



SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

Corso di Laurea Triennale in:
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

Sintesi della tesi di Laurea in:
**METODI EURISTICI PER LA VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ E DEL
RISCHIO DERIVANTI DA CADUTA MASSI SU INFRASTRUTTURE STRADALI**

Relatore:
Ch.mo Prof. Paolo Budetta

Candidato:
Claudio Guglielmelli
Matricola:
N49/129

Obbiettivo dell'elaborato di tesi

- Illustrare un metodo euristico per lo studio del fenomeno caduta massi su strade, noto come *"Rockfall Hazard Rating Siystem"*;
- Spiegare le modifiche apportate per rendere il metodo più agevole e meno soggetto a valutazioni soggettive;
- Presentare un'applicazione di questo metodo modificato ad un tratto della statale Sorrentina (SS 145).



Lo studio è consistito in:

- Analizzare il fenomeno della caduta massi sulle infrastrutture stradali;
- Presentare il metodo *Rockfall Hazard Rating System* atto all'analisi dei pendii incombenti sulla strada mediante l'introduzione dei *rating* in grado di classificare le scarpate, in base alla pericolosità e al rischio potenziale;
- Validare, mediante un'applicazione, i criteri secondo i quali sono state apportate alcune modifiche al metodo, al fine di rendere più agevole l'assegnazione dei punteggi e la progettazione degli interventi di sistemazione.

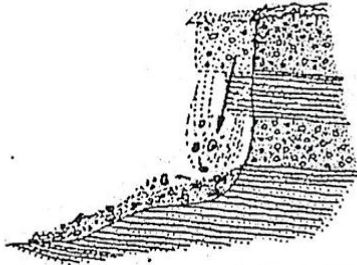
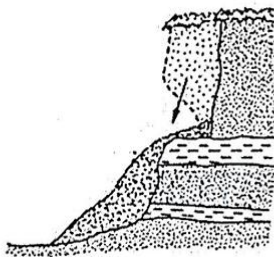


Esempio di crollo in roccia

Caduta massi sulle vie di comunicazione

La caduta massi, secondo la classifica di Cruden e Varnes 1996, è un tipo di movimento franoso che si manifesta con il distacco di un volume di roccia dalla sede originaria e si propaga lungo il pendio sottostante con limitate interazioni tra il materiale in movimento e il versante stesso.

TIPO DI MATERIALE (PRIMA DEL MOVIMENTO)		TIPO DI MOVIMENTO: CROLLO
TERRA (ENGINEERING SOILS)	ROCCIA (BED ROCK)	
PREVALENTEMENTE GROSSOLANA		
PREVALENTEMENTE FINE		

Le conseguenze di un crollo sulla sede stradale possono comportare pericoli per gli utenti dell'infrastruttura stradale e danni per i Gestori derivanti dall'interruzione del flusso veicolare, ritardi, aggravii economici.

Metodi euristici per la valutazione del rischio

Il metodo **Rockfall Hazard Rating System** (RHRS) è un metodo euristico originariamente sviluppato da Pierson et alii, 1990 per le strade americane.

L'obiettivo del Rockfall Hazard Rating System è garantire un'allocazione efficace dei fondi stanziati per la Sicurezza delle Infrastrutture Stradali, tramite la formulazione di un sistema di risposte adeguate, applicabili alle diverse esigenze nazionali.

A tal fine Il metodo RHRS si propone di elaborare:

- Una metodologia uniforme per la classificazione dei pendii;
- Una classificazione preliminare;
- Una classificazione dettagliata ;
- Un progetto preliminare e la valutazione del costo stimato per gli interventi sui siti ad alto rischio;
- Un report del lavoro svolto e un aggiornamento dei dati, su base annuale.

1. Report No. FHWA-OR-GT-92-05	2. Government Accession No.	3. Recipient's Catalog No.
4. Title and Subtitle Rockfall Hazard Rating System		5. Report Date November, 1991
		6. Performing Organization Code
7. Author(s) Lawrence A. Pierson		8. Performing Organization Report No.
9. Performing Organization Name and Address Oregon State Highway Division Engineering Geology Group 800 Airport Road S.E. Salem, OR 97310-1310		10. Work Unit No. (TRIS)
		11. Contract or Grant No. DTFH61-89-C-00078
12. Sponsoring Agency Name and Address Federal Highway Administration 400 Seventh Street S.W. Washington, D.C. 20590		13. Type of Report and Period Covered Final Report July, 1989 - November, 1991
		14. Sponsoring Agency Code
15. Supplementary Notes		

Classificazione dettagliata dei pendii

La classificazione dettagliata prevede che per ciascuno sito vengano presi in considerazione dieci parametri di valutazione in grado di descrivere le caratteristiche geologiche dei pendii, quelle della sede stradale e del traffico veicolare.

A ciascun parametro viene assegnato un punteggio che indica in maniera crescente la pericolosità del sito (da 3 a 81 punti). La somma dei punteggi fornisce l'entità del rischio.

Le 10 categorie sono:

- Altezza del pendio;
- Efficienza del vallo paramassi;
- Rischio medio per veicolo;
- Distanza di Reazione dall' Avvistamento del pericolo;
- Larghezza della strada;
- Caratteristiche geologiche (caso 1 e 2);
- Grandezza dei blocchi o Volume complessivo in caduta;
- Condizioni Climatiche e Presenza di Acqua;
- Storia pregressa dei crolli.

Tale classificazione analizza quindi i diversi fattori coinvolti nel fenomeno di caduta massi e le conseguenze sugli "elementi a rischio" (il traffico veicolare).

Il metodo Rockfall Hazard Rating System

**SUMMARY SHEET OF THE
ROCKFALL HAZARD RATING SYSTEM**

CATEGORY			RATING CRITERIA AND SCORE			
			3 POINTS	9 POINTS	27 POINTS	81 POINTS
SLOPE HEIGHT			25 FEET	50 FEET	75 FEET	100 FEET
DITCH EFFECTIVENESS			Good catchment	Moderate catchment	Limited catchment	No catchment
AVERAGE VEHICLE RISK			25% of the time	50% of the time	75% of the time	100% of the time
PERCENT OF DECISION SIGHT DISTANCE			Adequate sight distance, 100% of low design value	Moderate sight distance, 80% of low design value	Limited sight distance, 60% of low design value	Very limited sight distance 40% of low design value
ROADWAY WIDTH INCLUDING PAVED SHOULDERS			44 feet	36 feet	28 feet	20 feet
G E O L O G I C C H A R A C T E R	C A S E 1	STRUCTURAL CONDITION	Discontinuous joints, favorable orientation	Discontinuous joints, random orientation	Discontinuous joints, adverse orientation	Continuous joints, adverse orientation
		ROCK FRICTION	Rough, Irregular	Undulating	Planar	Clay infilling, or slickensided
	C A S E 2	STRUCTURAL CONDITION	Few differential erosion features	Occasional erosion features	Many erosion features	Major erosion features
		DIFFERENCE IN EROSION RATES	Small difference	Moderate difference	Large difference	Extreme difference
	BLOCK SIZE		1 Foot	2 Feet	3 Feet	4 Feet
	VOLUME OF ROCKFALL/EVENT		3 cubic yards	6 cubic yards	9 cubic yards	12 cubic yards
CLIMATE AND PRESENCE OF WATER ON SLOPE		Low to moderate precipitation; no freezing periods; no 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	High precipitation and long freezing periods or continual water on slope and long freezing periods	
ROCKFALL HISTORY		Few falls	Occasional falls	Many falls	Constant falls	

Classificazione dettagliata dei pendii (Pierson et alii., 1990).

Limiti e problematiche del Rockfall Hazard Rating System

- Diverse incertezze vi sono nell'individuazione dei punteggi;
- Troppe categorie vengono descritte soltanto in maniera qualitativa;
- Si applica alle strade americane (dell'Oregon) che hanno caratteristiche diverse dalle nostre.

Categorie modificate (da Budetta, 2004):

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 Case 2	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
	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 cm	0.6 m	0.9 m	1.20 m
	Volume of rockfall per event	2.3 m ³	4.6 m ³	6.9 m ³	9.2 m ³
	Climate and presence of water on slope	Low to moderate precipitation; no freezing periods; no 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

Metodo RHRS modificato

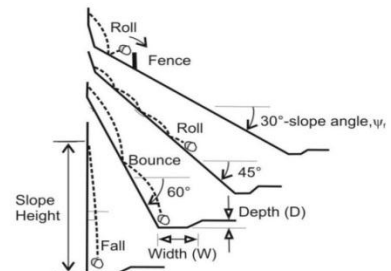
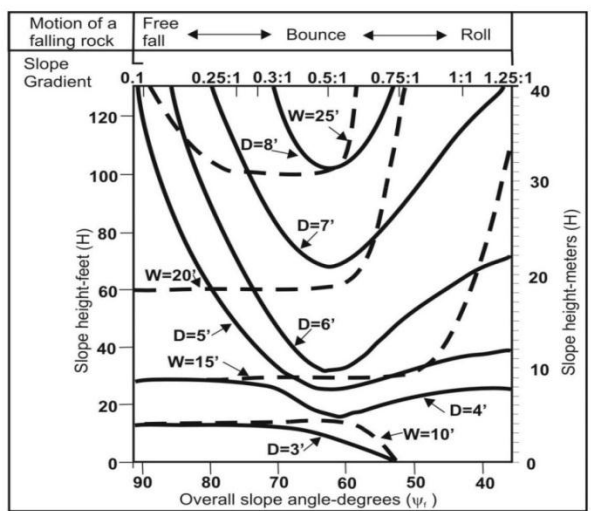
Il metodo modificato apporta variazioni alle seguenti categorie:

- Efficienza del vallo paramassi;
- Distanza di visibilità per l'arresto;
- Caratteristiche geologiche;
- Dimensioni dei blocchi e volume complessivo dei massi;
- Condizioni climatiche e presenza di acque sotterranee;

Inoltre si introduce la funzione esponenziale $y = 3^{f(x)}$, la quale risulta utile per assegnare un punteggio specifico per ogni caratteristica presa in analisi:

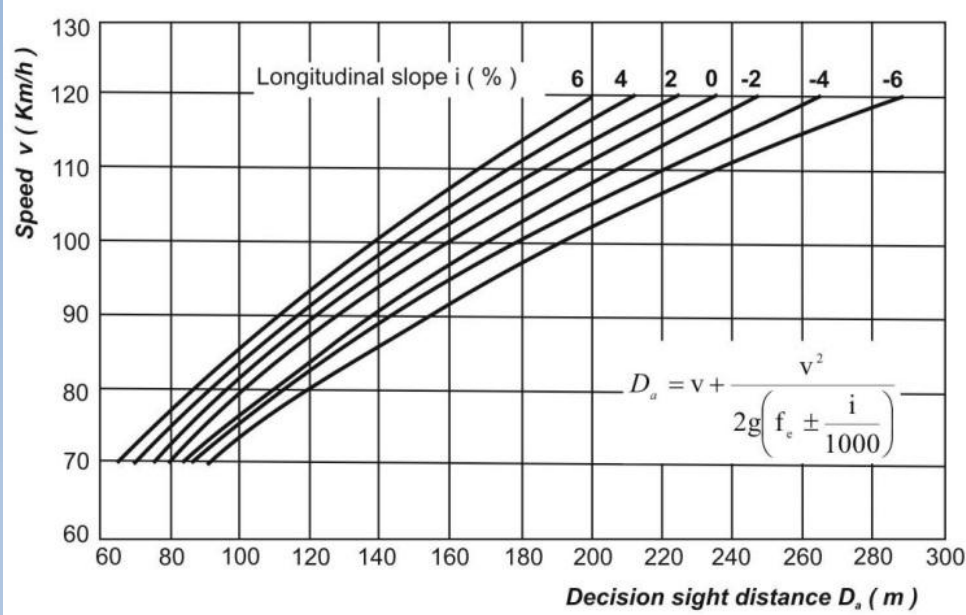
Category	Equation
Slope height (H)	$y=3^{H/7.5}$
Average vehicle risk (AVR)	$y=3^{AVR/25}$
Decision sight distance ($\%D_a$)	$y=3^{(120-\%D_a)/20}$
Roadway width (L_c)	$y=3^{(27.5-L_c)/6}$
Slope mass rating (SMR)	$y=3^{80/SMR}$
Block size (D_b)	$y=3^{D_b/0.3}$
Volume of rockfall per event (V_{fall})	$y=3^{V_{fall}/2.3}$
Annual rainfall (h)	$y=3^{h/300}$
Rockfall frequency (f)	$y=3^{1+(0.334 \cdot f)}$

• Efficienza del vallo paramassi:



Abaco per il dimensionamento del Vallo paramassi (larghezza e profondità) in relazione all' altezza del pendio sovrastante e della sua inclinazione (Ritchie, 1963) (da Budetta, 2004)

• Distanza di visibilità per l'arresto:



Relazioni che intercorrono tra Distanza di reazione e Velocità del veicolo per differenti valori della pendenza longitudinali della sede stradale (da, CNR 1980)

- **Caratteristiche geologiche:**

Sono valutate, in maniera oggettiva, utilizzando lo Slope Mass Rating (SMR) di Romana (1985) sulla base del Rock Mass Rating (RMR) di Bienawski, modificato e reso applicabile ai pendii rocciosi:

$$SMR = RMR + (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_4$$

- **Dimensione dei blocchi e volume complessivo dei massi in caduta:**

Il volume di roccia, potenzialmente instabile, viene stimato sulla base dei dati di spaziatura delle famiglie di discontinuità presenti nell'ammasso:

$$V_b = \frac{(S_1 \cdot S_2 \cdot S_3)}{(\sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma)}$$

Da cui si ricava il diametro del blocco:

$$D_b = \sqrt[3]{V_b}$$

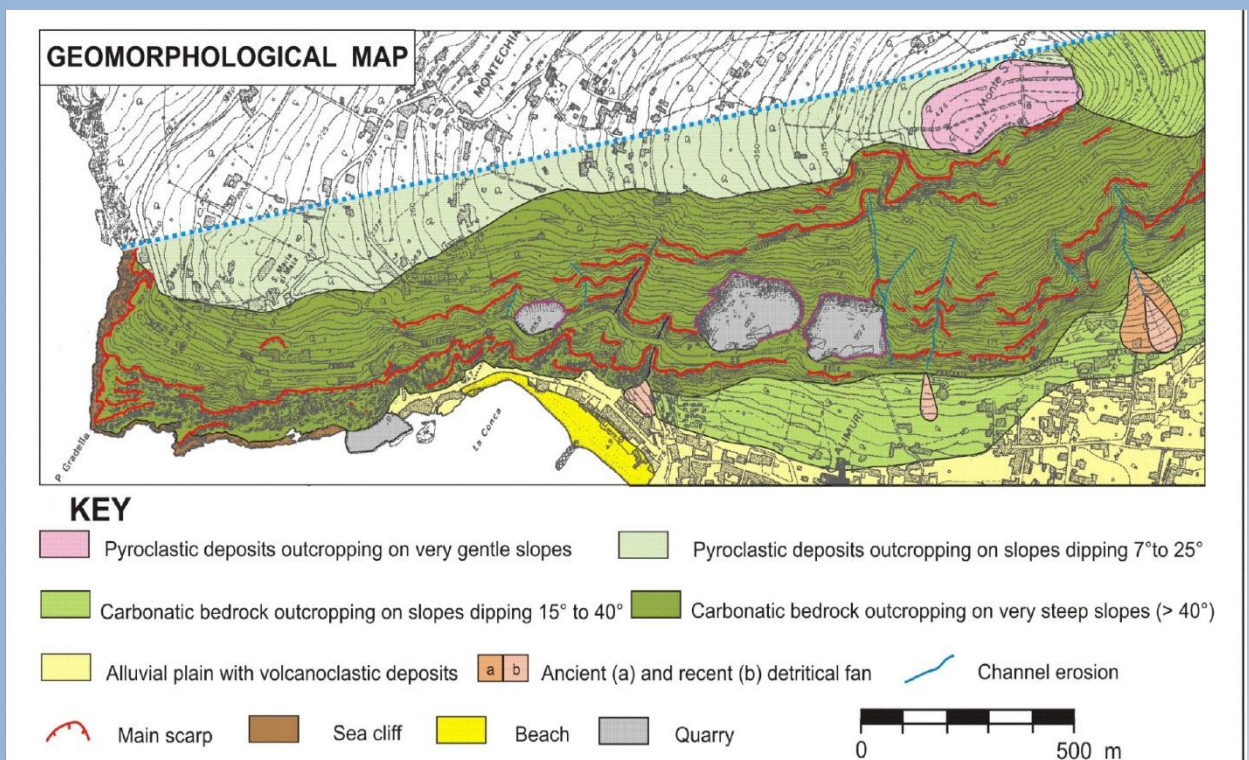
- **Condizioni climatiche e presenza di acque sotterranee:**

La presenza di acque sotterranee è già di per se valutata nello Slope Mass Rating (SMR). Invece per tenere conto dell'apporto meteorico medio annuo nell'area d'interesse, si fa riferimento all'indice pluviometrico.

Applicazione del metodo RHRS modificato

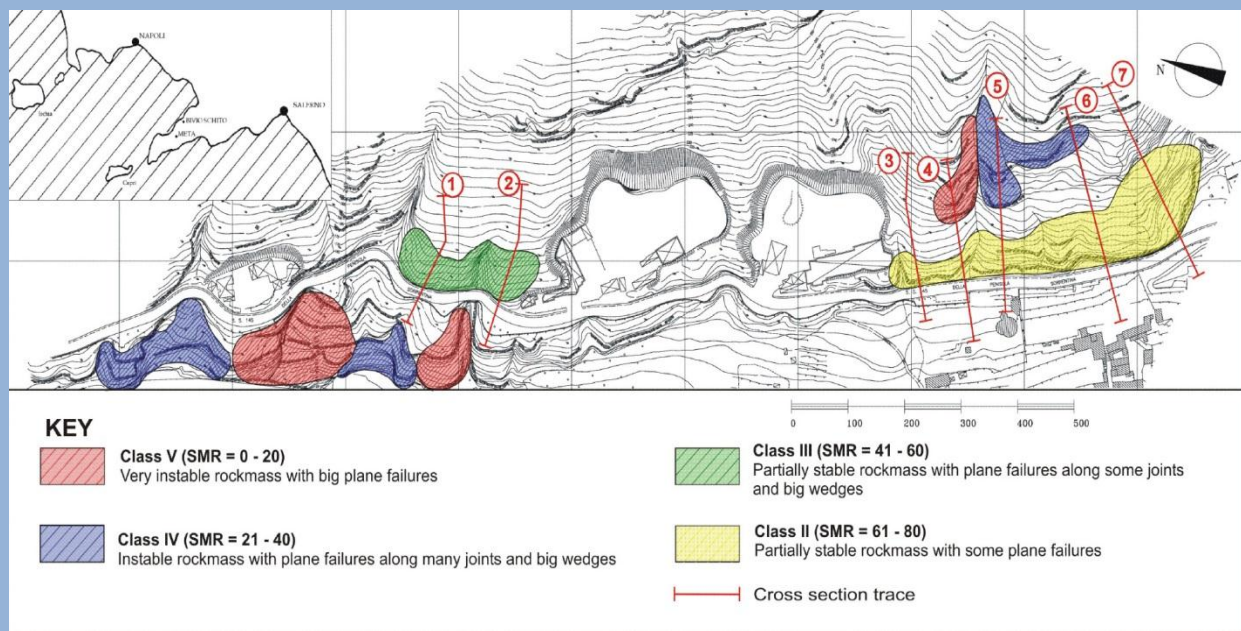
Si riporta un esempio di applicazione del metodo modificato su una sezione lunga 2 km della Strada Statale "Sorrentina" (SS n° 145), compresa tra la località Meta di Sorrento e Punta Gradelle.

L'RHRS modificato è stato applicato in corrispondenza di 7 sezioni trasversali all'asse stradale, in punti significativi scelti in base alla disponibilità di dati topografici, geostrutturali e geomeccanici. Inoltre, ove possibile, le sezioni sono state ubicate tenendo conto dei tratti a minor visibilità per la presenza di curve a più ridotto raggio.

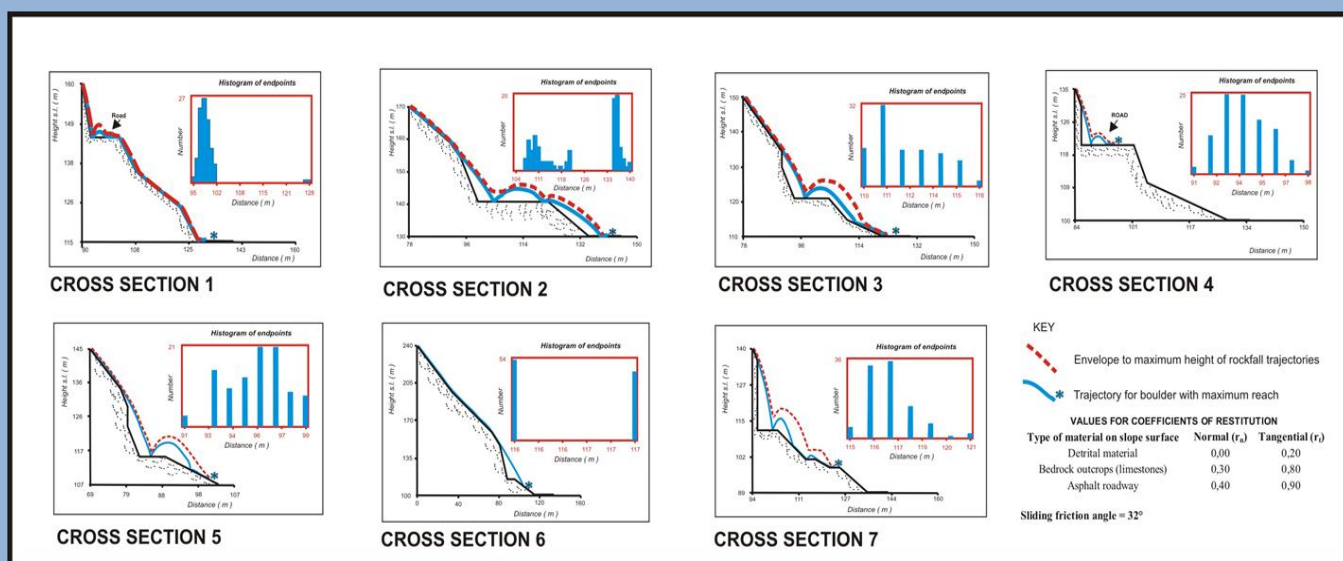


[Budetta, 2004]

Analisi delle caratteristiche geologiche e delle traiettorie dei blocchi in caduta

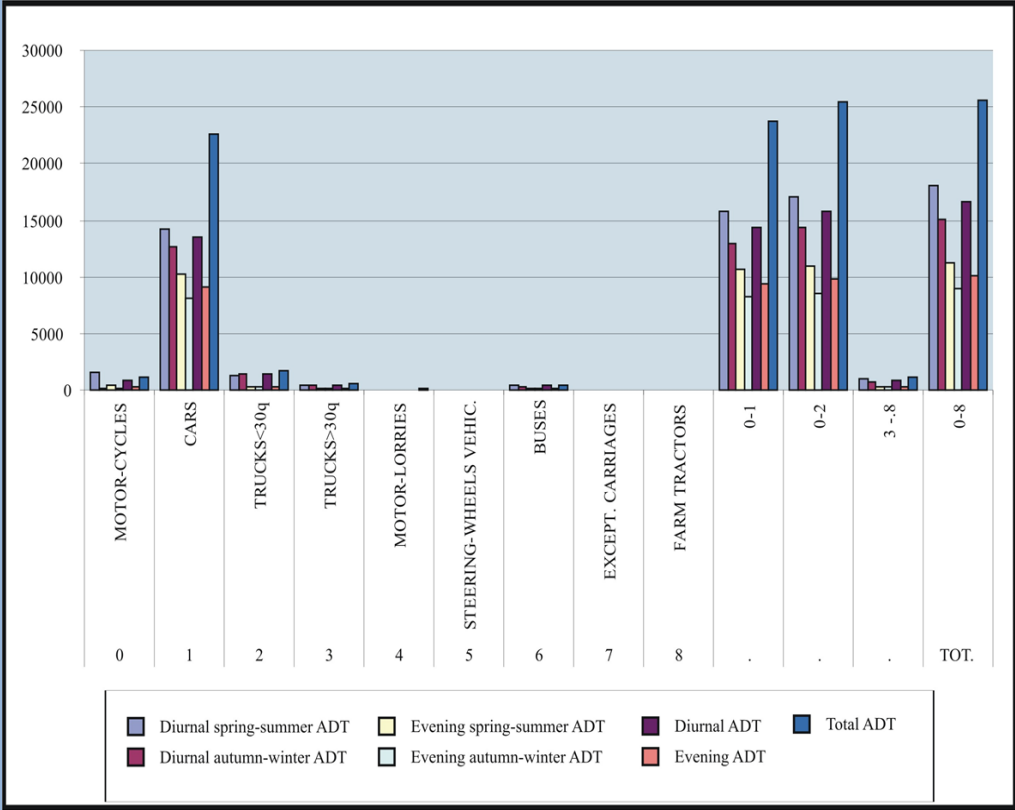


Individuazione delle classi di Slope Mass Rating (Romana, 1985) e delle sezioni di calcolo.



Analisi delle traiettorie di caduta lungo 7 sezioni prese in analisi ottenute con l'utilizzo di un codice di calcolo di tipo «Lumped mass».

Analisi del Traffico medio giornaliero e della Distanza di visibilità per arresto



Traffico medio giornaliero registrato in prossimità di Meta di Sorrento (anno 1995).

Road hazard section - distance	D_a^* (m)	D_a^* (%)	D_a^{**} (m)	D_a^{**} (%)
1 - (km 21 + 156)	30	71	10	24
2 - (km 21 + 206)	30	71	16	38
3 - (km 21 + 578)	42	100	32	76
4 - (km 21 + 618)	42	100	42	100
5 - (km 21 + 660)	42	100	42	100
6 - (km 21 + 720)	42	100	42	100
7 - (km 21 + 800)	38	90	42	100

D_a^* : Decision sight distance in the direction towards Naples

D_a^{**} : Decision sight distance in the direction towards Meta di Sorrento

Distanza di visibilità per arresto (D_a) e le percentuali di riduzione della D_a in entrambe le direzioni di marcia per le 7 sezioni considerate.

Risultati dell'applicazione del metodo RHRS modificato

L'applicazione del metodo modificato produce un risultato del tipo rappresentato in tabella, in cui viene assegnato un punteggio relativo ad ogni singola categoria. La somma di questi valori fornisce il **rating finale** utile per l'assegnazione dei pendii a diverse classi di rischio (basso, medio e alto):

SEZIONE 1: Progressiva km 21 + 156; Quota strada 145 m s.l.m.				
N.	Parametro	Valore		Punteggio
1	Altezza della scarpata	25 m		39
2	Efficacia del vallo	assente		81
3	Rischio medio per veicolo	80%		34
4	Percentuale disponibile di distanza di avvistamento	71% (*)	24% (°)	15 (*) 195 (°)
5	Larghezza della strada	7 m		43
6	Classe di Romana Indice SMR	III 50		6
7	Diametro del masso	0,51 m		6
8	Modulo pluviometrico	1005 mm		40
9	Frequenza dei crolli	1 ogni 10 anni		3
Punteggi complessivi: 267 (*); 447 (°)				

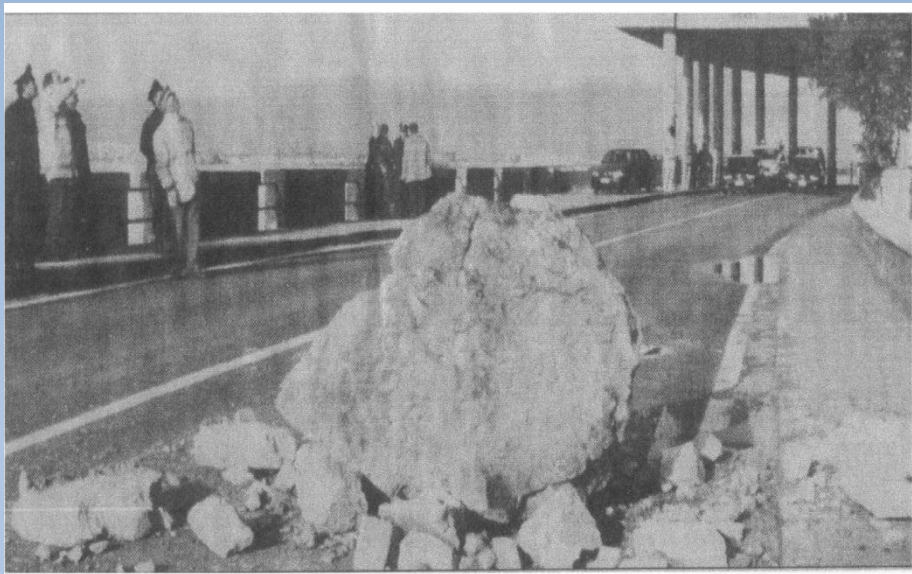
Esempio di applicazione del metodo RHRS modificato e relativi punteggi: (*) in direzione di Napoli; (°) in direzione di Meta di Sorrento per la sezione 1.

Conclusioni

Il metodo RHRS modificato consente di ripartire i pendii analizzati in classi di priorità per gli interventi. E' possibile, in questo modo, garantire una giusta allocazione delle risorse economiche destinate alla messa in sicurezza delle infrastrutture stradali.

Essendo un metodo euristico (basato sull'esperienza dei rilevatori) non è tuttavia immune da approssimazioni e semplificazioni.

Le aree che secondo questa classificazione risultano ad **alto rischio** meritano infatti l'applicazione di metodi geomeccanici più sofisticati (approccio geotecnico), basati su un'approfondita conoscenza delle caratteristiche geostrutturali e morfologiche dei pendii analizzati.



Massi sulla carreggiata a seguito del crollo del 31 gennaio 2001 in località Punta Orlando