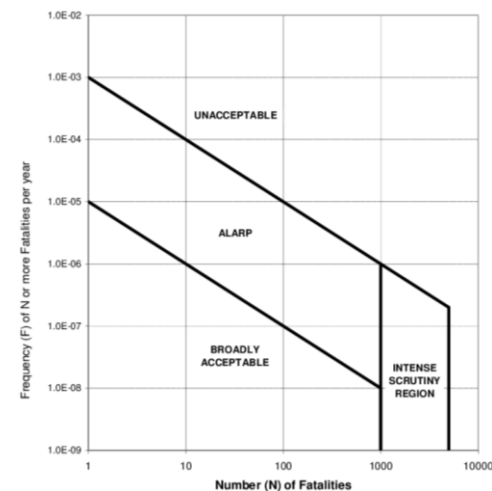
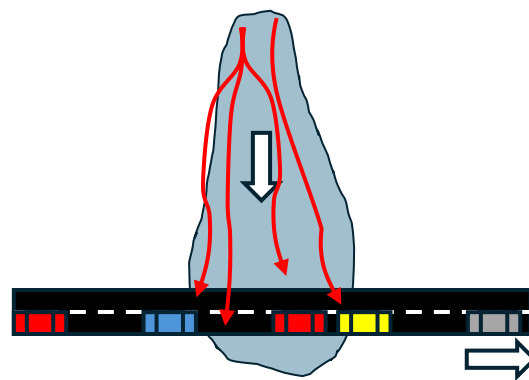
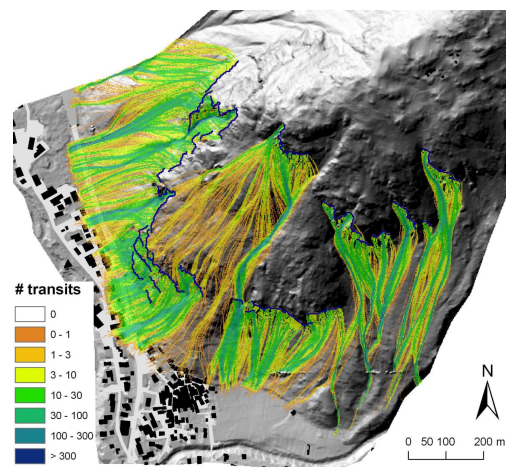
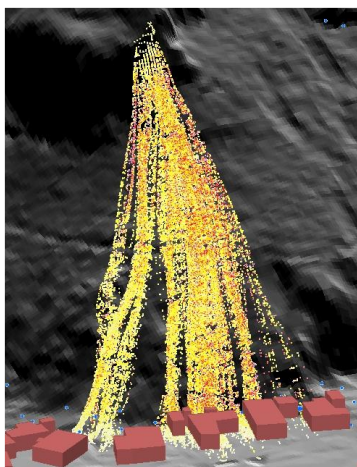
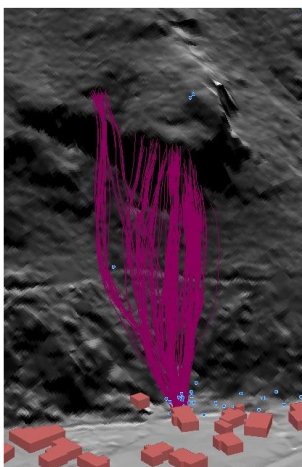


# Analisi quantitativa del rischio per frane a cinematica rapida: *stato dell'arte e limiti*

**Giovanni Crosta**  
(Dip. Scienze Ambiente e Terra, Università Milano Bicocca)

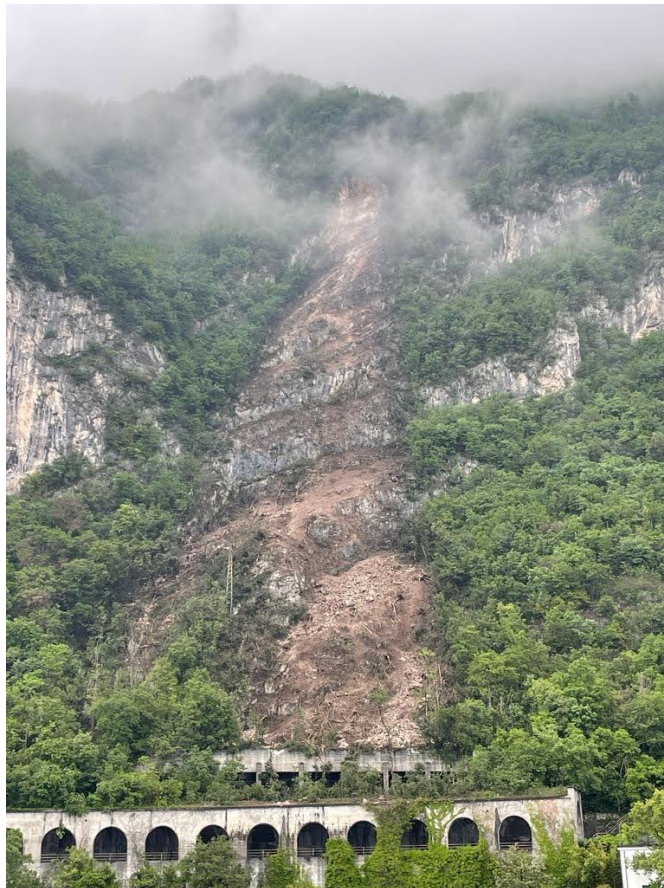


16 maggio 2025  
Aula magna CNR - Roma



**RISCHIO** = probabilità,  $P$ , che si verifichi un **evento** avverso, dando luogo a una **perdita** ( $L$ ) anche in termini di perdita attesa,  $E(C)$ , entro un determinato **periodo di tempo**.

$$R = f(P, L) = E(L) \rightarrow R = H \times V \times W$$



1. Definizione dell'**evento** → cinematica rapida
2. Identificazione di **fattori chiave** e loro **probabilità**
3. **Combinazione** delle probabilità

## Considerazioni:

- **Disponibilità dei dati:** completezza, affidabilità, errori sistematici, accuratezza, eventi estremi
- **Complessità:** del fenomeno, instabilità, modalità di propagazione
- **Probabilità:** valori,  $P$ . combinate e condizionali
- **Dipendenza Spaziale e Temporale:** variabilità spaziale, scala, fenomeni potenzialmente associati
- **Vulnerabilità:** in funzione del fenomeno, dell'intensità e dell'elemento esposto
- **Stazionarietà:** condizioni iniziali ammasso, innescanti, elementi, esposizione

## Potenziati approcci alla stima:

- **Analisi dei dati storici:** utilizzare metodi statistici per stimare le probabilità
- **Valutazioni esperte:** geologi, ingegneri, esperti di sicurezza, personale manutenzione
- **Fault Tree Analysis (FTA) o Event Tree Analysis (ETA):** approcci rispettivamente top-down e bottom-up
- **Simulazioni:** per modellare eventi casuali e fornire una stima della probabilità complessiva
- **Analisi geospaziale**

**Rischio individuale di fatalità:** probabilità di morte sperimentata dagli individui esposti (abitanti, passeggeri) a causa di pericoli specifici.

- **Rischio individuale annuo specifico della posizione (LSIR):** per un individuo ipotetico sempre presente in un determinato luogo. Utile per mostrare la distribuzione spaziale del rischio.

- **Rischio individuale annuo specifico (ISIR):**

*LSIR \* tempo reale esposizione*

tenendo quindi conto del tempo trascorso altrove. Questa metrica è più realistica per individui in movimento che sono raramente esposti e consente confronti con i rischi di fondo della vita quotidiana.

- **Rischio individuale per ora:**

*(LSIR o ISIR) / tempo di esposizione*

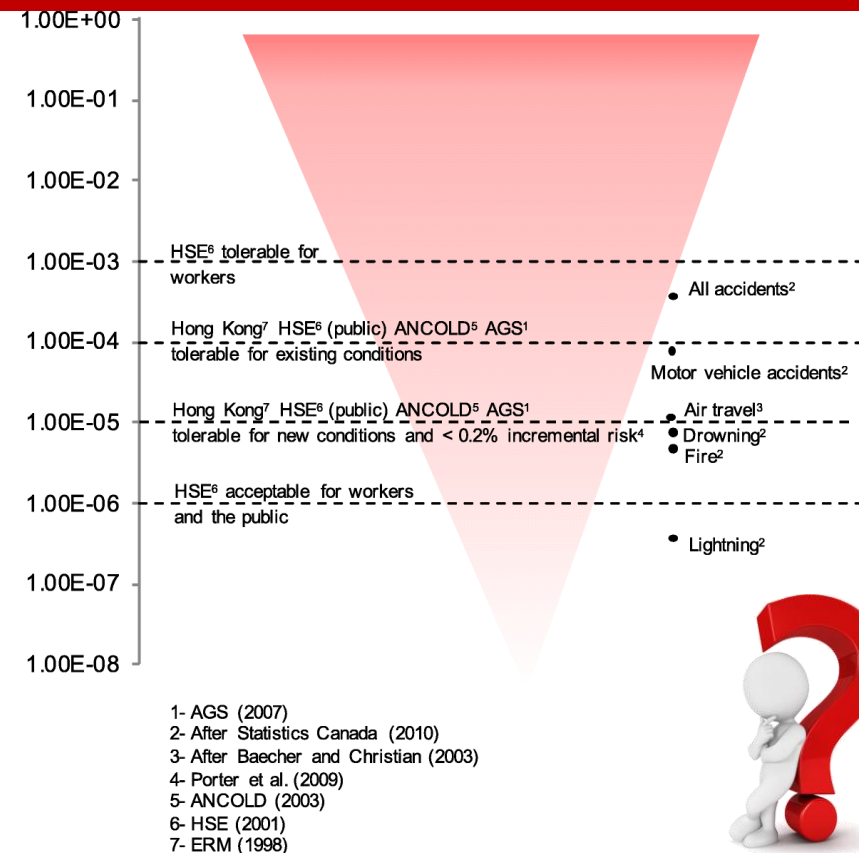
Espresso anche come tasso di incidenti fatali (FAR) per 100 milioni di ore di esposizione:  $[LSIR / \text{ore in un anno (8760)}] * (10^8)$ , in genere compreso tra 1 e 100.

In genere per valutazioni occupazionali (lavorative)

- **Rischio individuale per chilometro percorso:**

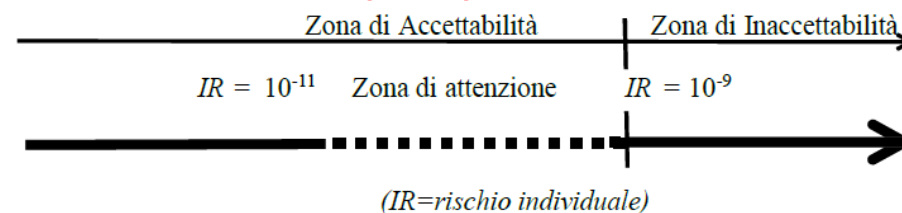
*(LSIR o ISIR) / distanza percorsa nel periodo di esposizione*

Metrica utilizzata per valutare i rischi legati ai trasporti, può risultare fuorviante nel confronto tra **modalità di trasporto rapide e lente** e per quali **tipi di pericolo (Infrastruttura, Rotabile, Naturale, Sost. Pericolose)**



*IR (km/anno) → soglia \* km/anno*

*Per quali pericoli? E TLE?*

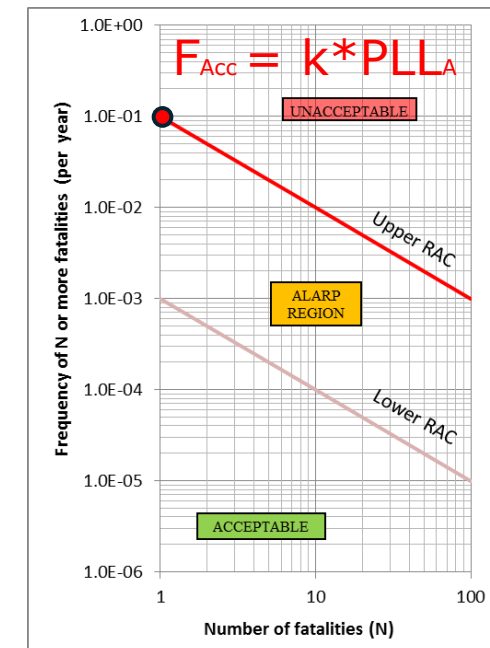


*Tavola 1: Limiti di accettabilità del rischio individuale*

**Rischio sociale** (o di **gruppo**) di **fatalità**: probabilità di morte sperimentata dall'intero gruppo di persone coinvolte

- **Numero medio di fatalità all'anno, o tasso annuo di fatalità, perdita potenziale di vite umane (PLL), valore atteso o tasso di mortalità**
- **Rischio di lesioni**: aggiunti ai rischi di fatalità tramite pesatura
- **Matrice del rischio**: frequenza (o probabilità) degli eventi e la loro conseguenza (o gravità). Consente il confronto di diversi tipi di pericolo e conseguenze, ma solitamente non rappresenta il rischio totale associato all'attività
- **Curva FN**: frequenza cumulativa annua (F) di eventi che comportano N o più fatalità  $\rightarrow F(N) = FN^{-b}$ . Utilizzata per illustrare i rischi catastrofici, anche se la sua forma cumulativa è spesso considerata di difficile interpretazione
- Da interpretare per confronto con limiti accettabilità  **$F(N) = F_{Acc} N^{-b}$**

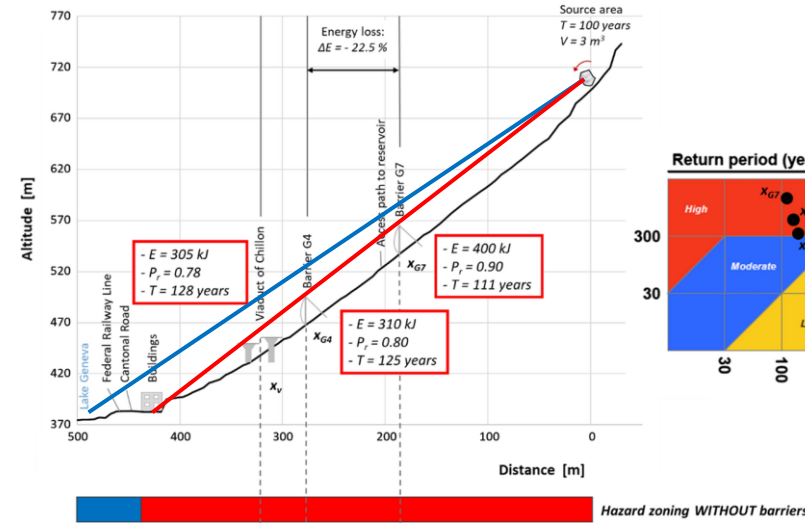
Increasing probability ↑	High	ALARP	No	No
	Medium	OK	ALARP	No
	Low	OK	OK	ALARP
		Low	Medium	High
		Increasing severity →		



### Cono d'ombra (caduta massi)

Basati su un **metodo pratico** che prevede un giudizio del soggetto basato sull'esperienza:

- regole empiriche
- ipotesi plausibili
- giudizio intuitivo
- ipotesi o un buon senso



Jaccard et al., 2020

### Matrice per colate detritiche

			Probability of occurrence, P		
			High	Medium	Low
Intensity, I	h > 1.0 m and v > 1.0 m/s	High	High	High	Moderate
	h < 1.0 m or v < 1.0 m/s	Medium	Moderate	Moderate	Low
	non existent	Low	Low	Low	Very Low
Not affected areas			Very Low	Very Low	Very Low

Hürlimann et al(2008)

### Applicazioni e limiti

- Stima non rigorosa della probabilità
- Definizioni qualitative
- Intensità non sempre presa in considerazione
- Grandi incertezze

Categoria	Frequenza	Soglia frequenza annua
Frequente	Probabile che l'evento si verificherà frequentemente continuamente.	1 - 10
Probabile	Si verificherà molte volte. L'evento pericoloso si verificherà spesso.	0.1 - 1
Occasionale	Probabile che l'evento pericoloso si verificherà molte volte.	0.01 - 0.1
Remoto	Probabile che si verifichi qualche volta durante la vita del sistema.	0.001 - 0.01
Improbabile	Improbabile, ma possibile. L'evento possa eccezionalmente verificarsi.	1.E-05 - 0.001
Inverosimile	Estremamente improbabile. Si assume che l'evento pericoloso non possa verificarsi: → l'evento pericoloso è considerato inverosimile qualora non si sia mai verificato, nel sistema e nel contesto considerati o in altri contesti assimilabili.	< 1.0E-05

### Matrici Rischio Trasporti

Frequenza di accadimento di un evento pericoloso (causato da un pericolo)	Linea Guida ANSFISA Matrice per trasporto merci pericolose			
	Categorie di Stima del Rischio			
Frequente	Indesiderabile	Intollerabile	Intollerabile	Intollerabile
Probabile	Tollerabile	Indesiderabile	Intollerabile	Intollerabile
Occasionale	Tollerabile	Indesiderabile	Indesiderabile	Intollerabile
Remoto	Trascurabile	Tollerabile	Indesiderabile	Indesiderabile
Improbabile	Trascurabile	Trascurabile	Tollerabile	Indesiderabile
Estremamente improbabile	Trascurabile	Trascurabile	Trascurabile	Tollerabile
	Insignificante	Marginale	Critico	Catastrofico
Gravità di evento pericoloso (causato da un pericolo)				

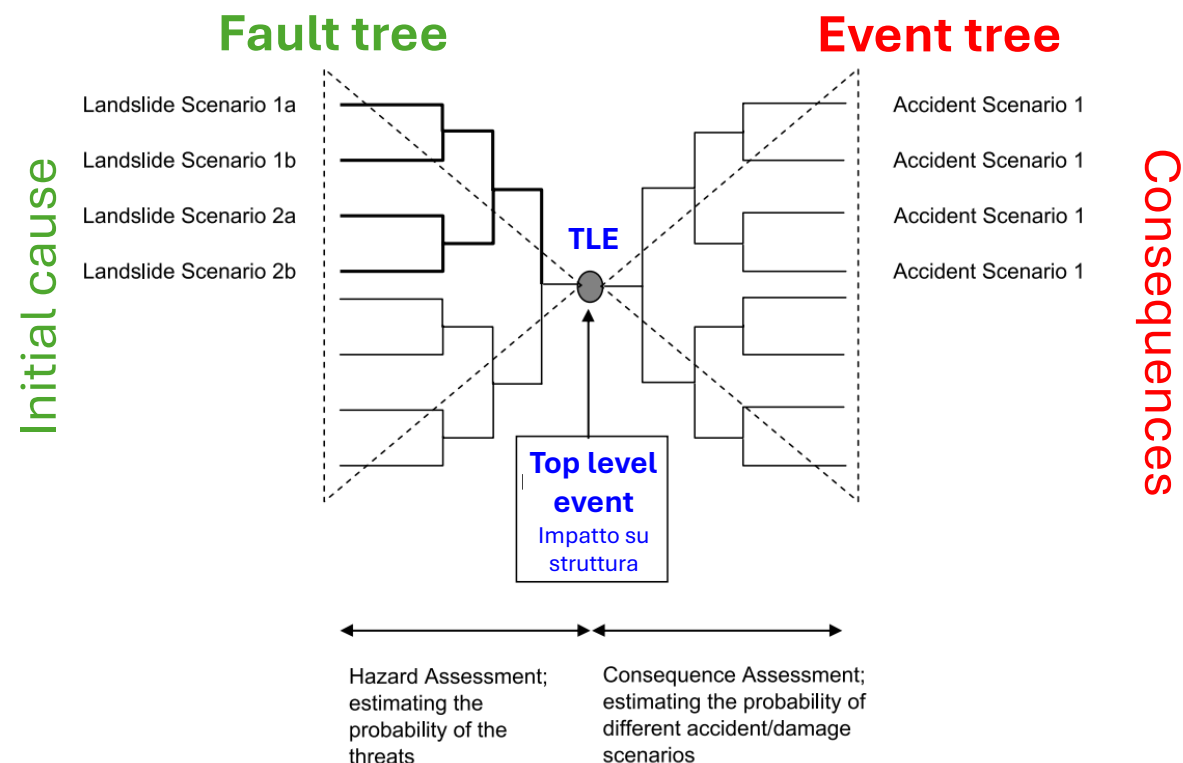
**Deriva dall'approccio dell'albero dei guasti, utilizzato in ingegneria per la valutazione di potenziali guasti di un sistema**

- evento iniziale, caratterizzato da una certa **probabilità di accadimento**
- nodi con una serie di effetti (rami), ciascuno con una **probabilità condizionata**
- probabilità di ogni foglia finale, può essere espressa come una **probabilità congiunta** (di eventi dipendenti)

### Applicazioni e limiti

- Adatto per pericoli caratterizzati da pochi scenari discreti possibili
- Poco adatto per pericoli che possono verificarsi con intensità diverse (terremoti, frane...)

## Bow Tie plot





Probabilità di superare una certa intensità in un determinato periodo di tempo

Mappa della pericolosità:

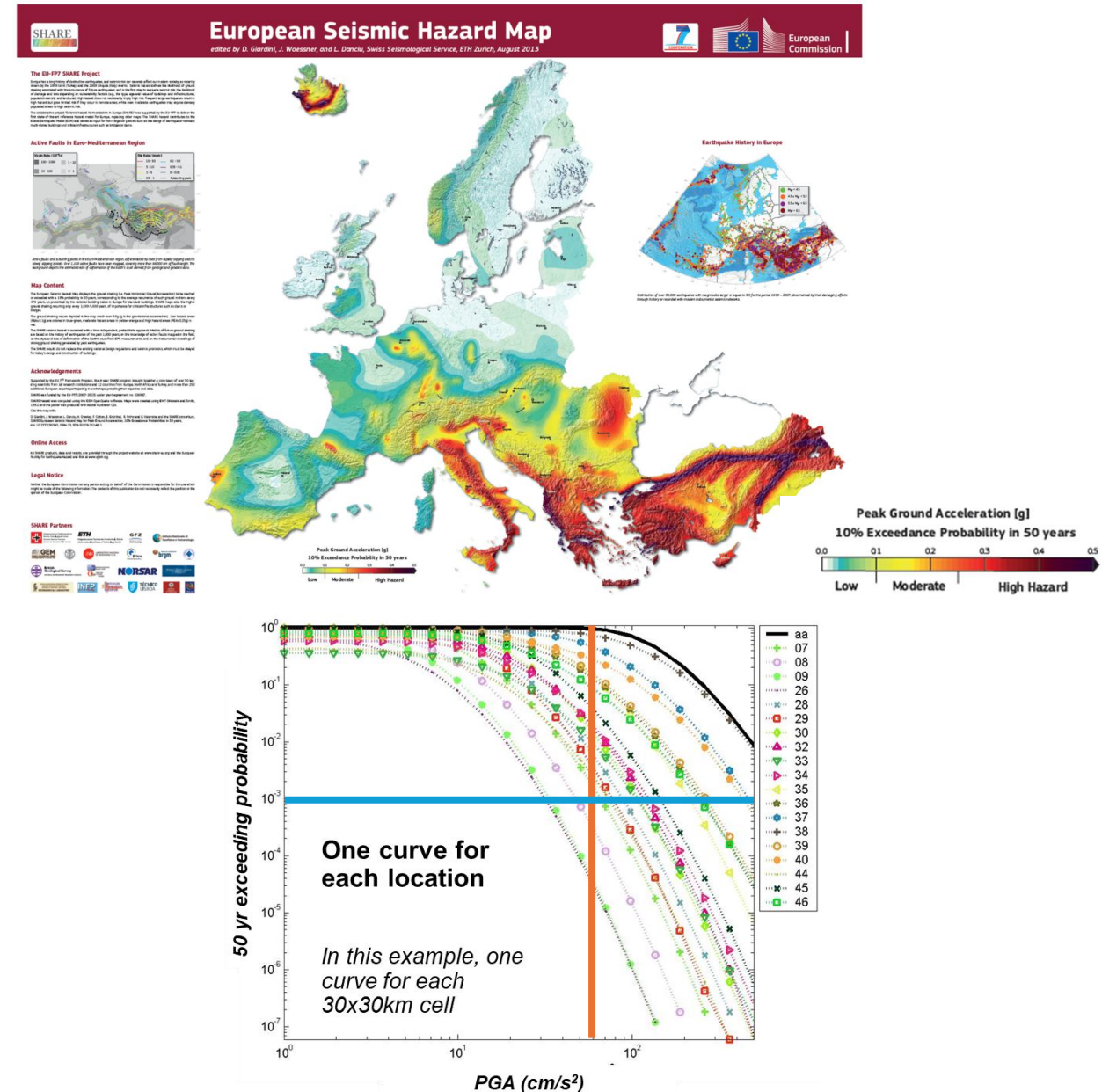
ogni curva di pericolosità (una per ogni posizione) deve divenire un singolo valore da riportare

- per valore di intensità:

mappa probabilità di superamento (T)

- per valore di probabilità di superamento:

mappa dell'intensità



**Rischio per le vittime** può essere espresso come **numero annuo di vittime** (o perdita di vite umane),  $E[LOL]$

$$E[LOL] = \underbrace{P_L(M) \cdot P_{S/L}(I/M)}_{\text{Pericolosità}} \cdot P_{T/S} \cdot V_{D/T}(I)$$

$P_L(M)$ : **probabilità di frana** con una certa magnitudo (volume)

$P_{S/L}(I|M)$ : probabilità **di transito** → probabilità raggiungimento di un punto con una certa intensità locale  $I$  (energia cinetica) data la magnitudo di inizio

$P_{T/S}$ : probabilità **di colpire un elemento a rischio**. Probabilità spazio-temporale

$V_{D/T}(I)$ : **vulnerabilità** elemento a rischio per data intensità (probabilità **perdita vita**)

Pericolosità

→ Esposizione

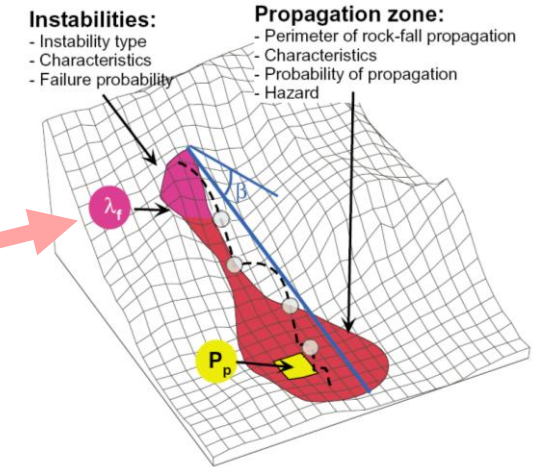
→ Vulnerabilità



$$E[LOL] = P_L(M) \cdot P_{S/L}(I/M) \cdot P_{T/S} \cdot V_{D/T}(I)$$

$P_L(M)$ : Probabilità di distacco di una frana di un certo volume (i.e., magnitude o intensità)

Probabilità  
distacco =  $f_o$



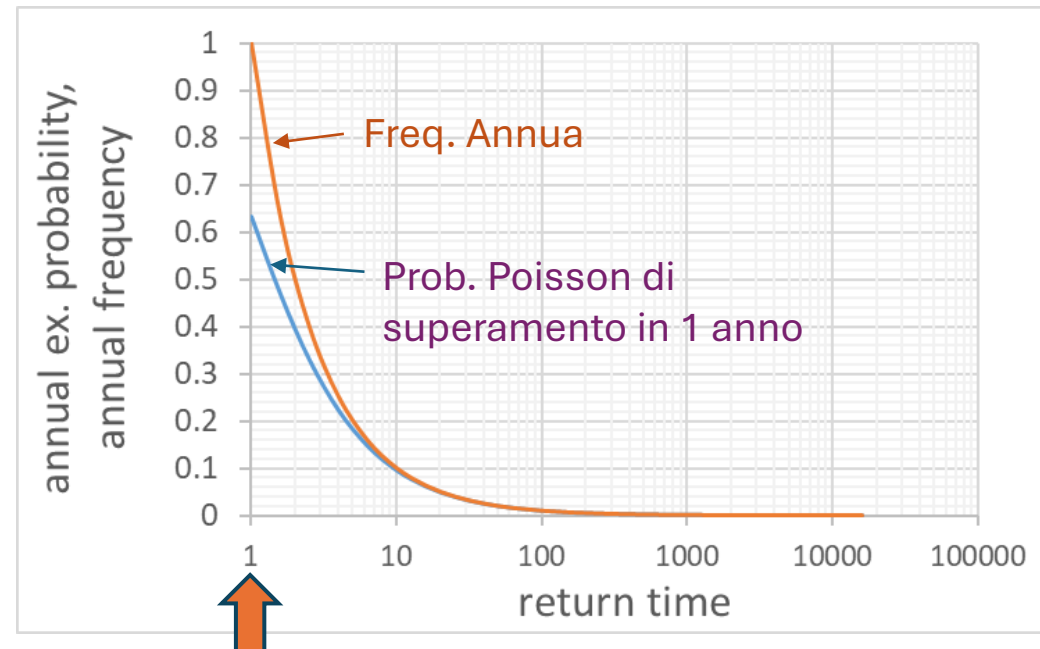
**Freq. annua anziché Prob.**

**Superamento:**

- appropriata per eventi a bassa frequenza
- Modello Poisson
- eventi indipendenti
- eventi possono assumere qualsiasi livello di energia

$$P[I > i] = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-\frac{t}{T}}$$

quando  $T > 10$ ,  $P[I > i] \approx \frac{1}{T}$





Caso di studio 1:  
Crollo di Varenna,  
19 maggio 2023



0 5 10 m

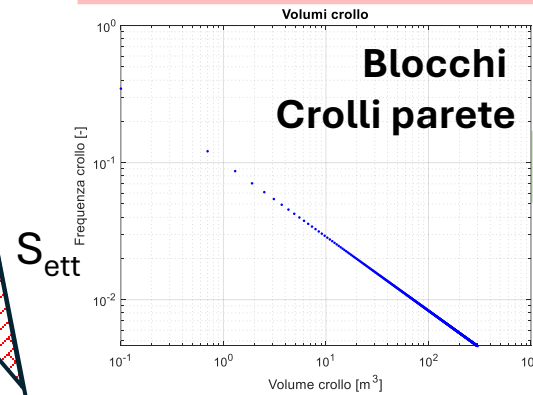
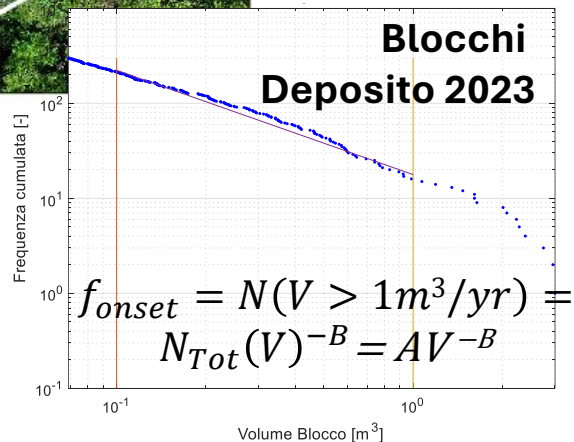
$$R = \int_{V_{min}}^{V_{max}} F dV$$

(mm/yr)

**Slope activity**  
 $A_{ST.ett}$   
(#crolli > 1 m<sup>3</sup>/yr/ett)

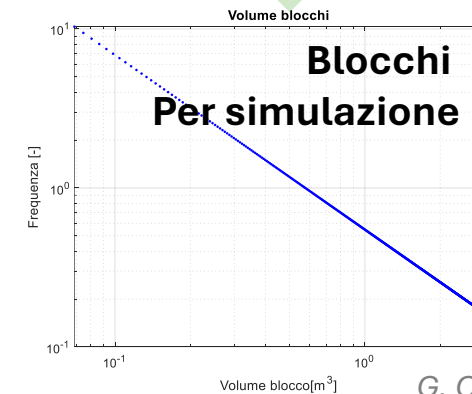
$$A_{ST.ett} = 10^{-\log(10 \cdot \text{spacing})}$$

GSI



$$R = \frac{A_{st} V_{max}^{1-B}}{(1-B)} - \frac{A_{st} B V_{min}^{1-B}}{(1-B)}$$

$$a_{ST} = \frac{(1-b)R}{v_{max}^{1-b} - b v_{min}^{1-b}}$$

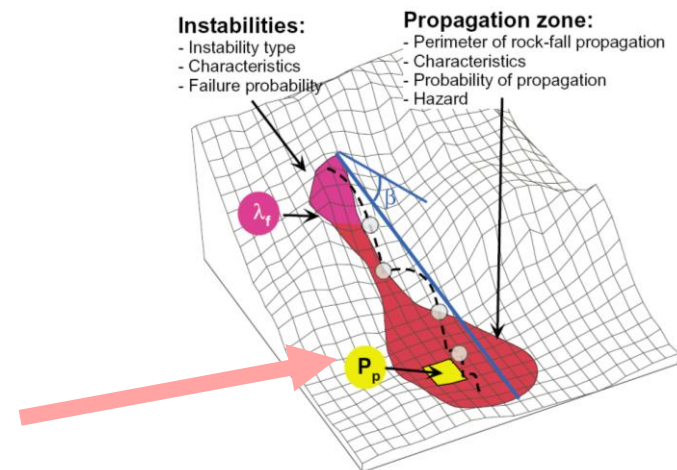


$$E[LOL] = P_L(M) \cdot P_{S|L}(I/M) \cdot P_{T/S} \cdot V_{D/T}(I)$$

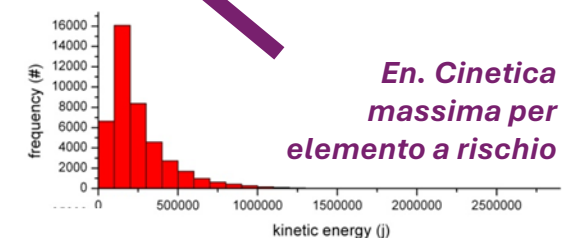
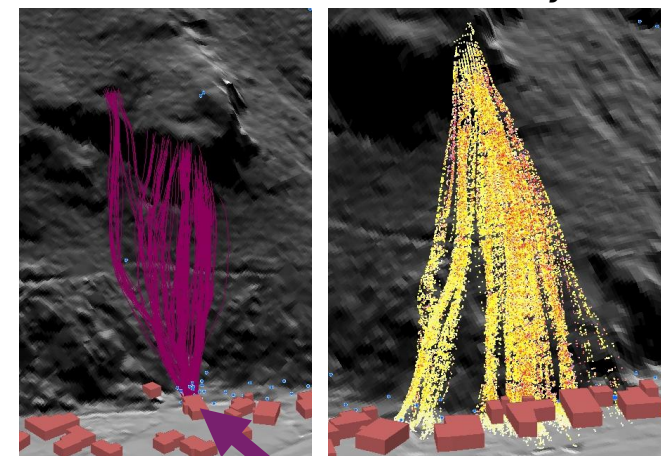
$P_{S|L}(I|M)$ : probabilità di transito o raggiungimento di un punto con una certa **intensità I** (i.e., en. cinetica) data la magnitude iniziale (se con frammentazione → Freq. Transito =  $f_t$  la stima è più complessa)

Quantificare frequenza di transito e energie correlate richiede:

- **simulazione** della propagazione (crolli, colate, valanghe roccia)
- **indicatore dell'intensità locale** appropriato e correlato al potenziale di generare danno (es.: energia cinetica, velocità, pressione d'impatto, profondità, velocità di spostamento)
- **metodo per combinare le diverse intensità** derivate da diverse aree sorgente e/o dall'incertezza sulla propagazione



Codice *Hystone*





Risultati in termini di  
probabilità di transito

Assunzione blocchi di ogni volume  
da ogni cella

Per diversi scenari di volume  
rilasciato

**Scenari di Volume:**

**$0.01 \text{ m}^3$**

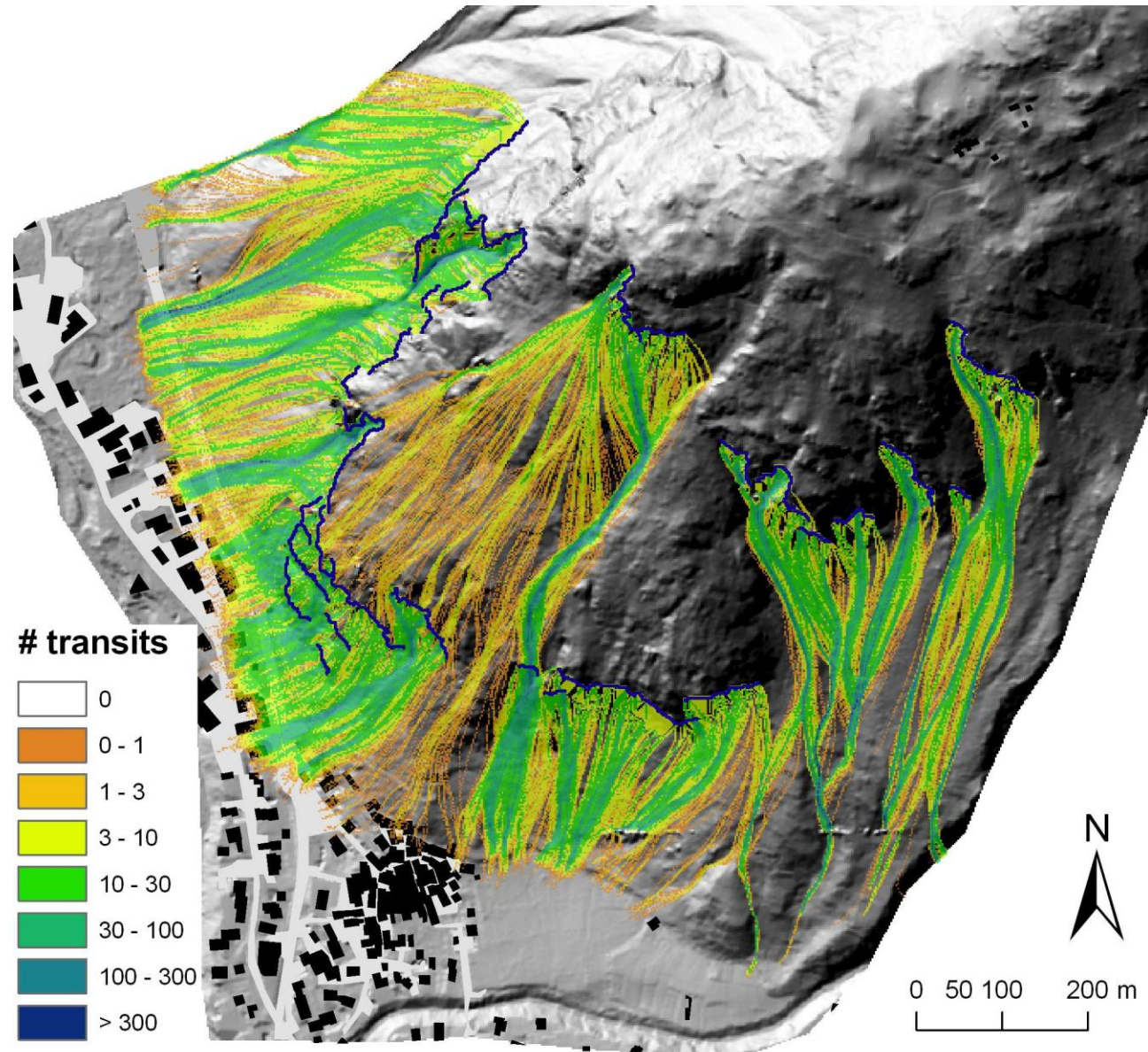
**$0.1 \text{ m}^3$**

**$1 \text{ m}^3$**

**$10 \text{ m}^3$**

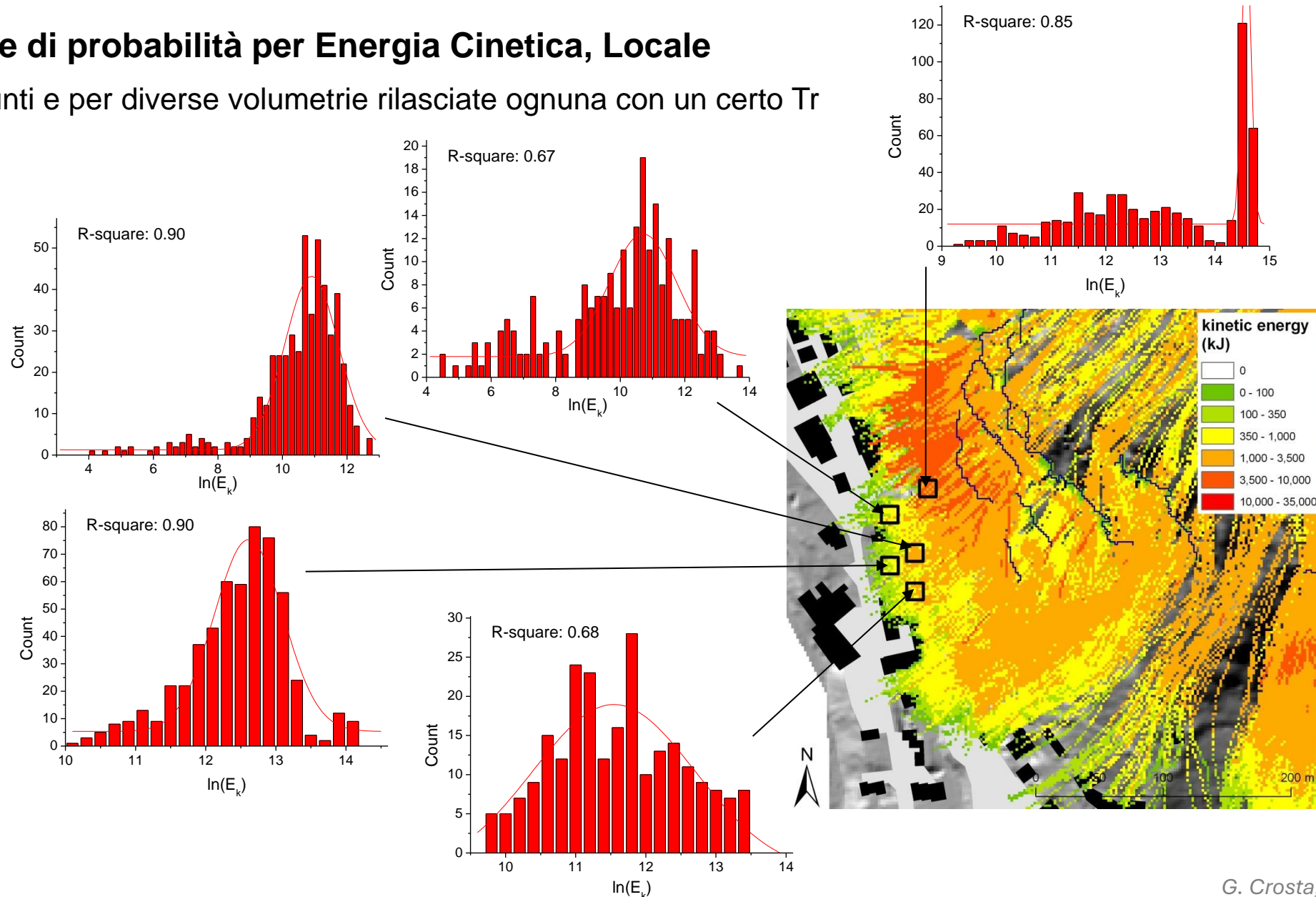
**$100 \text{ m}^3$**

Diverse Energie  
cinetiche per punto  
per scenario



## Distribuzione di probabilità per Energia Cinetica, Locale

- per diversi punti e per diverse volumetrie rilasciate ognuna con un certo Tr



- Prob. superamento di valore i-esimo Energia Cinetica ( $E_k$ ) (*scenario*)

$$Ps(I > i) = \int_{I_c}^{\infty} p(I) dI \quad Ps(I) : \text{PDF di } E_k \text{ alla posizione } z \quad (\text{MODELLO})$$

- Frequenza annua di superamento del valore i-esimo (*scenario*)

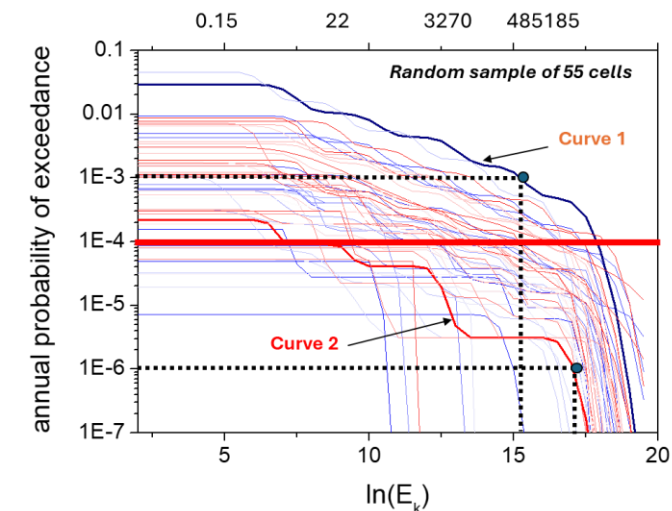
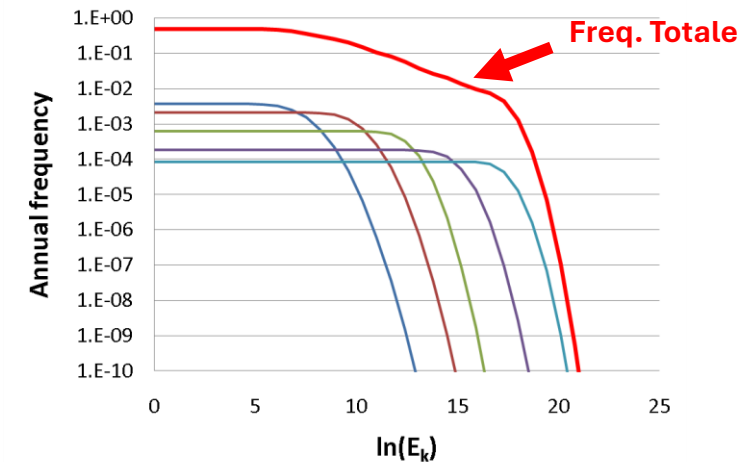
$$Fs(I > i) = \underbrace{f}_{\text{INVENTARIO}} \cdot Ps(I > i) \quad \text{ove } f \text{ è la frequenza annua di accadimento}$$

- Frequenza Annua di accadimento:  $\underbrace{f}_{\text{INVENTARIO}} = \underbrace{f_{\text{onset}}}_{\text{MODELLO}} \cdot f_{\text{reach}} = f_{\text{onset}} \cdot \left( \frac{\text{cell transit}}{\text{total transit}} \right)$   
(*scenario*)

- Freq. Totale Annua di superamento (*Integrata per tutti gli scenari*)

$$F_{tot}(I > i) = \sum_{s=1}^N F_s \cdot P_s(I > i) \quad \text{con } s: \text{scenario di magnitudo dell'evento}$$

- Probabilità di superamento di  $i$  in  $T$  anni – Processo Poissoniano  
(*Integrata per tutti gli scenari*)  $P_{\text{poisson}}(I > i, T) = 1 - e^{-F_{tot} \cdot T}$



Lari S., Frattini P. & Crosta G.B. (2014)

G. Crosta, Roma 16 maggio 2025



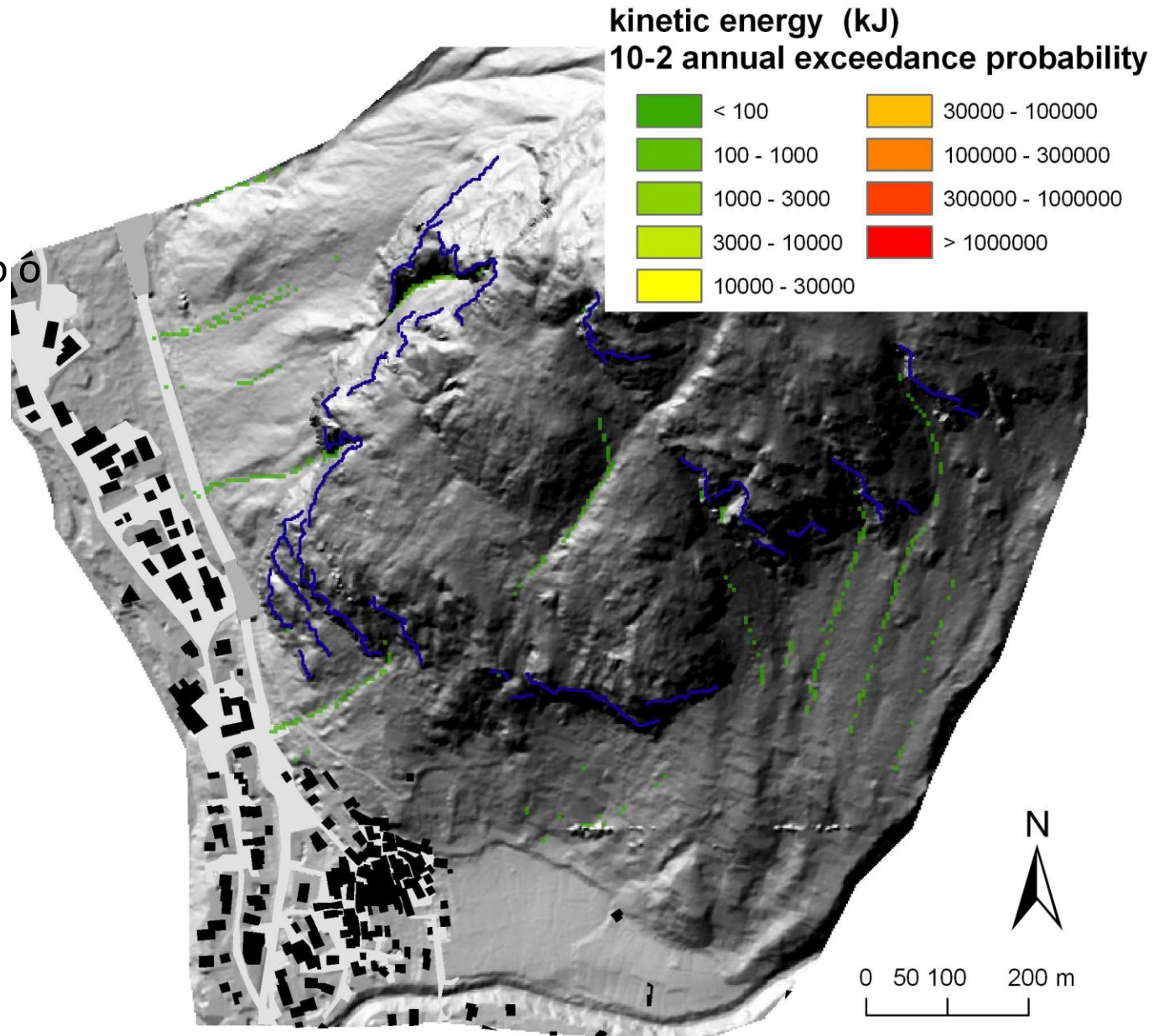
## Carta Pericolosità crolli

- da ogni curva di prob. superamento annuo si opera l'estrazione di un singolo valore rappresentativo (per magnitudo  $\phi$  per  $Tr$ )

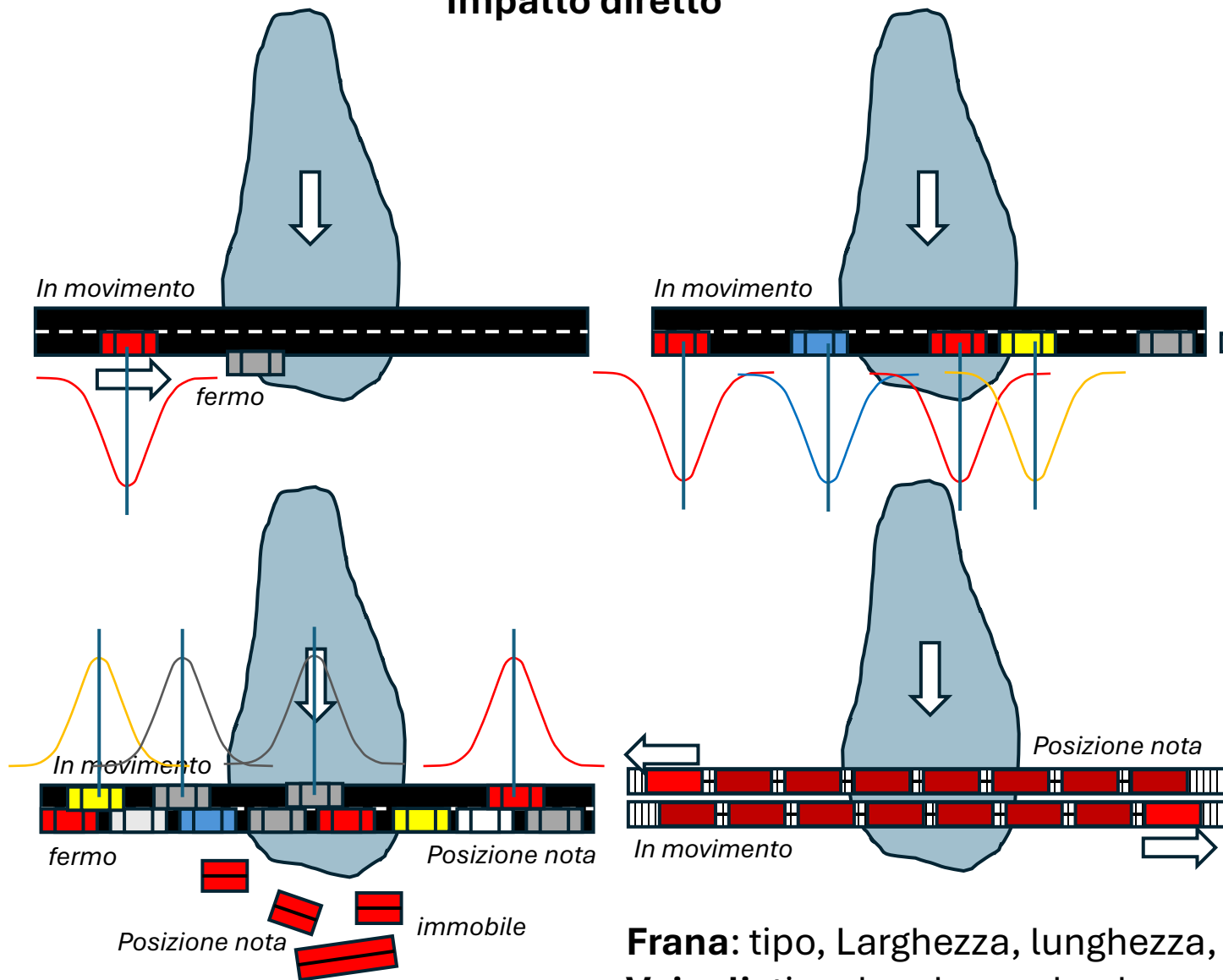
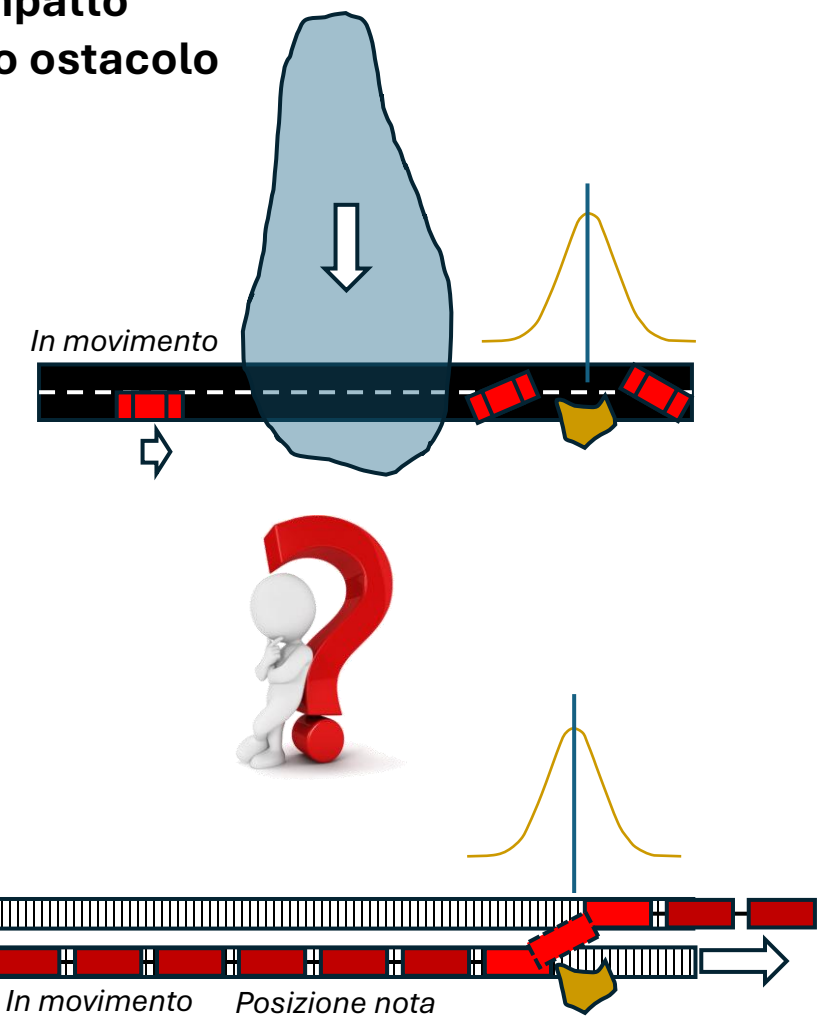
**Rappresenta:** l'energia cinetica associata a una probabilità fissa di superamento in N anni ( $N = 1$ )

**Realizzata per valutazione quantitativa del rischio per:**

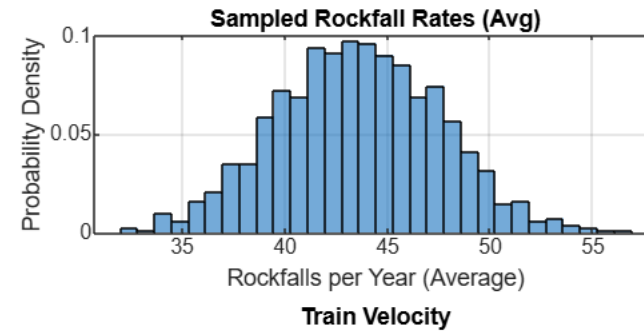
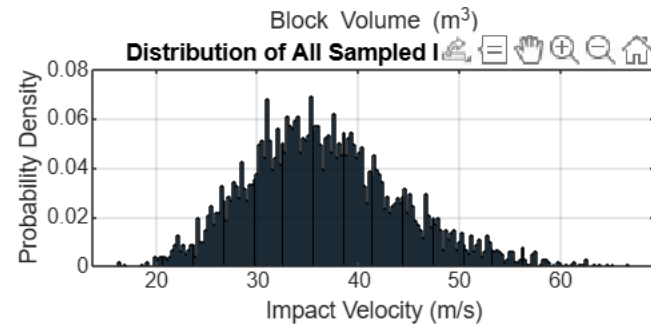
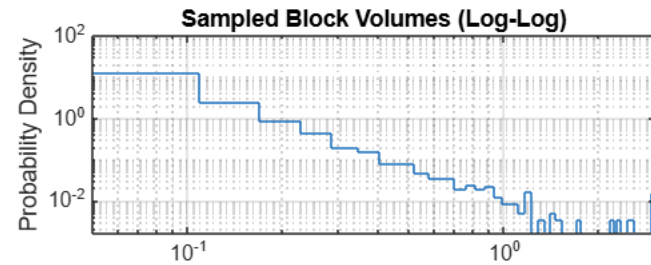
- Edifici
- Persone
- Mezzi in transito
- Passeggeri



## Impatto diretto

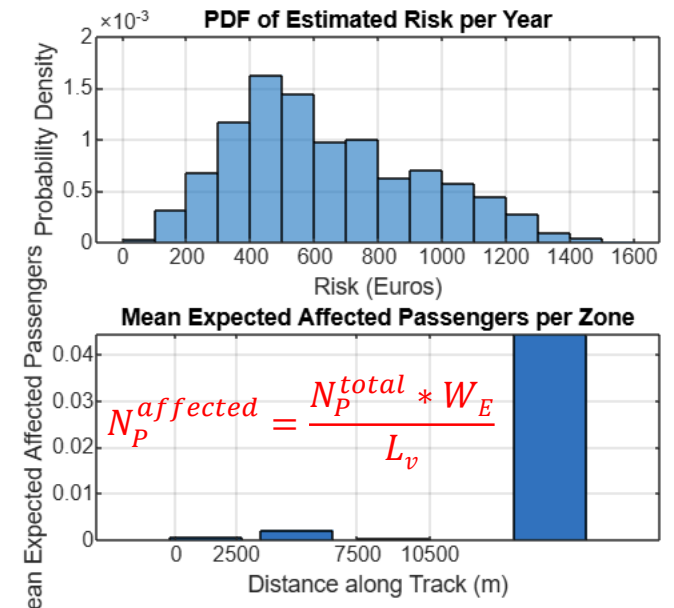
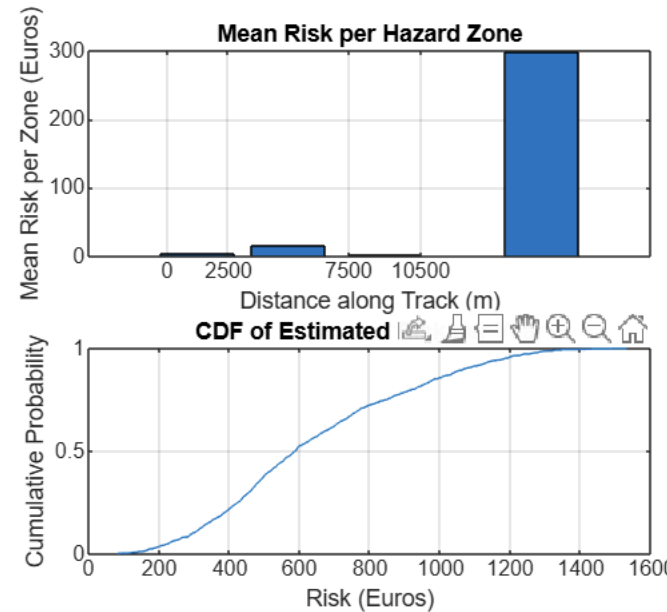
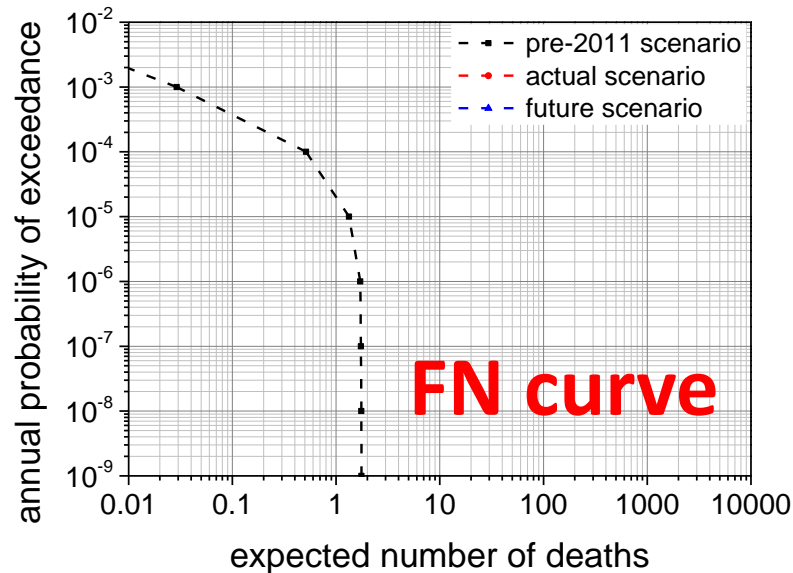
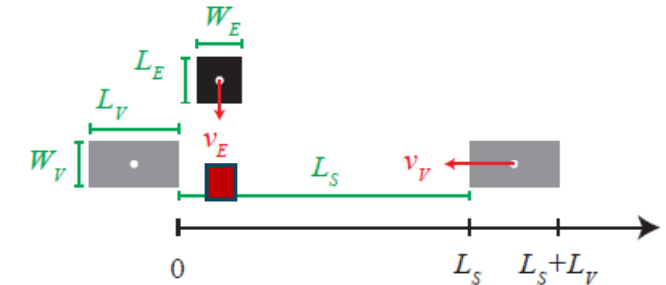
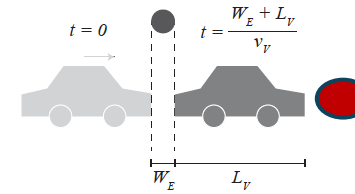
Impatto  
contro ostacolo

**Frana:** tipo, Larghezza, lunghezza, spessore, velocità, traiettoria, posizione finale  
**Veicoli:** tipo, lunghezza, larghezza, distanza, velocità, persone



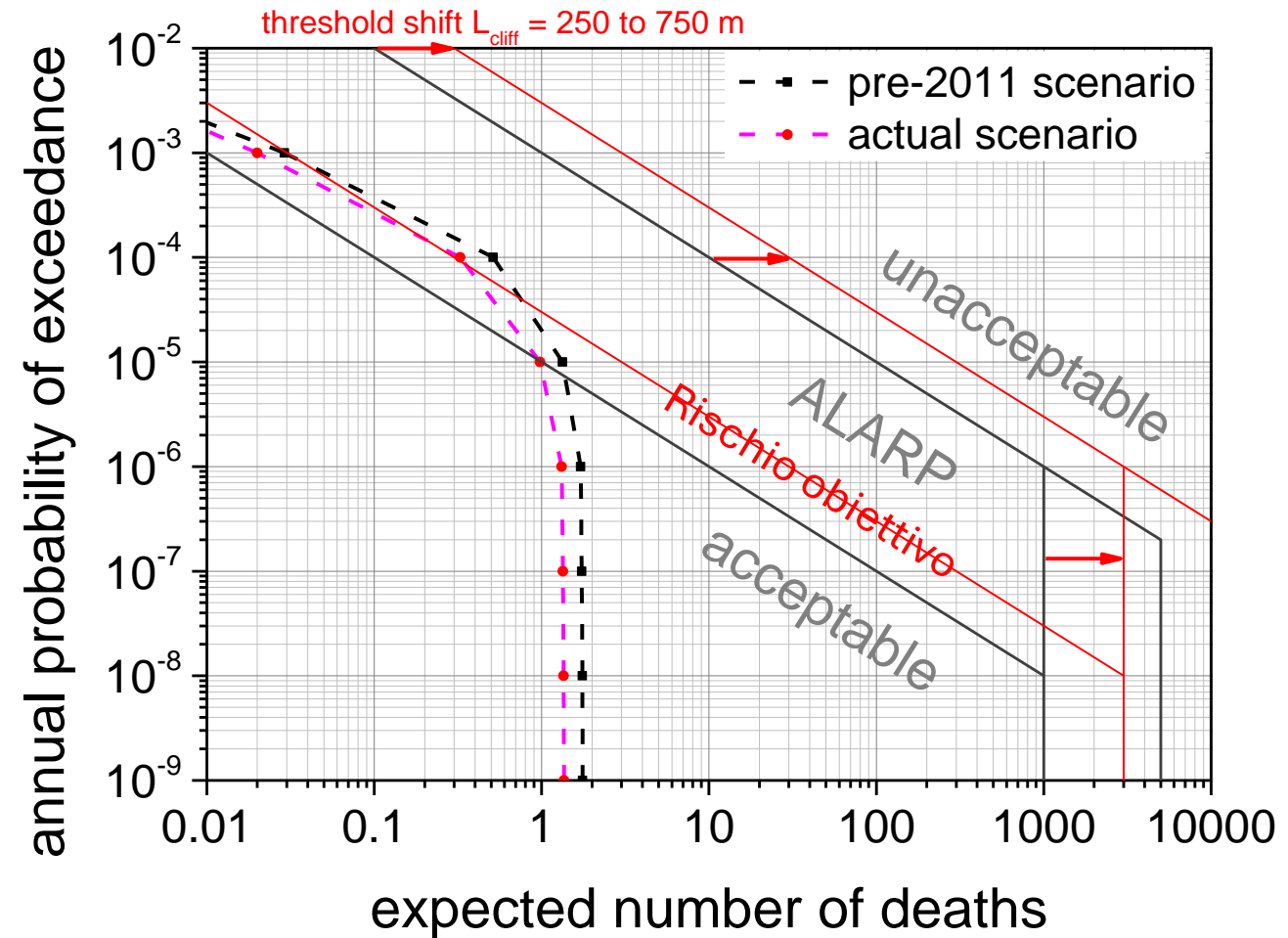
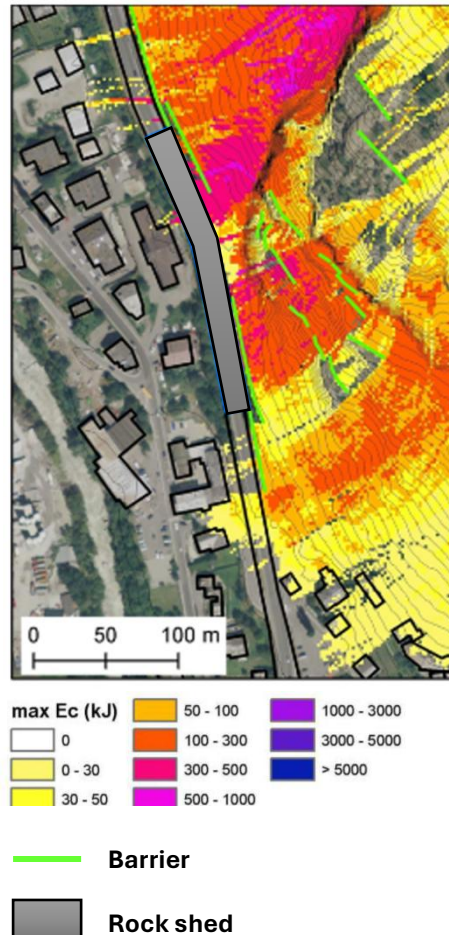
Train Velocity is Constant

probabilità impatto diretto blocco su auto o treno  
+ **probabilità impatto contro ostacolo**

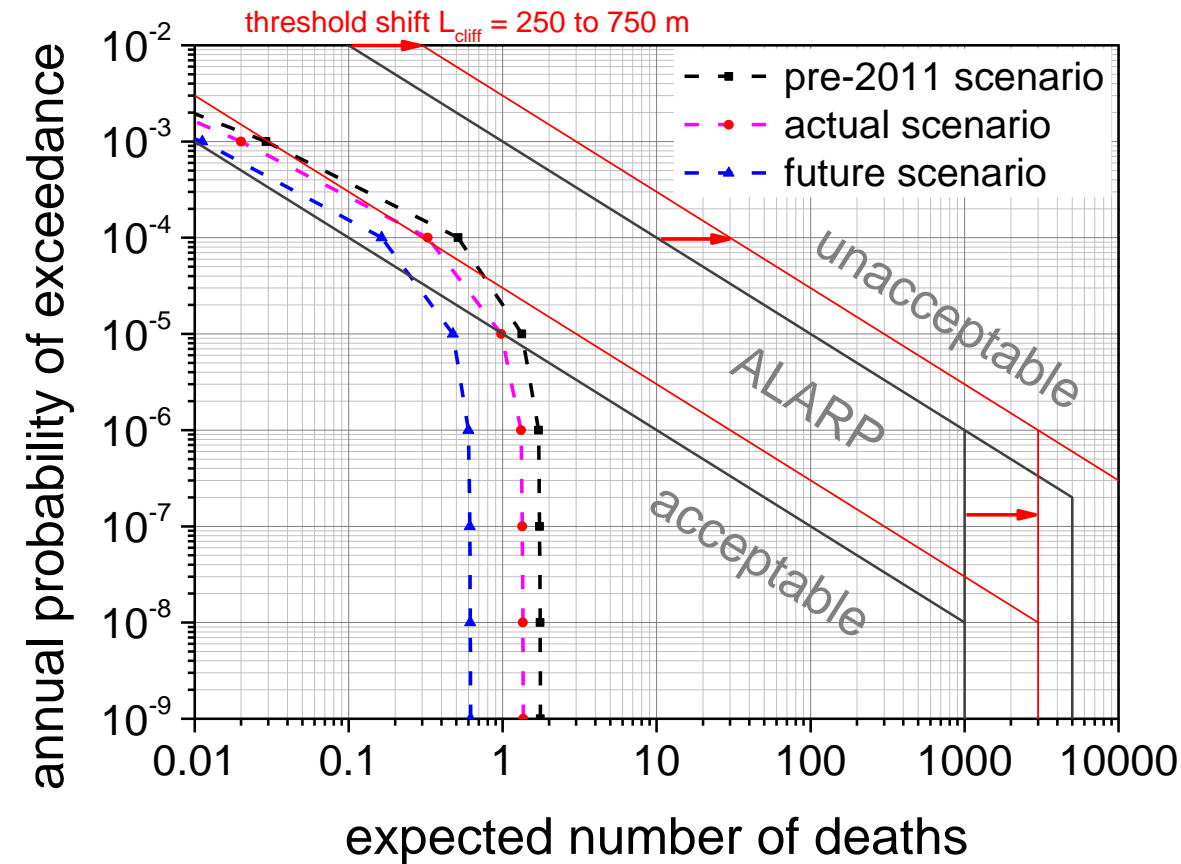
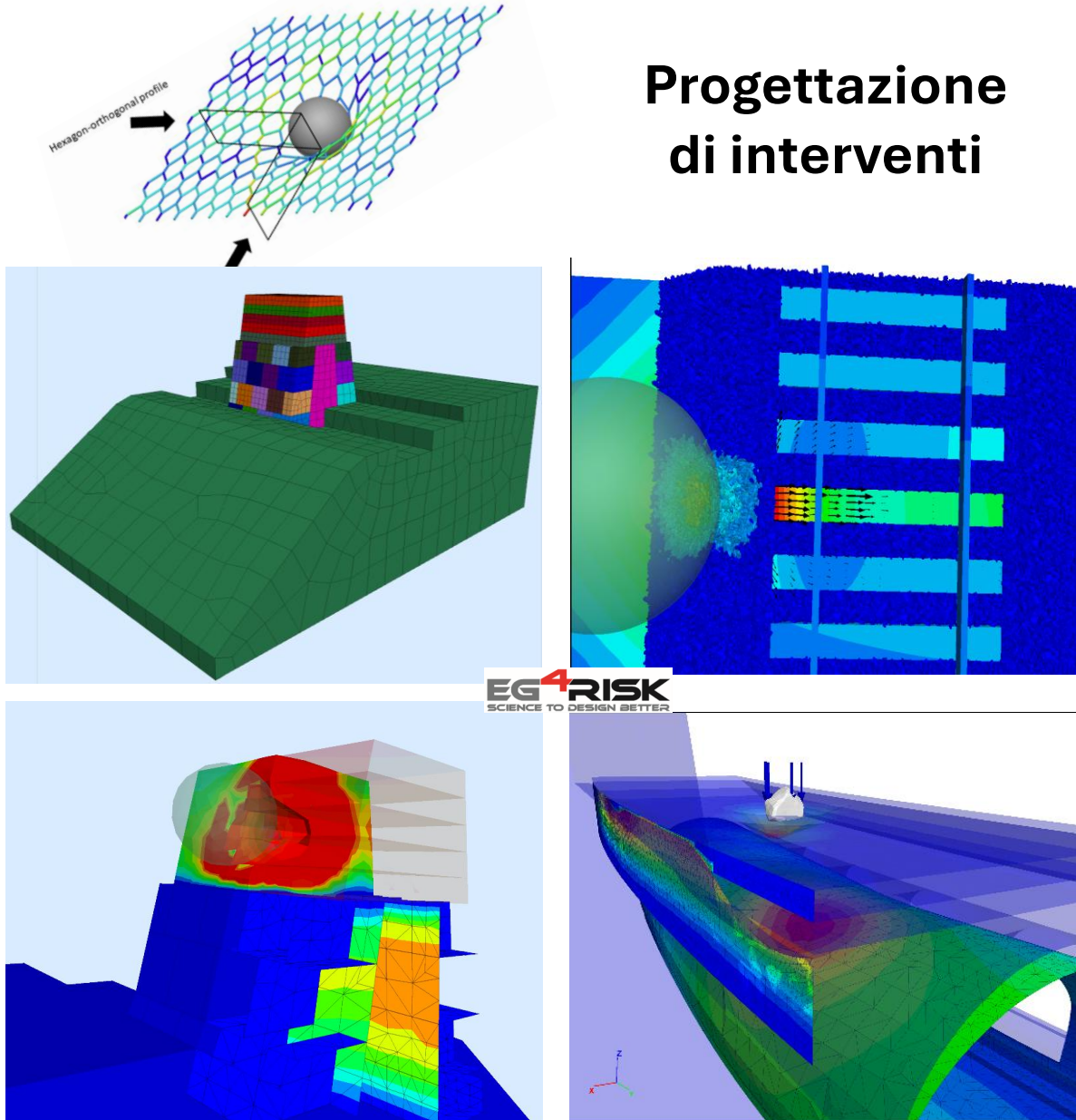




## Curve soglia di accettabilità FN (GEO, 1998)



ALARP = *As Low As Reasonably Practicable* → dimostrabile costi coinvolti nella riduzione ulteriore del rischio sarebbero sproporzionati rispetto al beneficio

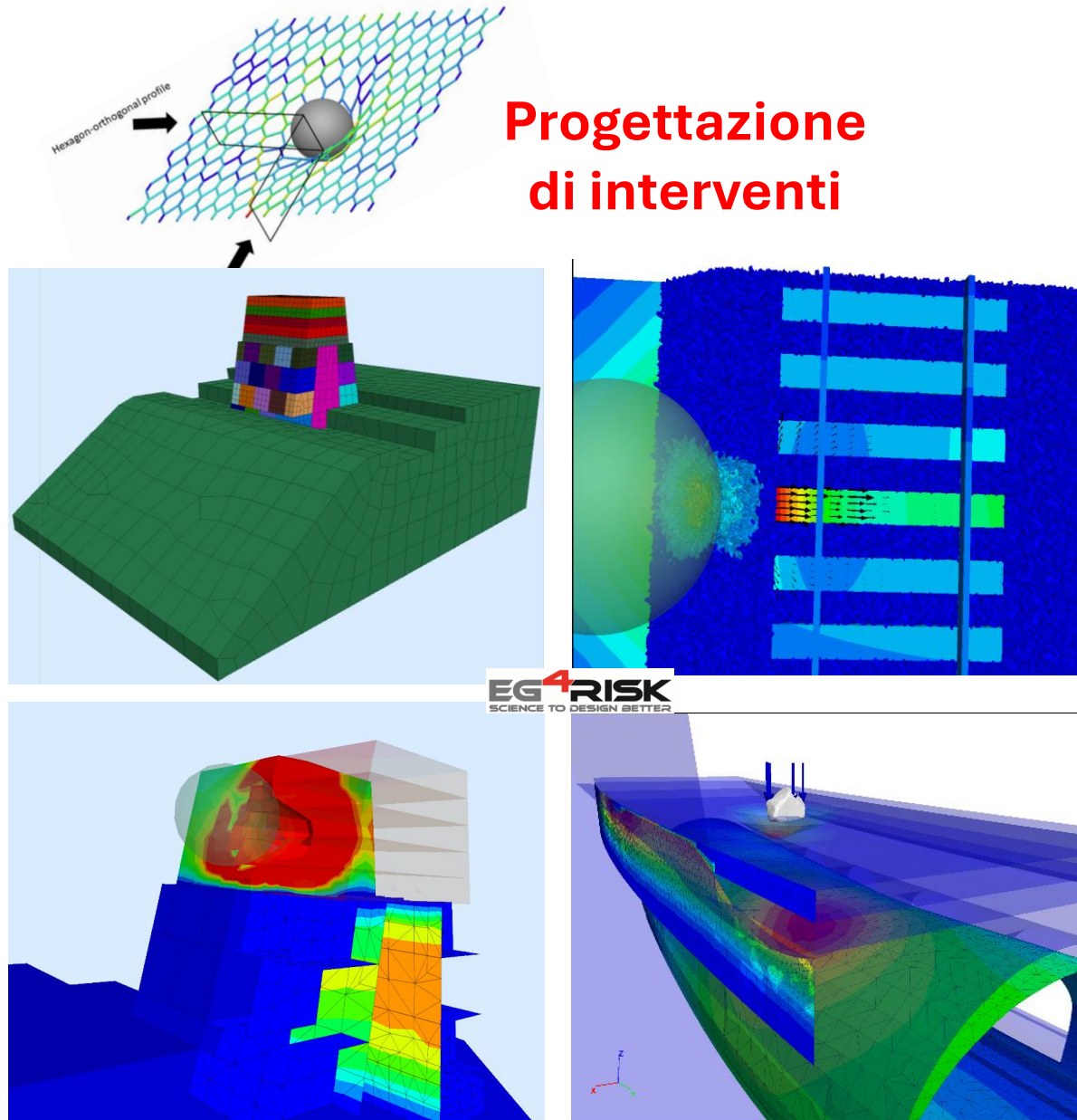
Progettazione  
di interventi

## Considerazioni:

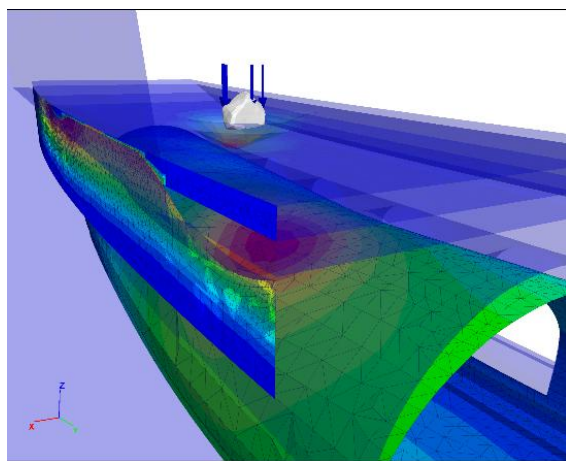
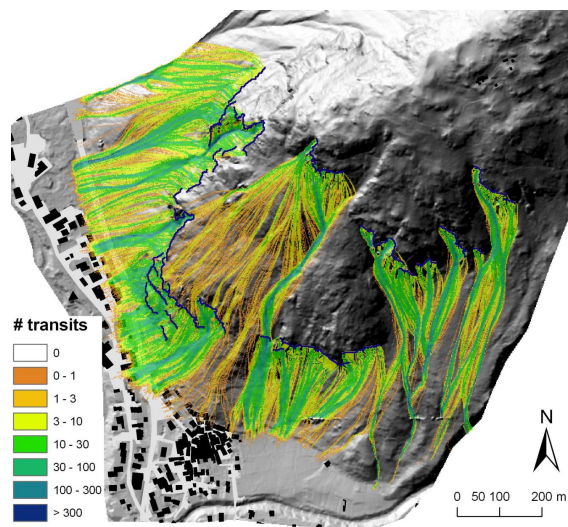
- **Disponibilità dei dati:** completezza, affidabilità, errori sistematici, accuratezza, eventi estremi
- **Complessità:** del fenomeno, instabilità, modalità di propagazione
- **Probabilità:** valori, P. combinate e condizionali
- **Dipendenza Spaziale e Temporale:** variabilità spaziale, scala, fenomeni potenzialmente associati
- **Vulnerabilità:** in funzione del fenomeno, dell'intensità e dell'elemento esposto
- **Stazionarietà:** condizioni iniziali ammasso, innescanti, elementi, esposizione
- **Problemi dati dalla somma dei diversi pericoli nel calcolo del rischio**

## Potenziali approcci alla stima:

- diversi approcci disponibili con vantaggi e svantaggi
- Dimensione della cella di analisi
- Diversa possibilità di applicazione







Région Autonome  
**Vallée d'Aoste**  
Regione Autonoma  
**Valle d'Aosta**



Provincia di Lecco



*Paolo Frattini*  
*Giuseppe Dattola*  
*Gabriele Frigerio*