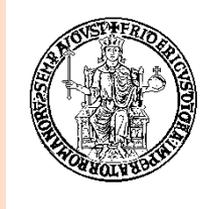


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE EDILE E AMBIENTALE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE ED IL TERRITORIO  
(CLASSE DELLE LAUREE IN INGEGNERIA CIVILE ED AMBIENTALE CLASSE N.L-7)

ELABORATO DI LAUREA

**LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO DA CROLLI DI ROCCIA  
LUNGO LE STRADE CON METODI QUALITATIVI**

**RELATORE**

PROF. PAOLO BUDETTA

**CANDIDATO**

MARIA CRISPINO  
N49/307

ANNO ACCADEMICO 2014-2015



# OBIETTIVI DELLA TESI

- ❖ Definire la pericolosità ed il rischio per le vie di comunicazione derivanti dalla caduta massi;
- ❖ Analizzare i metodi per la stima del rischio sia qualitativi che quantitativi, e definirne vantaggi e svantaggi;
- ❖ Porre l'attenzione su due metodi qualitativi (il *Rockfall Hazard Rating System* e il *modified Rockfall Hazard Rating System*) e valutarne i risultati in un caso ;



# IL FENOMENO DI CADUTA MASSI

Il distacco dei massi è dovuto a:

- Cause naturali;
- Cause artificiali;

Esso è condizionato :

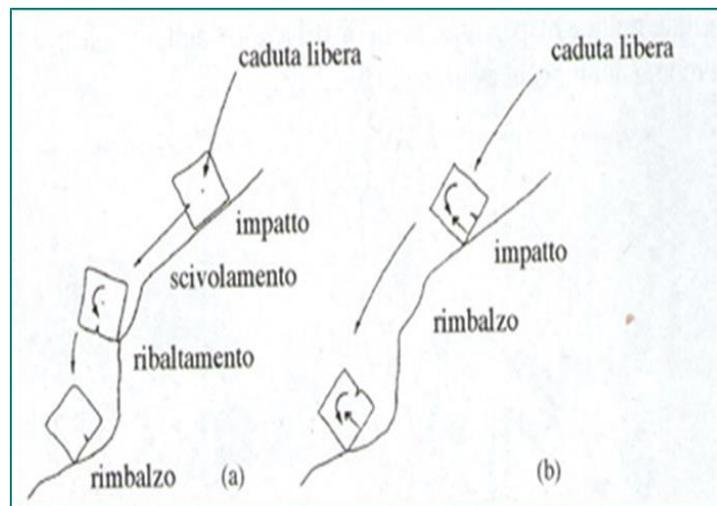
- Dalla geometria del versante;
- Dal volume e dalla forma dei massi;
- Dall'assetto geostrutturale degli ammassi rocciosi;



Distinguiamo fenomeni di:

- Caduta libera;
- Rotolamento;
- Scivolamento;
- Rototraslazione;

Sono possibili combinazioni diverse dei moti precedenti.



# INTERAZIONI TRA MASSI E VEICOLI

- 1) Impatto diretto di un masso su un veicolo in movimento;
- 2) Impatto di un veicolo in movimento su di un masso precedentemente arrestatosi sulla carreggiata;
- 3) Impatto di un masso su una fila di veicoli fermi.

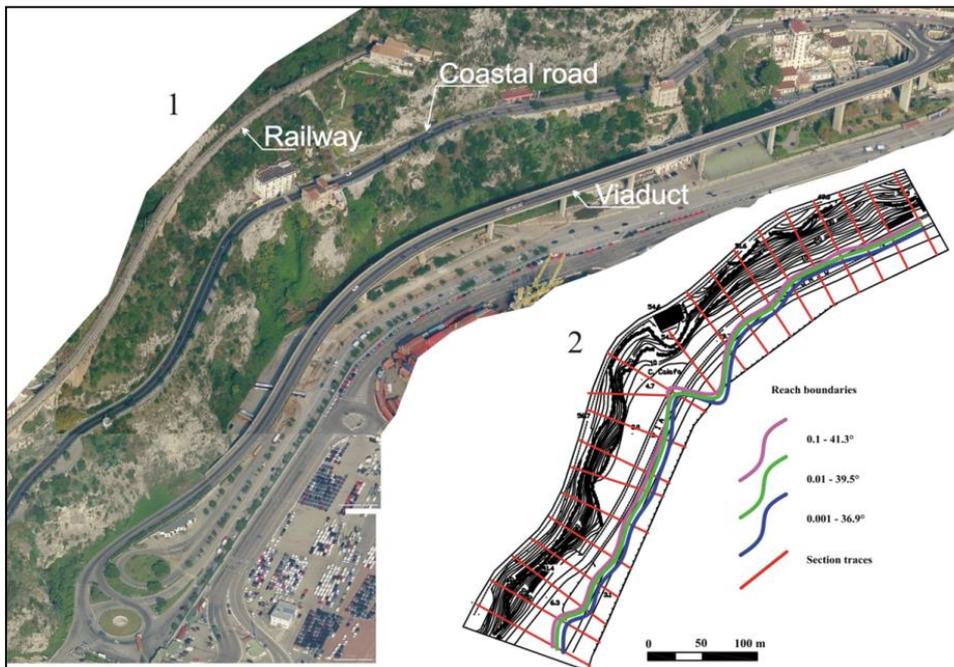
In tutte e tre queste situazioni, il tempo di esposizione al pericolo assume una notevole rilevanza; è altresì evidente che nel caso di una fila di veicoli in sosta la condizione di pericolo, in funzione del tempo, aumenta notevolmente.



# INTERAZIONI TRA MASSI E VEICOLI

I parametri del traffico che influenzano la valutazione del rischio dipendono da:

- Velocità, distanza di visibilità, geometria della sede stradale, condizioni di visibilità esistenti al momento del crollo;
- Dimensioni e tipo di veicolo, posizione dei passeggeri nel veicolo;
- Intensità del traffico in transito, fattori stagionali ed orari.



Esempio di un versante in roccia, instabile, percorso da molteplici infrastrutture di trasporto (ferrovia, strada ad elevato traffico, viadotto) ed interessato al piede da un parcheggio e da un'infrastruttura portuale.

# CONCETTI DI BASE SU PERICOLOSITÀ E RISCHIO DA FRANA

**Pericolosità:** “probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo di determinata intensità si verifichi in un dato periodo di tempo ed in una data area”;

In termini quantitativi, la pericolosità è data da:

$$H=f(I;F)$$

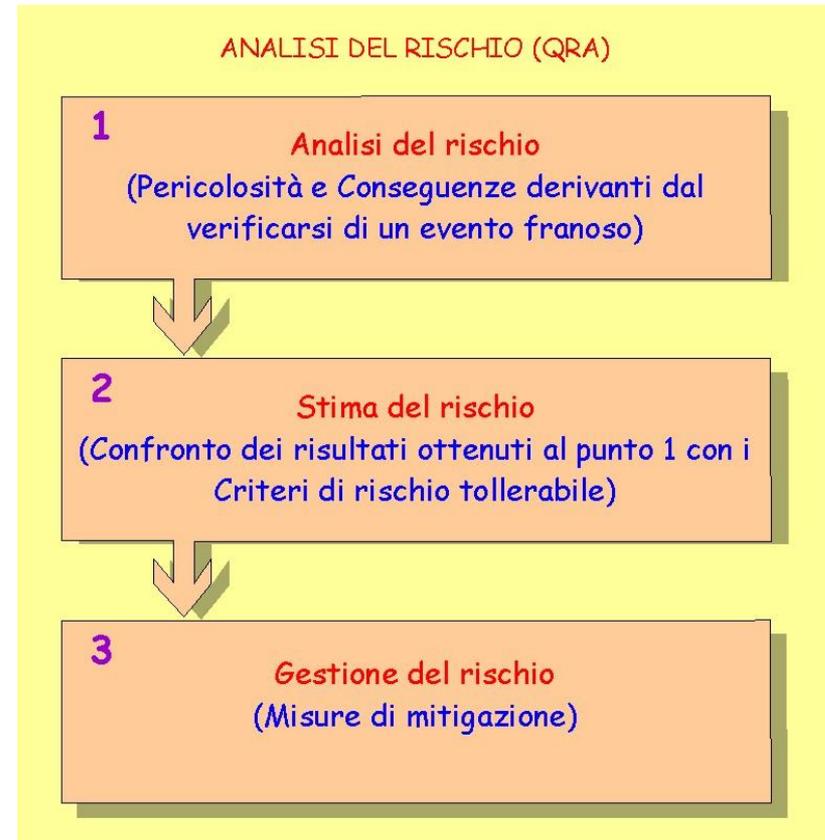
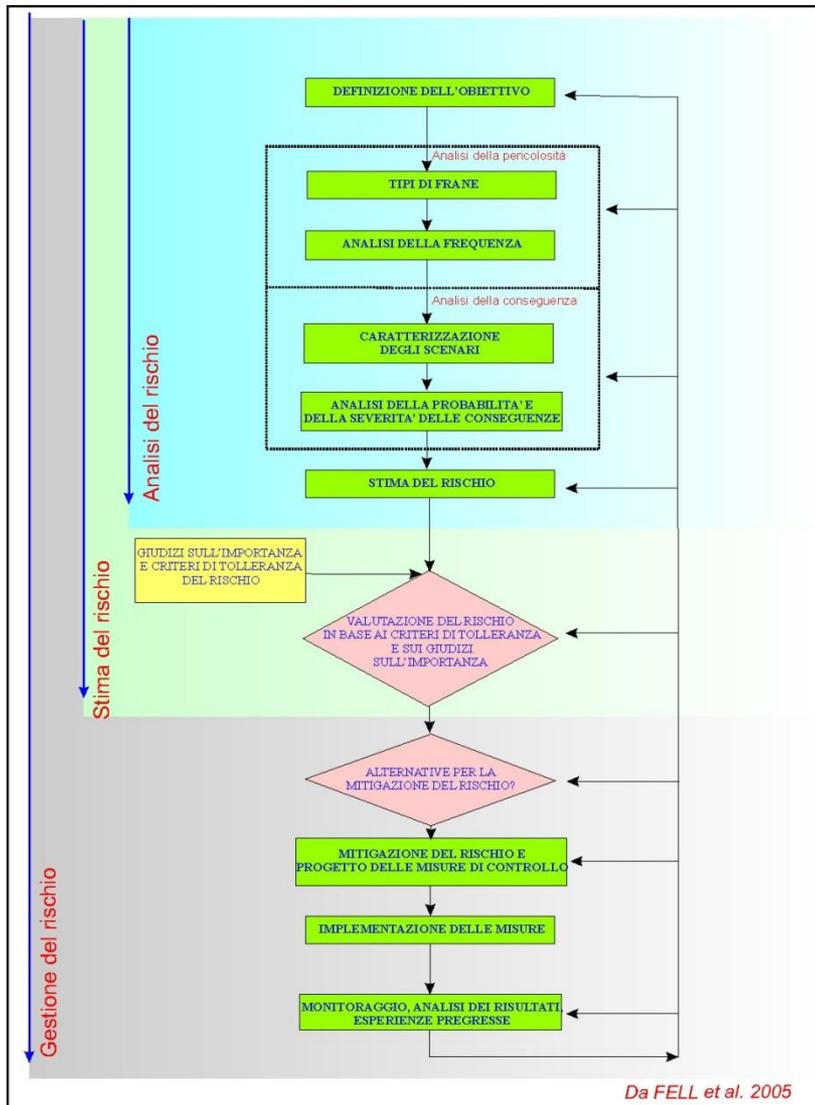
dove: H = pericolosità (*hazard*), I = intensità del fenomeno franoso, e F = frequenza di accadimento.

La valutazione quantitativa del **Rischio** comporta l'utilizzo di formule che tengano conto della pericolosità e delle conseguenze dell'evento su eventuali elementi a rischio:

$$RS=H \times ES \times V = Pi \times V \quad R=RS \times W = Pi \times WL$$

dove: R = rischio totale; RS = rischio specifico; H = pericolosità; ES = esposizione al rischio degli elementi a rischio; V = vulnerabilità; Pi = probabilità di impatto = H×ES; W = valore degli elementi a rischio; WL = danno potenziale.

# PROCEDURA PER L'ANALISI E LA STIMA DEL RISCHIO



# METODI PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO

Diversi metodi quantitativi, sono stati proposti per lo studio delle possibili interazioni tra massi e sedi stradali:

- Bunce et al. (1997);
- Hungr et al. (1999);
- Analisi dell'albero degli eventi (Budetta 2002; 2015);
- Metodo della distribuzione binomiale (Peila e Guardini 2008);

Gli approcci statistici del rischio sono complessi e richiedono l'uso di cataloghi dettagliati degli eventi franosi, i quali sono spesso incompleti a causa della mancata registrazione dei crolli da parte dei Gestori delle strade.

In questi casi, elaborazioni statistiche sono impossibili ed è più opportuno ricorrere a metodi di indicizzazione delle cause (**Metodi qualitativi**).



# I METODI QUALITATIVI

L'analisi qualitativa implica l'acquisizione di dati sugli elementi a rischio e sulla loro vulnerabilità ed esprime queste conoscenze come attributi ordinati, attraverso un metodo di valutazione basato su un sistema a “punteggi” (“*ratings*”).

- Nella maggior parte dei casi è basata su un approccio **euristico**, nel quale l'esperienza degli operatori assume un'importanza rilevante.
- Come tutti i metodi euristici (basati su punteggi e pesi), anche questi metodi, applicati alle strade, hanno caratteri di **soggettività**.
- I vantaggi sono da ricercarsi nella possibilità di valutare il livello di rischio lungo tratti stradali estesi e laddove i metodi quantitativi non sono proponibili (per carenza di dati).
- Sono propedeutici all'applicazione di altri metodi per la valutazione della pericolosità (es: verifiche di stabilità con metodi probabilistici e/o deterministici).
- Il rischio viene espresso con un punteggio finale, somma dei punteggi attribuiti ad una serie di fattori (naturali ed antropici).



# Principali metodi di valutazione qualitativi del rischio di crollo sulle strade.

Metodo	Paese di origine (Stato)	Applicazione**	Rischio <sup>a,b</sup>
HRHRS*	USA (OR)	R	$\Sigma f_h + f_d + \Sigma f_c$
SSRS*	USA (VA)	R	$\Sigma f_h + f_d + \Sigma f_c$
<b>RHRS*</b>	<b>USA (OR)</b>	<b>R</b>	<b><math>\Sigma f_h + f_d + \Sigma f_c</math></b>
RHRON	Canada	R	$(\Sigma f_m + \Sigma f_h + \Sigma f_d + \Sigma f_c)/4$
NPCSS	Cina	R/S/E	$\Sigma f_h \times \Sigma f_c$
USMS*	USA (WA)	R/S/E	$f_{(m+d)} + \Sigma f_c$
USRS*	USA (OR)	R/S	$(f_{(m+h)} + \Sigma f_c) \times f_r \times f_{hw}$
TRHRS*	USA (TN)	R	$\Sigma f_h + f_d + \Sigma f_c$
HiSIMS*	USA (TN)	R/S	$f_d + \Sigma f_c$
MORFH-RS	USA (MO)	R	$[\Sigma f_h + (f_d + \Sigma f_c)]/2$
<b>mRHRS*</b>	<b>Italia</b>	<b>R</b>	<b><math>f_m + \Sigma f_h + f_d + \Sigma f_c</math></b>
RHCMS*	USA (MT)	R	$\Sigma f_h + f_d + \Sigma f_c$
RCSA	Spagna	R	$\Sigma f_h \times (\Sigma f_c + f_{hw})$
RHRM*	USA (OH)	R	$f_m + \Sigma f_h + f_d + \Sigma f_c$
LHRS*	USA (OH)	R/S	$\Sigma f_c$
RSRP*	USA (NY)	R	$(\Sigma f_h) \times f_d \times f_c$
UDOT-RHRS*	USA (UT)	R	$(\Sigma f_h) \times f_d \times f_c$
<b>CRHRS*</b>	<b>USA (CO)</b>	<b>R</b>	<b><math>f_m + \Sigma f_h + f_d + \Sigma f_c</math></b>

(\*) Utilizza un sistema di punteggio esponenziale in base 3 (es.: 3, 9, 27, 81 o 1, 3, 9, 27, 81).

(\*\*) R: scarpate in roccia; S: scarpate in terreno; E: rilevati.

(a)  $f_h$ ,  $f_d$ ,  $f_c$ ,  $f_m$ ,  $f_r$  e  $f_{hw}$  fattori correlati alla pericolosità ( $h$ ), all'efficacia del vallo paramassi ( $d$ ), alle conseguenze di una possibile rottura della scarpata ( $c$ ), alla magnitudo dell'evento ( $m$ ), ai costi di ripristino ( $r$ ) ed alla classe di appartenenza della strada ( $hw$ ).

(b) I simboli al pedice (es.:  $f_{m+h}$ ) indicano che due categorie sono combinate in un unico fattore.



# PERICOLOSITÀ

La rottura di un ammasso roccioso è sempre imputabile alla presenza di discontinuità (stratigrafiche e/o tettoniche) di diversa grandezza.

Table 2 Failure types considered by the existing qualitative landslide risk assessment systems

System <sup>a</sup>	Slides		Toppling	Falls		Not specified
	Planar	Wedge		Differential weathering	Raveling	
RHRS				×		×
RHRON	× <sup>b</sup>			×	×	
NPCs	×	×	×		×	
TRHRS	×	×	×	×	×	
mRHRS <sup>c</sup>	×	×	×			
RHCMS				×		×
LHRS				×		×
CRHRS	× <sup>b</sup>			×	×	

The Varnes (1978) landslide classification has been adopted

<sup>a</sup> In the HRHRS, SSRS, USMS, USRS, HiSIMS, MORFH-RS, RCSA, RHRM, RSRP and UDOT-RHRS the failure type of highway geotechnical assets is not specified

<sup>b</sup> Discontinuity related factors are used; however, the failure type is not evident

<sup>c</sup> The SMR (Romana 1991) system is used. Therefore, the mRHRS deals with the same failure types

Nella maggior parte dei casi, non viene specificato il tipo di rottura possibile, per esempio se si tratti di una rottura planare, di una rottura a cuneo, un ribaltamento, etc.; inoltre, spesso le condizioni dell'ammasso roccioso non sono adeguatamente descritte.



# CONSEGUENZE

La maggior parte dei metodi esistenti valutano le conseguenze di ogni categoria (traffico, sicurezza umana, fattori economici derivanti dall'interruzione delle strade, etc.) in maniera unitaria senza distinguerli caso per caso e spesso introducono punteggi che sono dati dalla concomitanza di fattori di pericolosità e conseguenze.

I fattori di conseguenze più comunemente utilizzati sono:

- La percentuale di Distanza di Visibilità per l'Arresto (*PDSD*) del veicolo;
- Il Rischio Medio per Veicolo (*AVR*);
- Il Traffico Medio Giornaliero (*ADT*);
- La larghezza della carreggiata (*L*);



# METODO ROCKFALL HAZARD RATING SYSTEM (RHRS)

Il metodo *Rockfall Hazard Rating System* (RHRS), è stato sviluppato presso l'*Oregon State Highway Division*, per fornire una stima qualitativa del rischio da crollo lungo le strade.

L'equazione è la seguente:

$$y = 3^x$$

dove:  $y$  = punteggio da assegnare;  $x$  = esponente riferito alla categoria considerata.

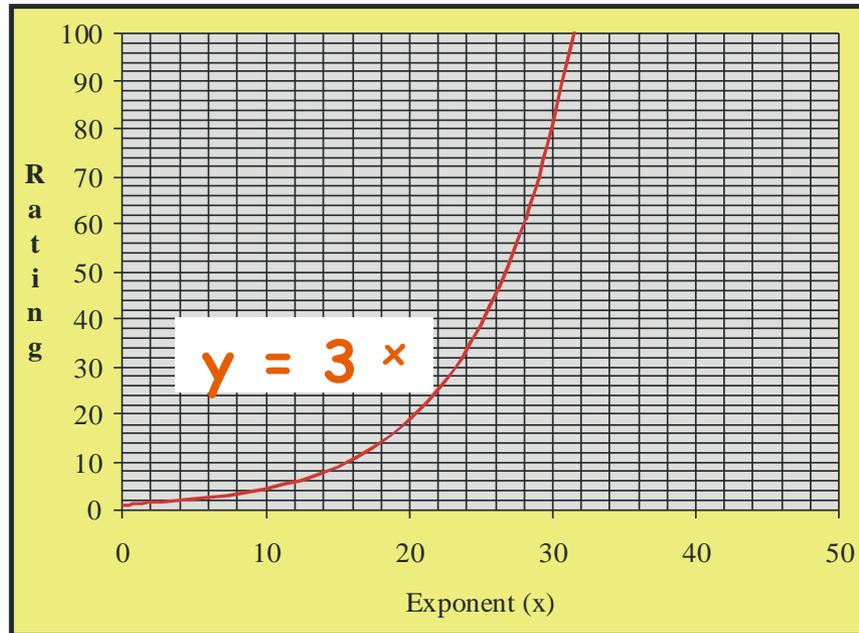


Grafico esponenziale per l'attribuzione del punteggio alle diverse categorie del metodo RHRS.

## Fattori del metodo RHRS e punteggi

Category	Rating criteria by score				
	Points 3	Points 9	Points 27	Points 81	
Slope height	7.5 m	15 m	22.5 m	> 30 m	
Ditch effectiveness	Good catchment	Moderate catchment	Limited catchment	No catchment	
Average vehicle risk (% of time)	25%	50%	75%	100%	
Decision sight distance (% of design value)	Adequate (100%)	Moderate (80%)	Limited (60%)	Very limited (40%)	
Roadway width (including paved shoulders)	13.20 m	10.80 m	8.40 m	6 m	
Geologic characteristics Case 1	Structural condition	Discontinuous joints, favorable orientation	Discontinuous joints, random orientation	Discontinuous joints, adverse orientation	Continuous joints, adverse orientation
	Friction	Rough, irregular	Undulating	Planar	Clay infilling or slickensided
Geologic characteristics Case 2	Structural condition	Few differential erosion features	Occasional erosion features	Many erosion features	Major erosion features
	Difference in erosion rates	Small	Moderate	Large	Extreme
	Block size	0.3 m	0.6 m	0.9 m	1.20 m
	Volume of rockfall per event	2.3 m <sup>3</sup>	4.6 m <sup>3</sup>	6.9 m <sup>3</sup>	9.2 m <sup>3</sup>
	Climate and presence of water on slope	Low to moderate precipitation; no freezing periods; no water on slope water on slope	Moderate precipitation or short freezing periods or intermittent water on slope	High precipitation or long freezing periods or continual water on slope and long freezing periods	High precipitation and long freezing periods or continual
	Rockfall history	Few falls	Occasional falls	Many falls	Constant falls

### Limiti del metodo RHRS:

- Diverse incertezze nell'individuazione dei punteggi;
- Molti fattori sono solo qualitativamente descritti (ciò comporta una elevata soggettività nella scelta);
- Si applica alle strade americane che hanno caratteristiche molto diverse dalle nostre.



# IL METODO ROCKFALL HAZARD RATING SYSTEM MODIFICATO (MRHRS)

- Modifica il metodo originario, per renderlo applicabile alle strade italiane;
- Riduce la soggettività nella scelta dei punteggi da attribuire ad alcuni parametri qualitativamente definiti;
- Introduce lo *Slope Mass Rating* di Romana (1991) per una migliore descrizione degli aspetti di pericolosità delle scarpate.

Il metodo modificato apporta variazioni alle seguenti categorie:

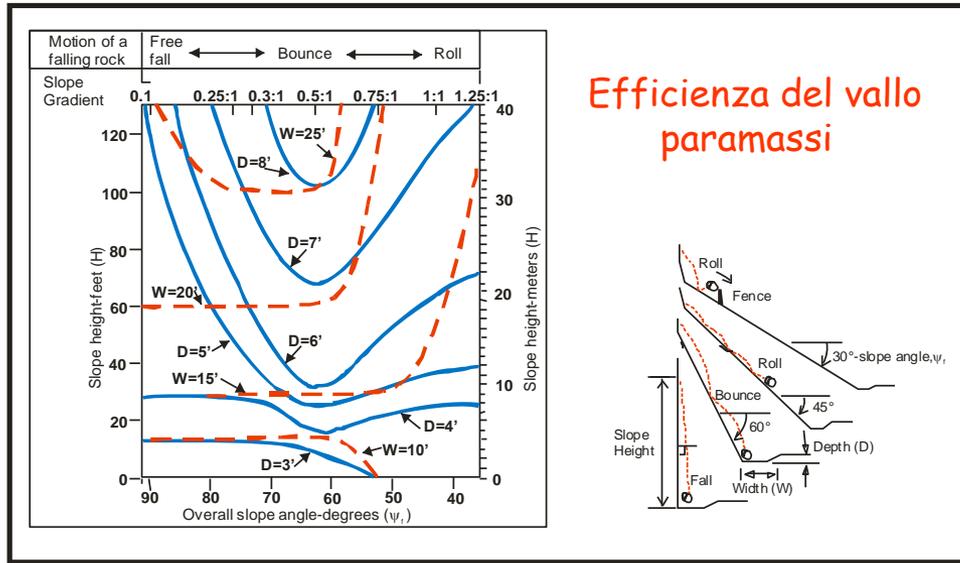
- Efficienza del vallo paramassi;
- Distanza di visibilità per l'arresto;
- Caratteristiche geostrutturali del pendio;
- Diametro del masso e volume del blocco per evento;
- Condizioni climatiche e presenza di acque sotterranee;
- Frequenza dei crolli;



CATEGORY	RATING CRITERIA BY SCORE			
	POINTS 3	POINTS 9	POINTS 27	POINTS 81
SLOPE HEIGHT	7.5 m	15 m	22.5 m	30 m
DITCH EFFECTIVENESS	Good catchment: properly designed according to updates of Ritchie's ditch design chart + barriers	Moderate catchment: properly designed according to updates of Ritchie's ditch design chart	Limited catchment: wrongly designed	No catchment
AVERAGE VEHICLE RISK	25%	50%	75%	100%
DECISION SIGHT DISTANCE (% of design value)	Adequate (100 %)	Moderate (80 %)	Limited (60 %)	Very limited (40 %)
ROADWAY WIDTH	21.50 m	15.50 m	9.50 m	3.50 m
SLOPE MASS RATING (SMR)	80	40	27	20
BLOCK SIZE AND BOULDER VOLUME	30 cm 26 dm <sup>3</sup>	60 cm 0.21 m <sup>3</sup>	90 cm 0.73 m <sup>3</sup>	120 cm 1.74 m <sup>3</sup>
VOLUME OF ROCKFALL PER EVENT	2.3 m <sup>3</sup>	4.6 m <sup>3</sup>	6.9 m <sup>3</sup>	9.2 m <sup>3</sup>
ANNUAL RAINFALL AND FREEZING PERIODS	H = 300 mm or no freezing periods	H = 600 mm or short freezing periods	H = 900 mm or long freezing periods	H = 1200 mm or long freezing periods
ROCKFALL FREQUENCY	1 per 10 years	3 per year	6 per year	9 per year

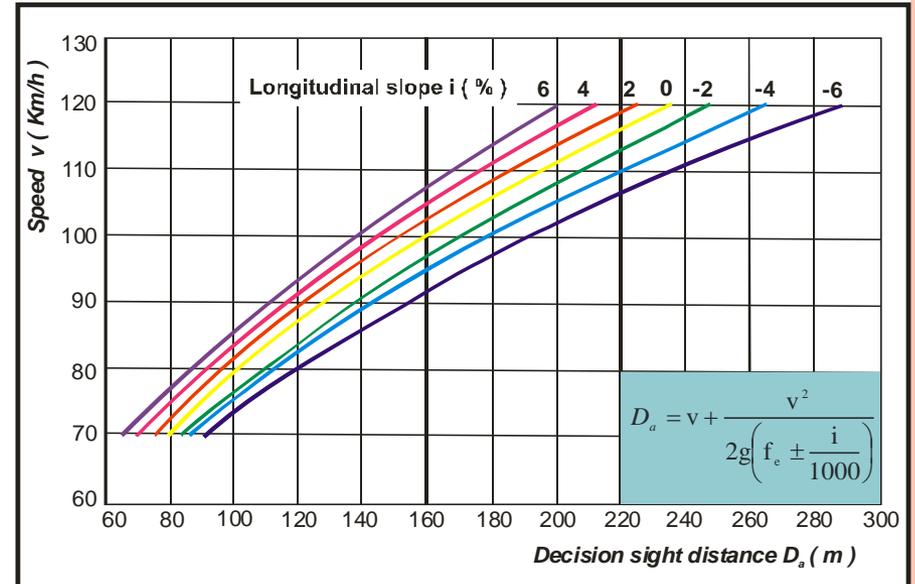


# IL METODO ROCKFALL HAZARD RATING SYSTEM MODIFICATO (MRHRS)



Abaco di Ritchie modificato da Whiteside (1986)

Distanza di visibilità per l'arresto in funzione della velocità (da CNR, 1980)



# IL METODO ROCKFALL HAZARD RATING SYSTEM MODIFICATO (MRHRS)

## CARATTERISTICHE GEOSTRUTTURALI DEL PENDIO

$$SMR = RMR + (F1 \times F2 \times F3) + F4$$

Classi di stabilità e valori di *Slope Mass Rating* secondo Romana, 1991

CLASS	V	IV	III	II	I
SMR	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100
DESCRIPTION	Very bad	Bad	Normal	Good	Very good
STABILITY	Completely unstable	Unstable	Partially stable	Stable	Completely stable
FAILURES	Big planar or soil - like	Planar or big wedges	Some joints or many wedges	Some blocks	None

## DIAMETRO DEL MASSO E VOLUME DEL CROLLO PER EVENTO

$$Vb = (S1 \times S2 \times S3) / (sina \times sin\beta \times siny)$$

Il diametro del blocco ( $Db$ ) si ricava dalla formula:  $Db = \sqrt[3]{Vb}$

## CONDIZIONI CLIMATICHE ED ACQUE SOTTERRANEE

Nel metodo modificato si è fatto riferimento alla sola piovosità ed alla presenza di cicli di gelo e disgelo poiché il ruolo svolto dalla circolazione idrica sotterranea è già computato nel calcolo dello SMR.

## FREQUENZA DEI CROLLI

Rispetto al metodo originario, si fa riferimento al tempo di ritorno per eventi di crollo che si verificano da “1 volta ogni dieci anni” a “9 volte l’anno”.



# IL METODO ROCKFALL HAZARD RATING SYSTEM MODIFICATO (MRHRS)

CATEGORY	EQUATION
Slope height (H)	$y = 3^{H/7.5}$
Average vehicle risk (AVR)	$y = 3^{AVR/25}$
Decision sight distance (%D <sub>a</sub> )	$y = 3^{(120 - \%D_a)/20}$
Roadway width (L <sub>c</sub> )	$y = 3^{(27.5 - L_c)/6}$
Slope mass rating (SMR)	$y = 3^{80/SMR}$
Block size (D <sub>b</sub> )	$y = 3^{D_b/0.3}$
Volume of rockfall per event (V <sub>fall</sub> )	$y = 3^{V_{fall}/2.3}$
Annual rainfall (h)	$y = 3^{(h/300)}$
Rockfall frequency (f)	$y = 3^{(1+(0.334 \times f))}$

Espressioni dell'esponente  $x$  attribuite alle categorie modificate



# APPLICAZIONE DEL METODO MRHRS AD UN TRATTO STRADALE

Il tratto di strada studiato appartiene ad un percorso lungo la strada statale n. 163 Amalfitana.

La strada è caratterizzata dai seguenti elementi:

- ✓ Una sola corsia per entrambe le direzioni;
- ✓ Nessun vallo paramassi;
- ✓ Un alto grado di curvature;



Fig. 4. Sito di Conca dei Marini con il flusso veicolare lungo la strada Amalfitana.

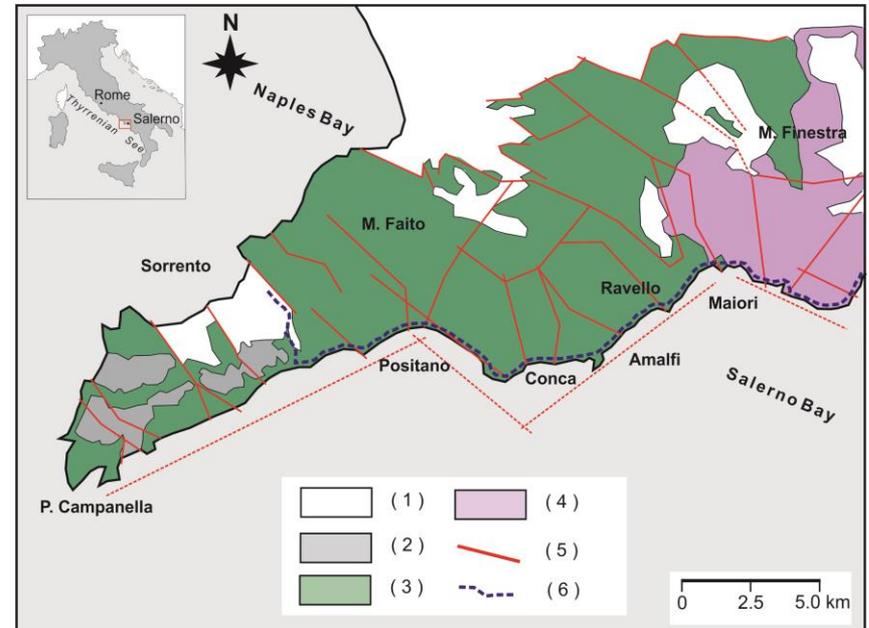


# APPLICAZIONE DEL METODO MRHRS AD UN TRATTO STRADALE

L'area di studio appartiene alla penisola Sorrento- Amalfitana, e separa due depressioni tettoniche, la Piana Campana a nord e il Golfo di Salerno a sud.

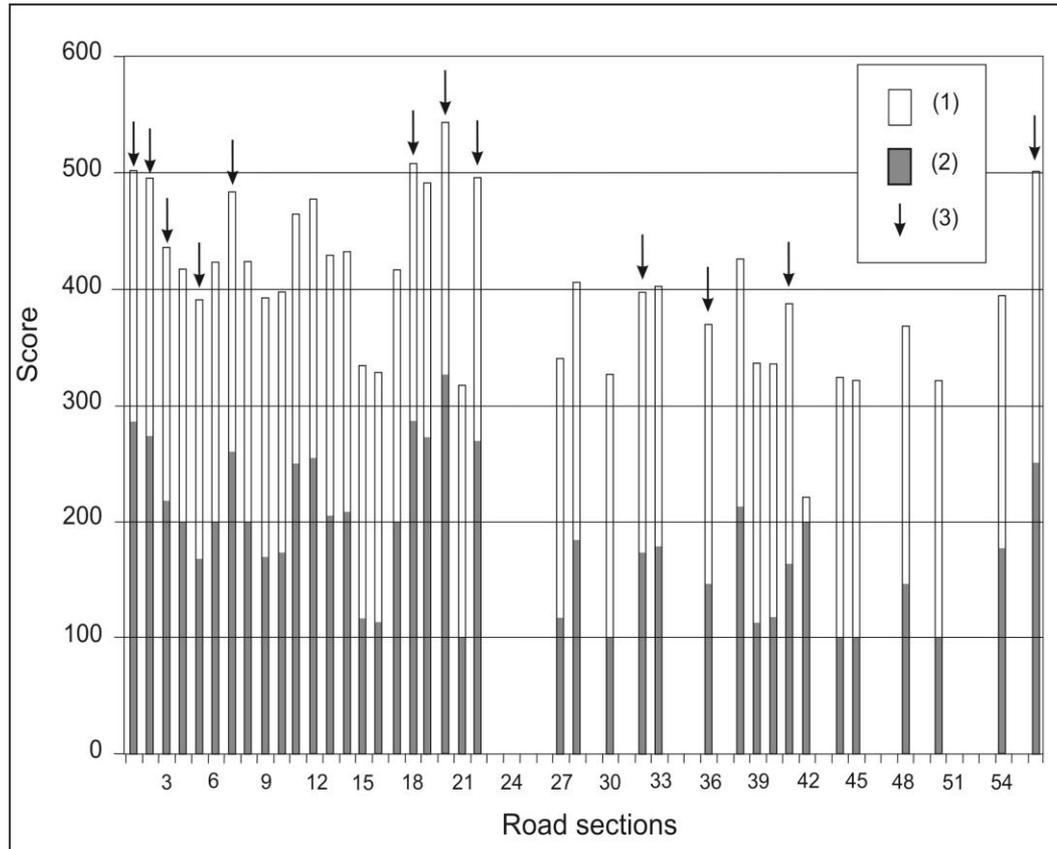
In figura possiamo notare:

- (1) Depositi alluvionale, colluviali e piroclastici.
- (2) Depositi Miocenici silico-clastici; (3) Calcari mesozoici; (4) Dolomiti mesozoiche; (5) Faglie principali; e (6) il percorso della strada statale n. 163 Amalfitana.



Esempi di blocchi instabili sul tratto di strada studiato.

# APPLICAZIONE DEL METODO MRHRS AD UN TRATTO STRADALE



Valutazione del rischio di caduta massi per la direzione del traffico verso Furore e per il periodo primavera/estate, registrato per i 33 tratti di strada studiati con il metodo RHRS. (1) Punteggio della conseguenza; (2) punteggio di rischio; (3) sezione della strada affetta da caduta massi.

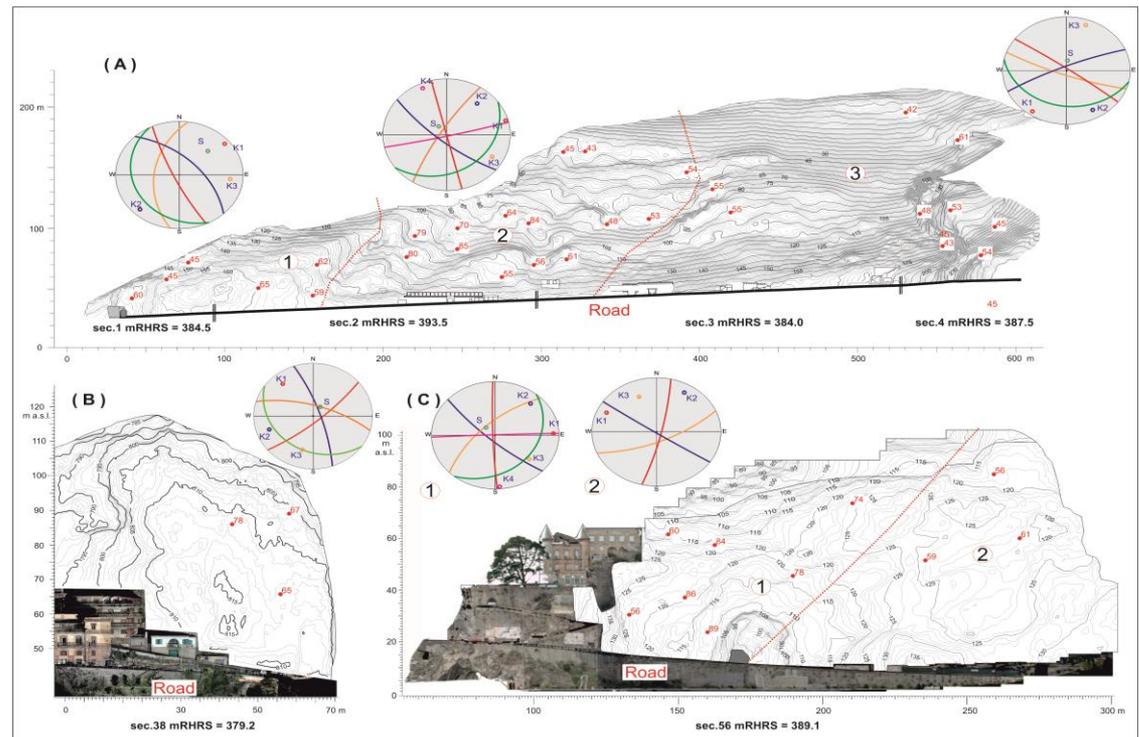
Per gli eventi di caduta massi che hanno interessato l'area, è stato creato un database con le progressione chilometriche, le date e i territori interessati, dal 1969 al 2008.

Le curve di frequenza-magnitudo cumulata (MFCs) dei crolli possono essere descritte dalla seguente legge :

$$\text{Log}N(V) = N_0 + b \cdot \log V$$

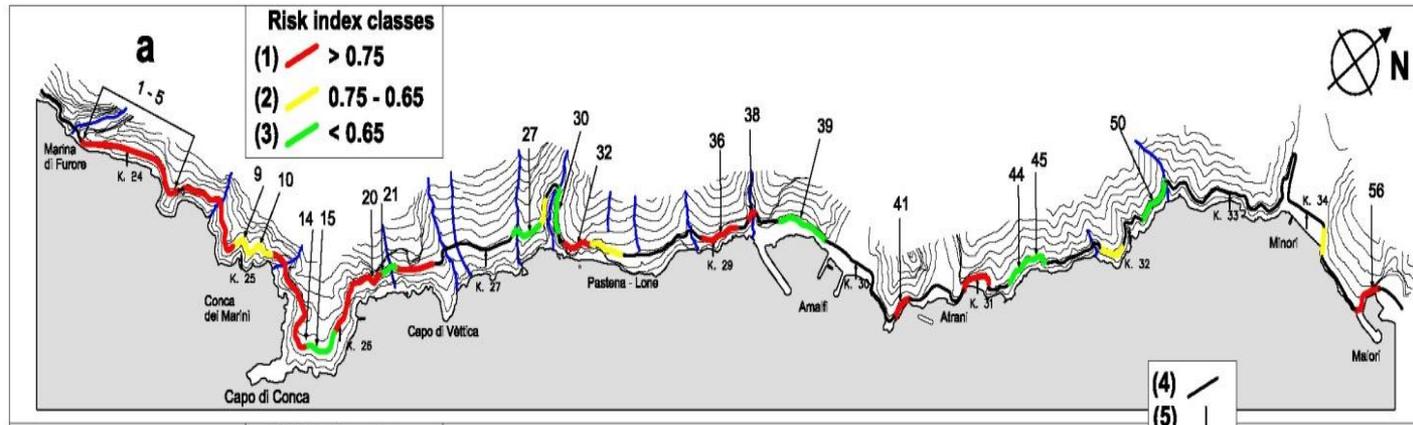
# APPLICAZIONE DEL METODO MRHRS AD UN TRATTO STRADALE

A causa dell'approccio molto più complesso e laborioso richiesto dall'mRHRS, rispetto all'originale RHRS, per la sua applicazione sono necessari molti e dettagliati dati topografici, geostrutturali e geomeccanici



Andamento delle ciclografiche dei sistemi di giunti che caratterizzano alcune sezioni della strada. (A) Conca dei Marini; (B) Amalfi; (C) Maiori; I puntini rossi mostrano la localizzazione delle stazioni geomeccaniche e i valori dello *Slope Mass Rating* correlati.

# RISULTATI



Classi di rischio da caduta massi valutate per l'intero tratto di strada, attraverso il metodo RHRS. (1) Alto rischio di caduta massi; (2) rischio medio di caduta massi; (3) basso rischio di caduta massi; (4) tratto stradale non influenzato da potenziale caduta massi.

Budetta & Nappi, 2013

L'indice dell'SMR (Romana, 1985), che varia tra 42 e 89, identifica classi di instabilità che vanno dalla seconda classe ("pendii stabili") alla terza classe ("pendii parzialmente stabili") con una chiara prevalenza della seconda classe che affiora in tutti i siti investigati.



# CONCLUSIONI

Le differenze tra i punteggi finali del Rischio sono dovute principalmente ai valori variabili della Distanza di visibilità per l'arresto (DSD), nelle due direzioni di marcia;

Altre categorie che influenzano sensibilmente il punteggio finale sono:

- l'altezza del pendio;
- il Rischio medio per veicolo (AVR);
- Il volume del blocco per evento

Nel metodo RHRS originale i pendii con punteggi  $<$  di 300 sono classificati come non necessitanti di interventi di sistemazione urgenti; quelli con punteggi  $>$  500 necessitano di interventi urgenti.

E' però preferibile non assegnare valori prestabiliti ma decidere caso per caso in funzione delle caratteristiche geologiche e del traffico. L'uso di una gamma continua di punteggi (suggerita nel metodo modificato) consente una maggiore flessibilità di giudizio nel valutare l'impatto relativo di condizioni che sono per natura molto variabili.

**Occorre infine ricordare che i metodi qualitativi sono propedeutici all'utilizzo di verifiche di stabilità puntuali, con metodi geomeccanici nei siti a maggior rischio.**