

Strumenti per la valutazione del rischio nel tempo: variazione degli scenari ipotizzati e gestione delle opere di protezione

Dr. Maddalena Marchelli
Politecnico di Torino



Politecnico
di Torino

Department of Environment,
Land and Infrastructure
Engineering



Funded by
the European Union
GA 101103401

Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

16 maggio 2025 – Aula magna CNR, Piazzale Aldo Moro 7 - Roma

Quantificazione del rischio

PER UN SINGOLO SCENARIO

$$R = [P_d(\mu_i)P_r(\psi_j|\mu_i)]E(T)V(\mu_i, \psi_j)W$$

Prendendo ad esempio la **caduta massi**

$P(\mu_i)$: probabilità associata al distacco di un **blocco di dimensione μ_i**

$P(\psi_j|\mu_i)$: probabilità che il **blocco di dimensione μ_i** raggiunga il punto X con **intensità ψ_j**



$E(T)$: esposizione, i.e. la probabilità che l'elemento a rischio sia nella traiettoria del fenomeno quando questo avviene (i.e. tempo T)

$V(\mu_i, \psi_j)$: vulnerabilità, i.e. il grado di perdita dell'elemento a rischio considerando un **blocco di dimensione μ_i** con **intensità ψ_j**



W : valore dell'elemento a rischio

Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

Quantificazione del rischio

PER **UNO** SCENARIO in **qualsiasi tempo** $R = [P_d(\mu_i)P_r(\psi_j|\mu_i)]E(T)V(\mu_i, \psi_j)W$

PER **TUTTI** GLI **SCENARI** & IN UNO **SPECIFICO** INTERVALLO DI **TEMPO τ**

Formula **rigorosa**

$$R(\tau) = E \int \int_0^{\infty} [1 - e^{-\lambda p_d(\mu) p_r^e(\mu) \tau}] V(\psi, \mu) f_v(\psi, V_B = \mu) d\psi d\mu$$

Rischio in un tempo τ
e.g. 1 anno

Probabilità che l'evento si verifichi (distacco + propagazione) in un tempo τ considerando un volume

Vulnerabilità dell'elemento per un volume iniziale e una sua possibile energia di impatto

Integrale (somma) su «tutte» le possibili energie di impatto del volume considerato

Integrale su «tutti» i volumi (e tutte le energie)

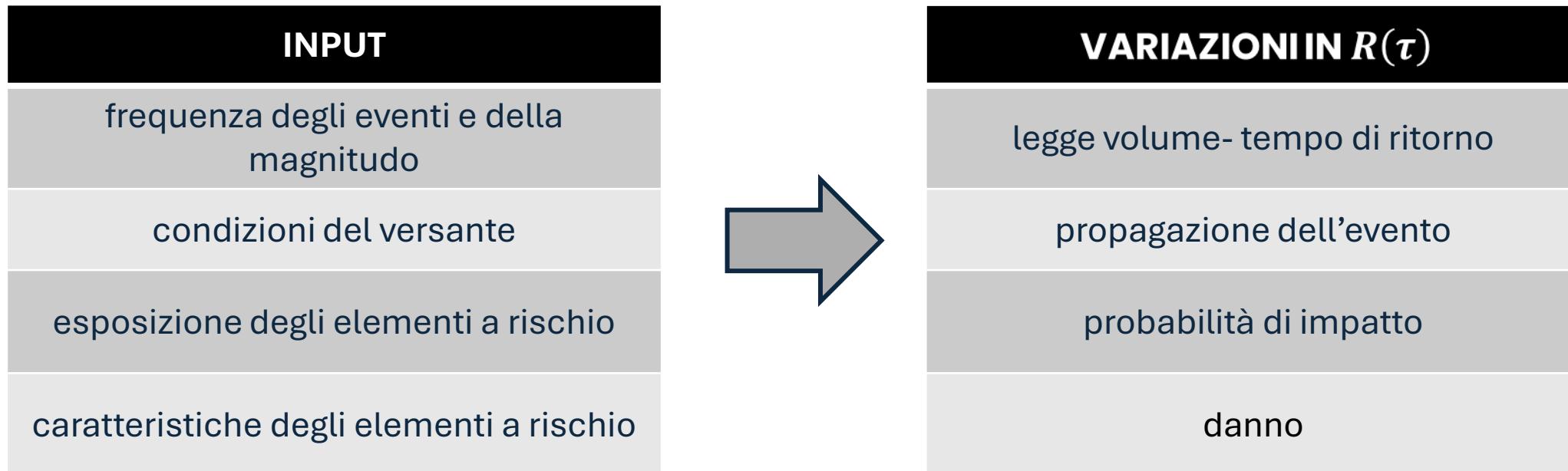
(Marchelli et al., 2024)

Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

Quantificazione del rischio

La formulazione precedente è valida se **non cambiano le condizioni**/scenari nel tempo

Possono però verificarsi **variazioni** negli input:

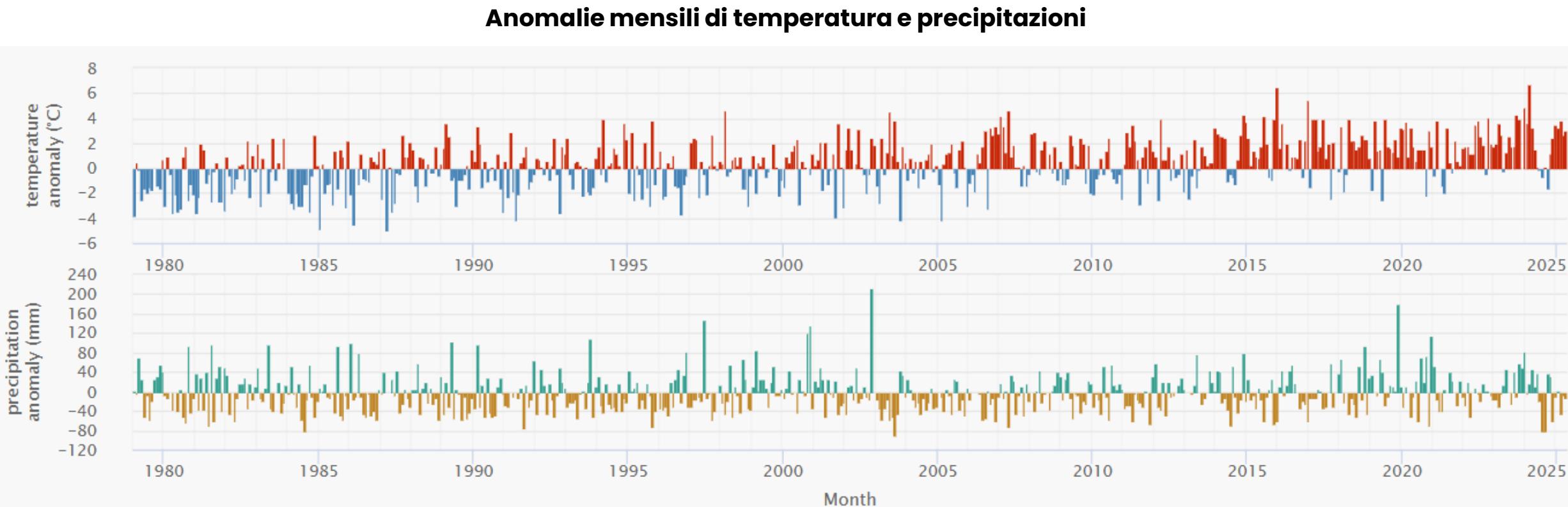


Qualora si abbiano modifiche occorre **ricalcolare** il **rischio** con le nuove condizioni

Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

Quantificazione del rischio

Variazione **frequenza degli eventi e/o magnitudo**: incremento in volume e/o frequenza dovuto allo scioglimento del permafrost (Passo del Rombo - Timmelsjoch (BZ), 2600 m s.l.m., SS44 bis)



meteoblu.com

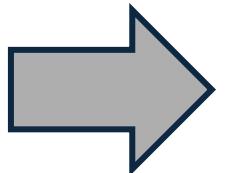
Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

Quantificazione del rischio

Variazione **frequenza degli eventi e/o magnitudo**: incremento in volume e/o frequenza dovuto allo scioglimento del permafrost (Passo del Rombo - Timmelsjoch (BZ), 2600 m s.l.m., SS44 bis)



Cortesia della Provincia Autonoma di Bolzano



$$R(\tau) \approx E \sum_{i=1}^N \left\{ \lambda \tau \mathbf{p}_d(\mu_i) p_r^e(\mu_i) \sum_{j=1}^M V(\psi_j, \mu_i) f_v(\psi, V_B = \mu_i) \Delta \psi_j \right\}$$

Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

Quantificazione del rischio

Variazione delle **condizioni del versante** (Nova Ponente – Deutschnofen (BZ), SS620)

La «**tempesta Vaja**» (fine ottobre 2018, raffiche di vento fino a 200 km/h) → pendii spogli o con alberi caduti (con $15 \cdot 10^6$ alberi caduti) e ha creato le condizioni per la diffusione del **bostrico** e dell'**infestazione** epidemica anche di alberi sani (2019-2020 ad oggi)

«*Nel corso di un **violento temporale accompagnato da forti raffiche di vento**, che si è abbattuto il **6 luglio 2019 tra** le 18:00 e le 19:00, sono stati registrati danni da vento diffusi in Val d'Ega (di Birchabruk, Eggen, Obereggen, Deutschnofen). Il ripido pendio sopra la SS620 tra il km 2+400 e il km 2+750 è stato gravemente colpito: **conifere** sono state quasi completamente **sradicate** su un'area forestale di circa **3 ettari**. Le **opere di protezione dalla caduta massi esistenti** sono state **completamente distrutte**. Anche le barriere di protezione, alcuni muri di sostegno e il manto stradale sono stati danneggiati. [...] sono stati riscontrati diversi blocchi caduti sulla carreggiata [...] sono state preparate simulazioni di caduta massi per garantire il corretto dimensionamento e posizionamento delle strutture di protezione (4 barriere da 5 m, 3000kJ per 240 m + rilevato in terra rinforzata)*»



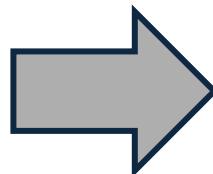
Cortesia della Provincia Autonoma di Bolzano

Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

Quantificazione del rischio

Variazione delle **condizioni del versante** (Nova Ponente – Deutschnofen)

- 3/11/2019: km 2+450: «gli strati superiori del terreno sono scivolati su un'area di precipitazioni. Il materiale si è depositato nella barriera paramassai sottostante sulla strada. Il volume totale che ha iniziato a muoversi ammonta a circa 20000 m³. Sono stati registrati nell'area del pendio interessata durante un temporale con forti venti. Di conseguenza, la **superficie del pendio è stata parzialmente scoperta**»

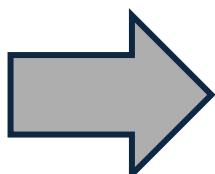


$$R(\tau) \approx E \sum_{i=1}^N \left\{ \lambda \tau p_d(\mu_i) p_r^e(\mu_i) \sum_{j=1}^M V(\psi_j, \mu_i) f_v(\psi, V_B = \mu_i) \Delta \psi_j \right\}$$



Cortesia della Provincia Autonoma di Bolzano

- 08/05/2020: km 2+950 «In seguito alla tempesta “**Vaja**” di fine ottobre 2018, sono stati registrati danni diffusi dovuti al vento. Un secondo **evento** localizzato si è verificato in Val d'Ega **nell'estate 2019**. È stato colpito il pendio molto ripido sopra la SS620 al chilometro 4+950. Lo **sradicamento** di diverse conifere ad alto fusto ha causato un **forte allentamento della superficie del pendio**. Diverse pietre instabili sono state mobilitate»
- 27/04/2023: km 2+400 «si è verificata una frana. Quasi 100 metri sopra la strada, una ceppaia si è ribaltato sul terreno scosceso, **mettendo in movimento due blocchi** di porfido. [...] **L'intero bosco sul versante interessato è stato completamente distrutto da una tempesta di vento durante un forte temporale nel luglio 2019**»



$$R(\tau) \approx E \sum_{i=1}^N \left\{ \lambda \tau p_d(\mu_i) p_r^e(\mu_i) \sum_{j=1}^M V(\psi_j, \mu_i) f_v(\psi, V_B = \mu_i) \Delta \psi_j \right\}$$

Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

Quantificazione del rischio

Variazione dell'**esposizione** (Malles Venosta (BZ), SS41)

09/2014: «il corpo frana ha una velocità di scivolamento fino a 3 m/anno, con volume mobilizzabile a 5-10 milioni di m³. I processi di crollo a monte della SS41 sono legati ad affioramenti rocciosi tra quota 1500-2000 m s.l.m., intensamente fratturati. I crolli non sono arrestati dai valli paramassi, ma rallentati da un pianoro nella zona a nord»

Nuovo tracciato Statale per Tubre: lavori completati

04/06/2014, 09:43

Sono stati completati i lavori per il nuovo tratto della strada statale per Tubre SS 41 che dal 20 maggio scorso è aperta al traffico. La strada è stata costruita, prima con un tracciato provvisorio, dopo la frana verificatasi il 13 gennaio di quest'anno a Laudes nel comune di Malles Venosta.

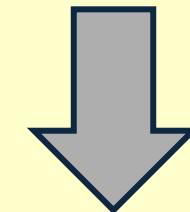


Completati i lavori del nuovo tracciato Statale per Tubre (Foto: Dipartimento lavori pubblici/G.Kiem)

Il tratto interessato è quello compreso tra il chilometro 5,9, prima di ponte Calven, ed il chilometro 6,7, sulla sponda orografica sinistra del rio Ram. In seguito all'evento franoso la strada era rimasta chiusa al traffico per dieci giorni. Quindi, era stata realizzata un'arteria stradale provvisoria su un tracciato nuovo, che è stato utilizzato per costruire ex novo la strada. In tal modo si è potuto risparmiare fondi per la nuova strada che già era in programma.

Partiti nel febbraio 2014, i lavori per il tratto definitivo della SS 41 comprendono la costruzione della strada con doppia carreggiata di 3 metri ciascuna con un nuovo ponte con campata di 18 metri, a partire dall'attraversamento provvisorio su Rio Ram fino all'ultima curva che si collega alla strada esistente. I lavori sono stati eseguiti dall'associazione temporanea d'impresa Mair J. & Co. e Marx S.p.A.-Silandro.

Delocalizzazione degli elementi a rischio: $E=0$



$$R(\tau)=0$$

Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

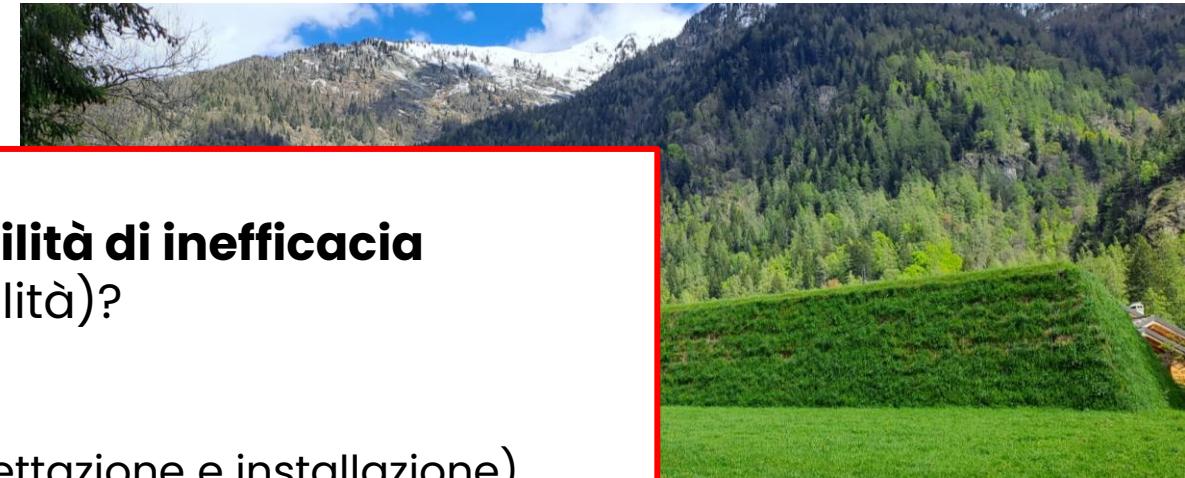
Quantificazione del rischio

Source	Lower Bound (Acceptable)	Upper Limit (Tolerable)
Health and Safety Executive (1989a)	10^{-6} of dangerous dose equivalent to 0.33×10^{-6}	10^{-5} of dangerous dose equivalent to 0.33×10^{-5}
Health and Safety Executive (1988)	10^{-6} broadly acceptable	10^{-3} , divide between just tolerable and intolerable 10^{-4} any individual member of public from large scale industrial hazard
New South Wales Department of Planning (1994)		10^{-6} to 10^{-5}
Hong Kong Government Planning (1994)	Not defined	
BC Hydro (1993)		
ANCOLD (1994) Existing dams		
USBR (Von Thun, 1996)	None stated	
Finlay and Fell (1997)	10^{-5} to 10^{-6} 10^{-3} to 10^{-4} acceptable for property	10^{-3} tolerated

Valori di soglia per il rischio associato a eventi franosi
(Fell & Hartfort, 1997)

Se rischio **non è accettabile**?

Tra le altre misure posso prevedere
un'opera di **protezione**



Qual è la sua **probabilità di inefficacia**
(affidabilità)?

(nell'ipotesi di corretta progettazione e installazione)

Quanto è (o) con l'opera?

$R(\tau) \neq 0$

Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

Quantificazione dell'efficacia delle opere

Affidabilità delle opere di protezione: probabilità di rottura/non intercettazione

Quando avviene un fenomeno:

- c'è una probabilità p_m che il fenomeno abbia volume (magnitudo) m
 ↑
 da analisi in campo
- c'è una probabilità p_v che il fenomeno abbia velocità v
 ↑
 da analisi di propagazione
- c'è una probabilità p_h che il fenomeno abbia altezza h
 ↑
 da analisi di propagazione

L'opera è capace di resistere ad un evento di magnitudo m , velocità v e altezza h ?

SI se: la capacità di assorbimento energetico $> \frac{1}{2} mv^2$
&

l'altezza dell'opera $> h$ + tolleranza (funzione di m)

NO se: una (o entrambe) le diseguaglianze sono false

Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

Quantificazione dell'efficacia delle opere

Affidabilità delle opere di protezione: probabilità di rottura/non intercettazione

Per sapere la probabilità di inefficacia **in un intervallo di tempo τ** , i.e. $p_f(\tau)$?
considerando che l'evento ha una **frequenza** media di accadimento λ ?

$$p_f(\tau) \approx 2 - e^{-\lambda\tau p_{e,h}} - e^{-\lambda\tau p_{e,k}}$$

$p_{e,h}$ inefficacia perché l'opera non intercetta, $p_{e,k}$ inefficacia perché la resistenza è superata

Marchelli et al., 2020; De Biagi et al., 2020; Marchelli et al., 2021, Marchelli et al., 2024

Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

Quantificazione del rischio con opere

In via molto semplificativa, considerando la vulnerabilità per il solo scenario peggiore:

$$R(\tau) \approx p_f(\tau) EV_{worst} W$$

MA QUESTO VALE PER SEMPRE

???

Formula rigorosa

$$R(\tau) = E \int \int_0^\infty \sum_{i=1}^n \left[1 - e^{-\lambda \tau f_1(\mu) f_2^p(\mu) p_{e_i}(\mu)} \right] \Phi_i(\mu) V(\psi, \mu) \tilde{f}_{v,i}(\psi, V = \mu) d\psi d\mu$$

Per ciascun modo i -esimo di inefficacia

Probabilità di **inefficacia** del sistema di protezione per un **dato volume** e per un **evento certo**

Per tenere conto del fatto che, nonostante non sia stata efficace, l'opera esistente modifica l'arrivo dell'evento sugli elementi a rischio

Marchelli et al., 2020; De Biagi et al., 2020; Marchelli et al., 2021, Marchelli & De Biagi, 2023, Marchelli et al., 2024

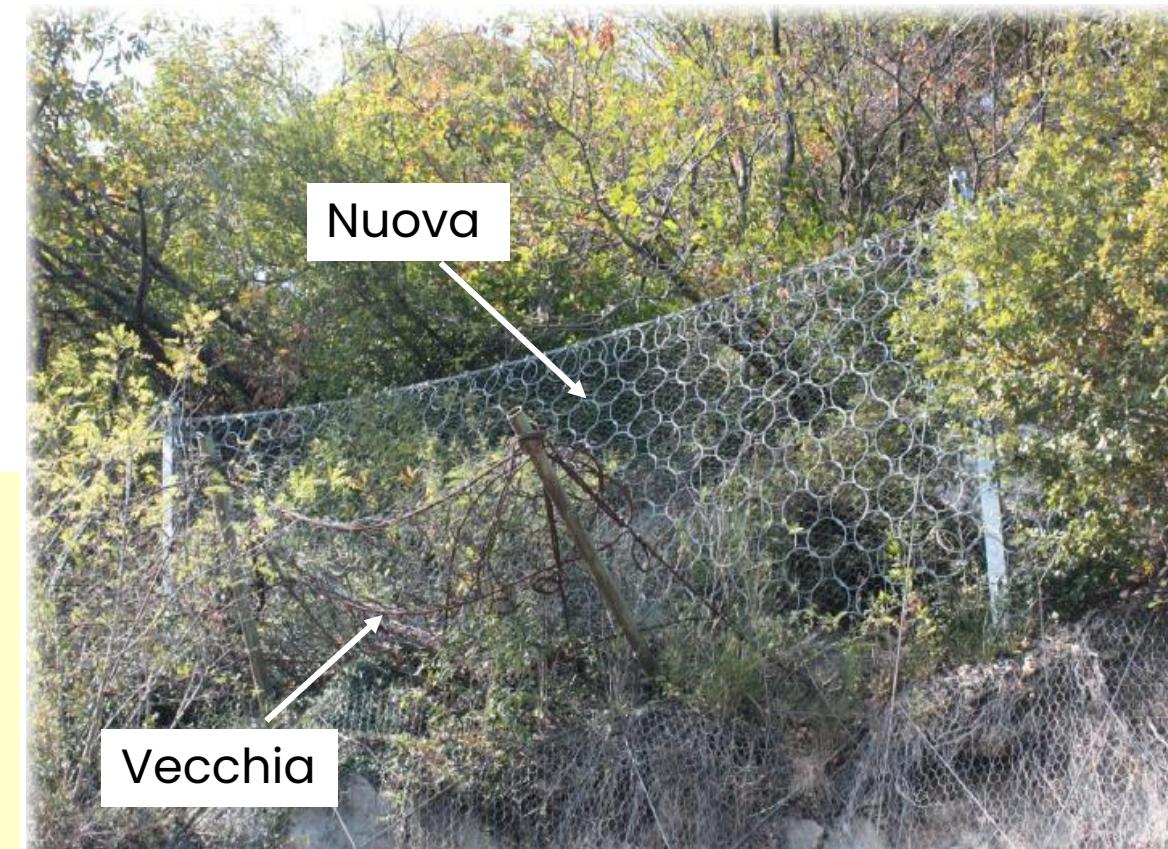
Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

Quantificazione del rischio con opere: è costante nel tempo?

- Come cambia l'efficacia e l'efficienza dell'opera nel tempo?
- Per quanto il rischio è sotto il limite di accettabilità?
- Quando è necessario intervenire per il recupero o sostituzione dell'opera?

Per **garantire** la costanza del **livello di protezione nel tempo** serve un **protocollo** di:

- **Monitoraggio/ispezioni** continue
- Valutazione dello stato delle opere
- Corretta **pianificazione** ed **esecuzione** delle **manutenzioni** (rimozione e sostituzione se necessario)



FONDAMENTALE PER GLI ENTI GESTORI/PUBBLICHE AMMINISTRAZIONI

Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

Quantificazione del rischio con opere: come varia nel tempo?

Ispezioni in sito

Vegetazione interagente



Corrosione



Impatti, presenza di detriti



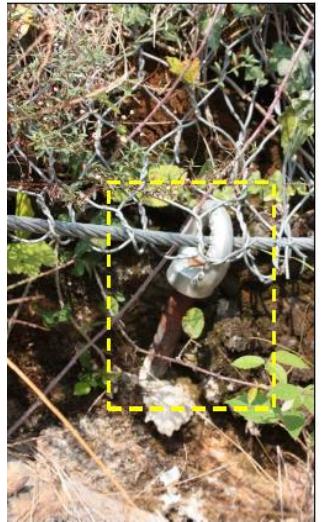
Marchelli et al., (2019), Marchelli (2022), Marchelli et al. (2022)

Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

Quantificazione del rischio con opere: come varia nel tempo?

Ispezioni in sito

Scalzamento delle fondazioni/ancoraggi



Lacerazioni



Elementi di giunzione mancanti



Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

Quantificazione del rischio con opere: come varia nel tempo

- **Procedure di ispezione**
- **Metodo di valutazione semi-quantitativo**
- **Classi di attenzione e priorità di interventi**



Politecnico
di Torino
1859

Dipartimento di Ingegneria
dell'Ambiente, del Territorio
e delle Infrastrutture

VERBALE DI SOPRALLUOGO - SCHEDA DESCRITTIVA E STATO DI CONSERVAZIONE	
BARRIERA PARAMASSI	
Operatore	DIATI - Marchelli M., Vigna S.
Data (GG/MM/AAAA)	15-06-2021
Comune - Località	Brusson
Codice Barriera	B_BR1
<i>Collocamento geografico dell'opera :</i>	
	
Punto di collocazione dell'opera	45°45'10.05"N 7°44'22.59"E
In caso di prossimità ad un elemento stradale:	SR45 Progressiva km ^(a) Km 14,8
<small>(a) riferimento alle progressive ettometriche stradali ANAS</small>	
DESCRIZIONE DELLA BARRIERA PARAMASSI	
<small>Informazioni di carattere generale sulla barriera paramassi:</small>	
Tipologia di barriera paramassi	<input type="checkbox"/> Barriera rigida; <input type="checkbox"/> A ridotta deformabilità; <input checked="" type="checkbox"/> Ad elevata deformabilità;
Lunghezza complessiva dell'opera (m)	50
Numero campate (-)	5
Altezza barriera (m)	3 - 3,5
<small>Informazioni di dettaglio sulla barriera paramassi:</small>	
Produttore	MACCAFERRI
Scheda descrittiva barriera paramassi e relativo stato di conservazione	
1	

Componente	Parametro di controllo	Giudizio esperto Livello di danno	SITUAZIONE CRITICA NECESSITA' DI INTERVENTO IMMEDIATO	Note integrative (opzionali)
Vie d'accesso	Presenza di materiale vegetale e/o arbusti infestanti che ostruiscono l'accesso all'opera	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2		
Versante	Presenza di vuoti al piede della barriera	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2		Estensione (n° campate interessate/numero campate totale) Localizzazione (identificando la/e campata/e interessata/e) Documentazione fotografica
Rete principale	Presenza di elementi che limitino la capacità deformativa della barriera (e.g. e.g. specie vegetali ad alto fusto o cespugli a ridosso della barriera, interferenza tra stendimenti)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2		Numero di campate interessate
	Presenza di detriti/blocchi/tronchi nella rete derivanti da piccoli dissesti locali o dall'azione della neve	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2		Estensione (n° campate interessate/numero campate totale) Documentazione fotografica
	Presenza di blocchi derivanti da un impatto (B)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2		
	Presenza di sterpaglie, specie vegetali arbustive e/o rampicanti nella rete	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2		
	Lacerazioni della rete	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2	Nel caso B è necessario prevedere l'immediato ripristino	Estensione (n° campate interessate/numero campate totale) Localizzazione (identificando la/e campata/e interessata/e) Documentazione fotografica
	Deformazioni	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2		Estensione (n° campate interessate/numero campate totale) Localizzazione (identificando la/e campata/e interessata/e) Documentazione fotografica

Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive

Quantificazione del rischio con opere: come varia nel tempo?

- Procedure di ispezione
- **Metodo di valutazione semi-quantitativo**
- Classi di attenzione e priorità di interventi

Durante l'ispezione a ciascun parametri di controllo della check list deve essere associato un **livello di danno**

- d0= nessun danno
- d1= danno moderato
- d2=danno intenso

Tre **classi di importanza** C sono state identificate e associate a ciascun parametro di controllo :

- C1=poco importante
- C2=mediamente importante
- C3=molto importante

c/ d	C1	C2	C3
d0	P _i =0	P _i =0	P _i =0
d1	P _i =1	P _i =2	P _i =3
d2	P _i =2	P _i =3	P _i =5

c/ d	0	C2	C3
d0	A0	A0	A0
d1	A0	A1	A1
d2	A0	A1	A2

$$P_{TOT} = P_{TOT} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{P_{max}}$$

$$A_{TOT} = \text{worst}(A_{1, \dots, n})$$

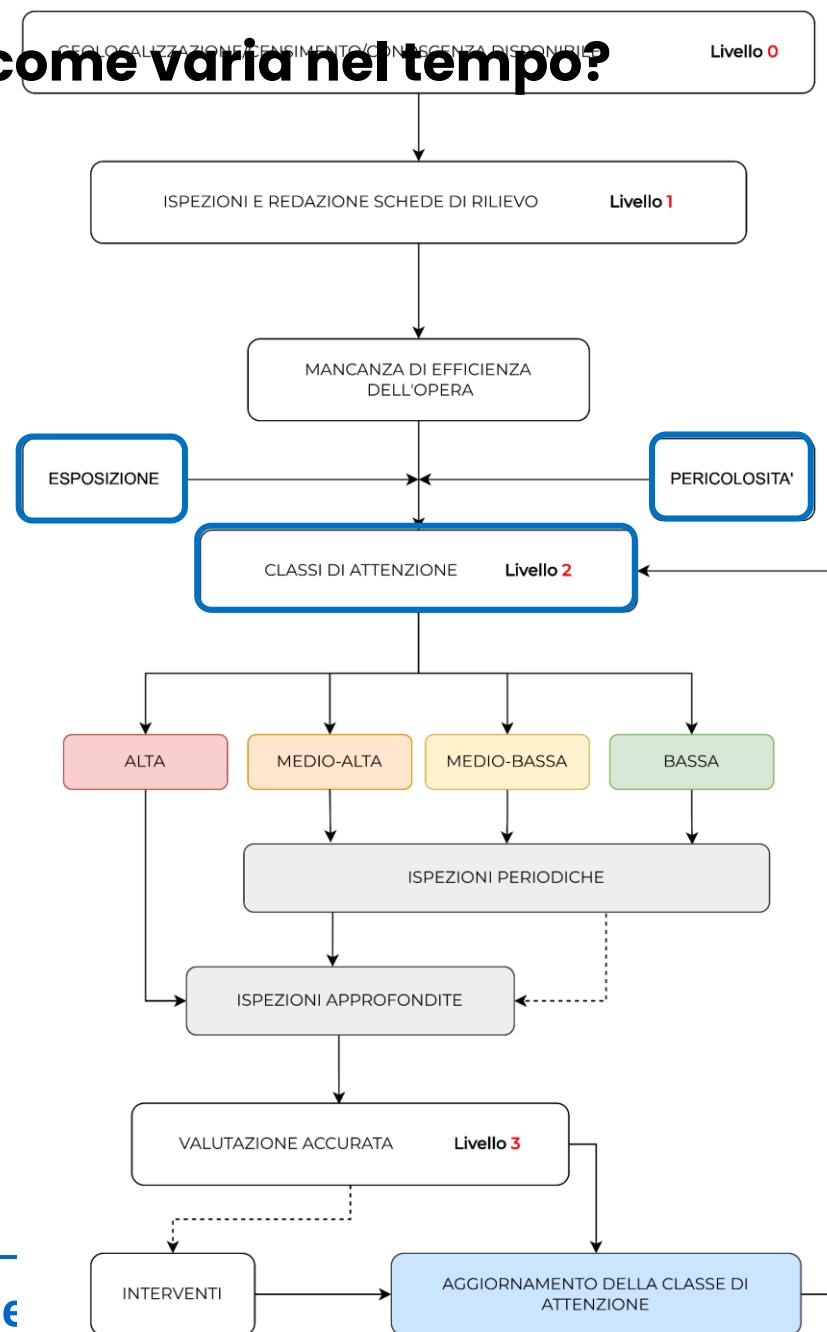


Livello di difettosità

Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

Quantificazione del rischio con opere: come varia nel tempo?

- Procedure di ispezione
- Metodo di valutazione semi-quantitativo
- **Classi di attenzione e priorità di interventi**



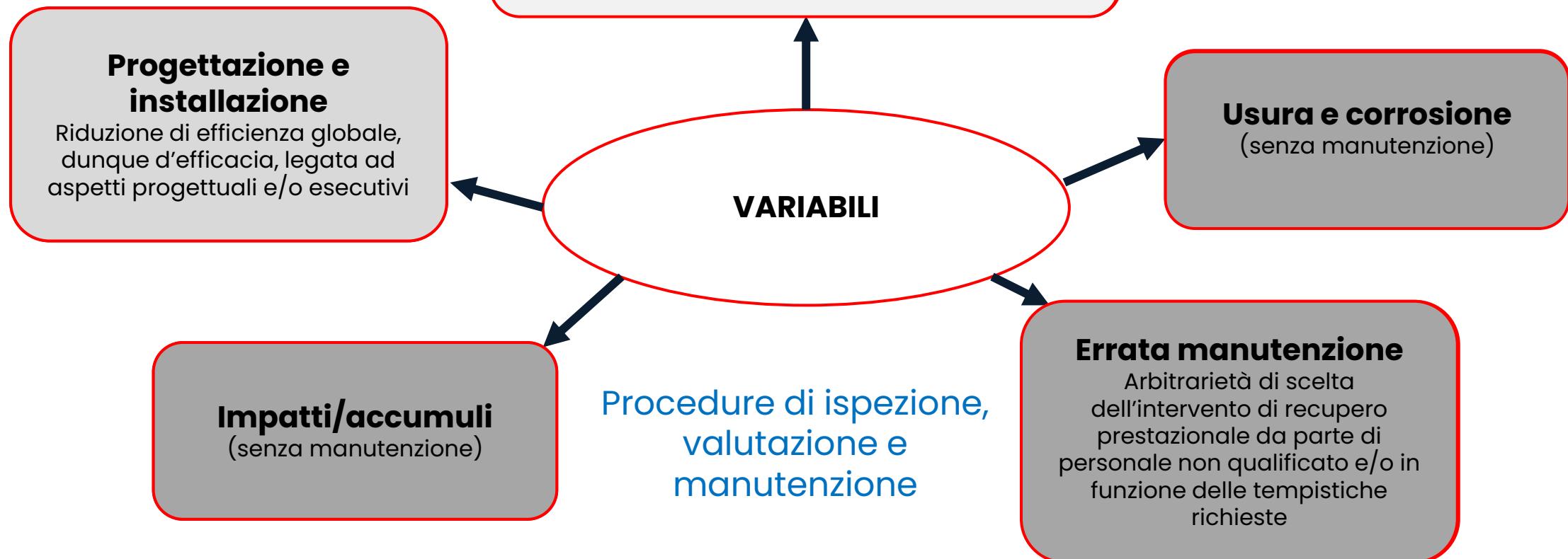
Tavolo tecnico coordinato da PoliTo: «Proposta di una metodologia per la gestione delle barriere paramassi a rete esistenti attraverso l'individuazione di classi di attenzione in funzione del rischio»

Dal rischio residuo al rischio accettabile

Riassumendo

Quali sono le variabili principali?

Design per uno specifico indice di affidabilità e controllo in cantiere dell'installazione



Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

Bibliografia

- Marchelli, M., De Biagi, V., & Chiaia, B. (2024). A fully probabilistic framework to compute the residual rockfall risk in presence of mitigation measures. *Landslides*, 1-8.
- Marchelli, M., Paganone, M., Bertolo, D., De Biagi, V., Peila, D., Vigna, S. (2022). A tool for monitoring rockfall protection works and plan the maintenance: the case of the Autonomous Region of Valle d'Aosta. GEAM Geoingegneria Ambientale e Mineraria
- Marchelli, M., De Biagi, V., Bertolo, D., Paganone, M., Peila, D. (2021) A mixed quantitative approach to evaluate rockfall risk and the maximum allowable traffic on road infrastructure. GEORISK, vol., pp. 1-11.
- Marchelli, M., De Biagi, V., Peila, D. (2021) Reliability-based design of rockfall passive systems height. International journal of rock mechanics and mining sciences, vol.139, pp. 104664.
- De Biagi, V., Marchelli, M., Peila, D. (2020) Reliability analysis and partial safety factors approach for rockfall protection structures. Engineering structures, vol.213, pp. 110553
- Marchelli, M., De Biagi, V., Peila, D. (2020) Reliability-Based Design of Protection Net Fences: Influence of Rockfall Uncertainties through a Statistical Analysis. GEOSCIENCES, vol.10, pp. 280-1-280-24
- Marchelli, M. (2020) Una procedura speditiva per la valutazione dello stato di conservazione delle barriere paramassi a rete. GEAM. Geoingegneria ambientale e mineraria, vol.160, pp. 24-35.
- Marchelli, M., De Biagi, V., Peila, D. (2019) A quick-assessment procedure to evaluate the degree of conservation of rockfall drapery meshes. Frattura e integrità strutturale, vol.47, pp. 437-450

GRAZIE PER LA CORTESE ATTENZIONE

maddalena.marchelli@polito.it



Politecnico
di Torino

Department of Environment,
Land and Infrastructure
Engineering



Funded by
the European Union
GA 101103401

Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

16 maggio 2025 – Aula magna CNR, Piazzale Aldo Moro 7 - Roma