfall analysis - a mathematical model and its test with field data. *5th Int. Symp. on Landslides*, Lausanne, 1, 555-560
- Crosta G.B., Agliardi F. (2003). A methodology for physically based rockfall hazard assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, 407-422
- Hoek E. (1987). General two dimensional slope stability analysis. In *Analytical & Computational Methods in Engineering Rock Mechanics*, E.T. Brown ed., Allen and Unwin, London, 95-128
- Hungr O., Evans G., Bovis M., Hutchinson J.N. (2001). Review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geosciences*, 7, 221-238
- Hungr O., Evans S.G. (1988). Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. *5th Int. Symp. on Landslides*, Lausanne, 1, 685-690
- Jaboyedoff M., Dudt J.P., Labiouse V. (2005). An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5, 621-632
- Malamud B.D., Turcotte D.L., Guzzetti F., Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687-711
- Ribacchi R., Rotonda T., Graziani A., Boldini D., Tommasi P., Lembo-Fazio A. (2018). *Meccanica delle Rocce. Dalla Teoria alle Applicazioni nell'Ingegneria*. Efesto Edizioni, 467 pp
- Raetzo H., Lateltin O., Bollinger D., Tripet J. (2002). Hazard assessment in Switzerland – Code of practice for mass movements. *B. Eng. Geol. Environ.*, 61, 263-268
- Ritchie A.M. (1963). Evaluation of rockfall and its control. *Highway Research Record*, 17, 13-28
- Volkwein A., Schellenberg K., Labiouse V., Agliardi F., Berger F., Bourrier F., Dorren L.K.A. Gerber W., Jaboyedoff M. (2011). Rockfall characterisation and structural protection—a review. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11(9), 2617-2651
- Wang Y., Tonon F. (2011). Discrete element modeling of rock fragmentation upon impact in rock fall analysis. *Rock. Mech. Rock Engng.*, 44, 23-35.
- Wyllie D., Mah C.W. (2005). *Rock Slope Engineering*. Spon Press. Taylor & Francis