

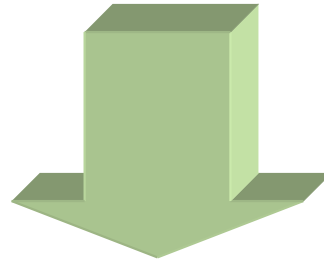
# **LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO GEOLOGICO**

**Prof. Vincenzo Francani**  
**Ing. Paola Gattinoni**

Politecnico di Milano

Sabato 14 gennaio 2006

**CORSO AVANZATO "RISK ENGINEERING"**

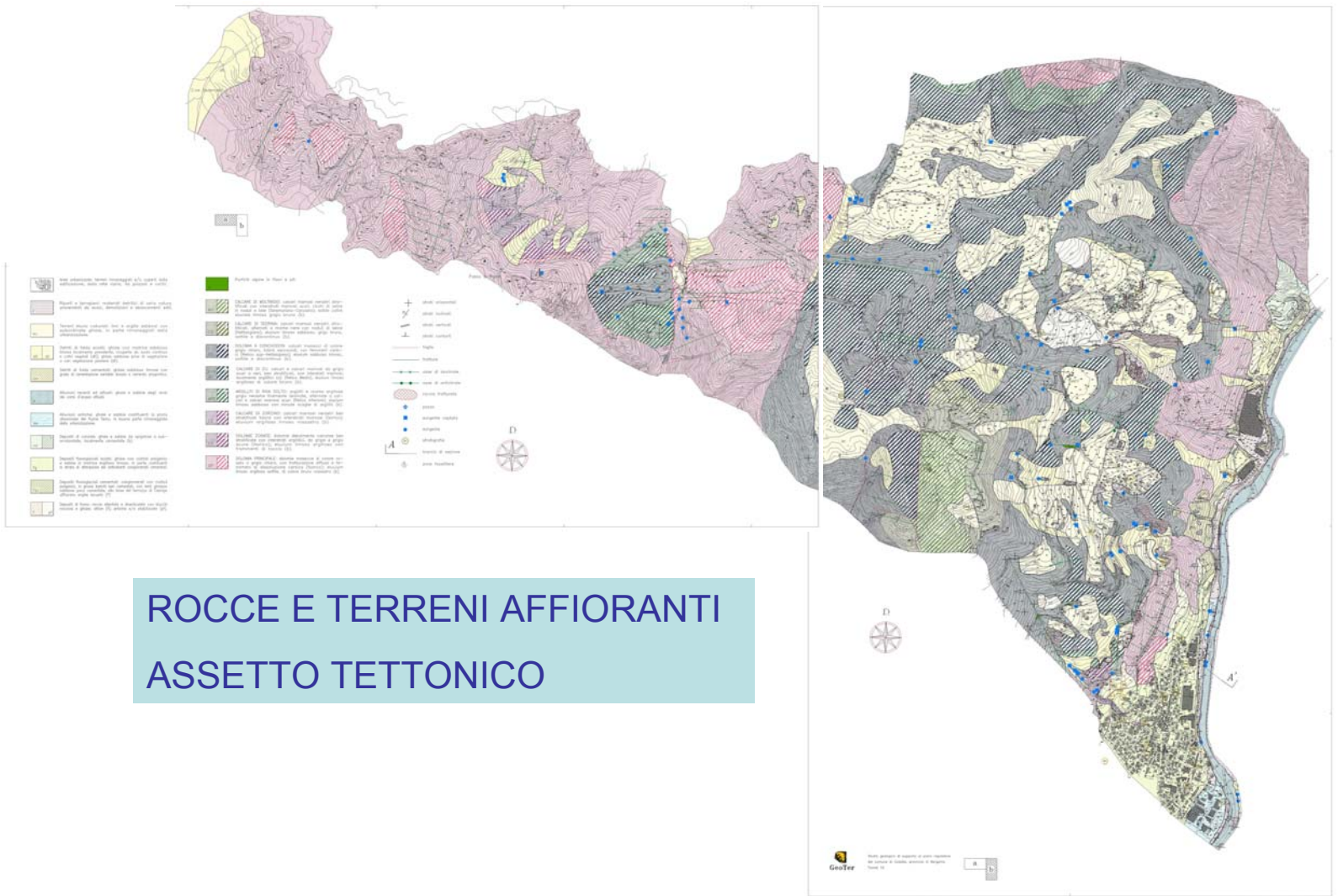


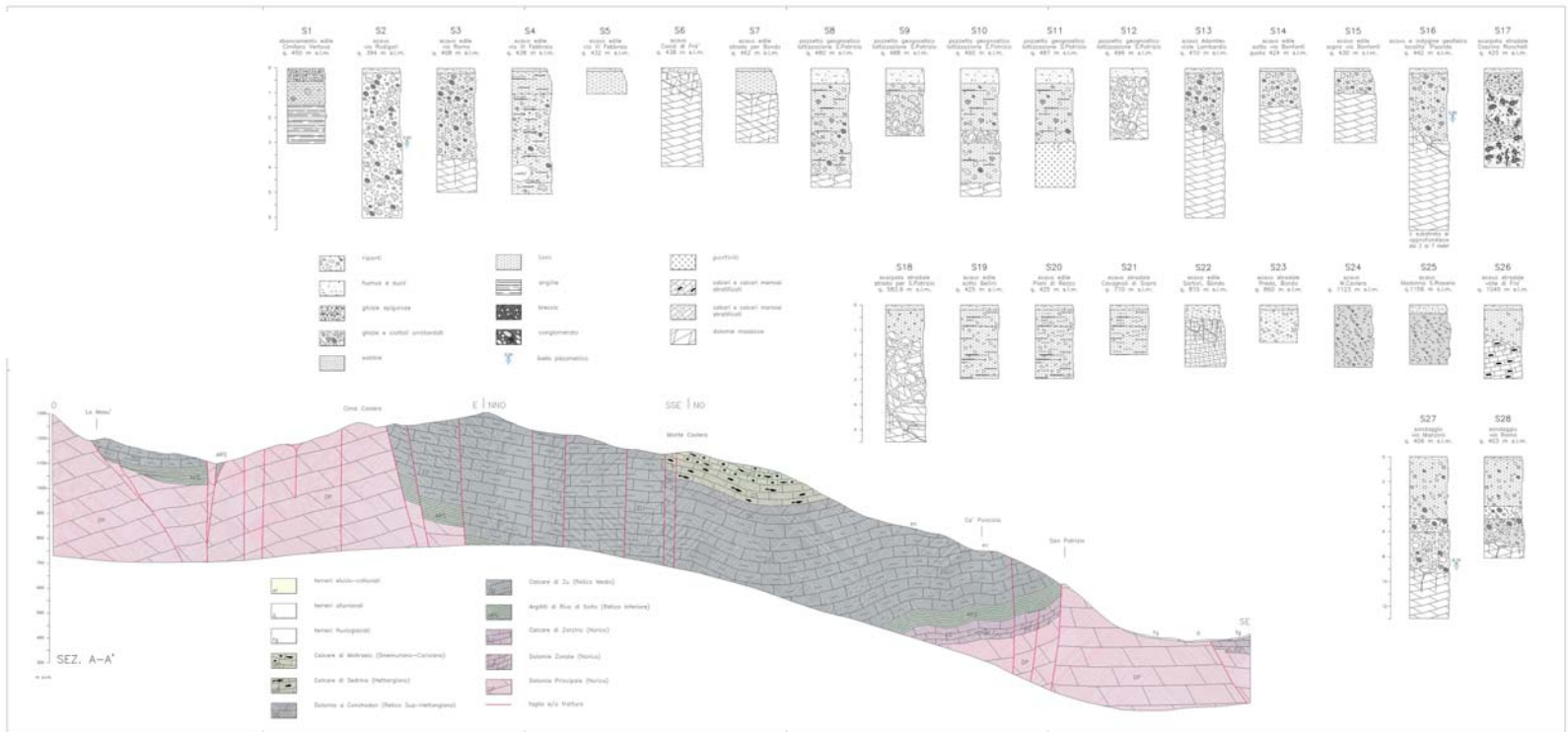
*RISCHIO GEOLOGICO* = *valore atteso delle perdite umane ed economiche dovute a particolari fenomeni naturali, quali ad esempio frane, valanghe, esondazioni, ecc. (UNESCO, 1984)*

# Esempio di studio geologico di supporto ai Piani Urbanistici (PRG)

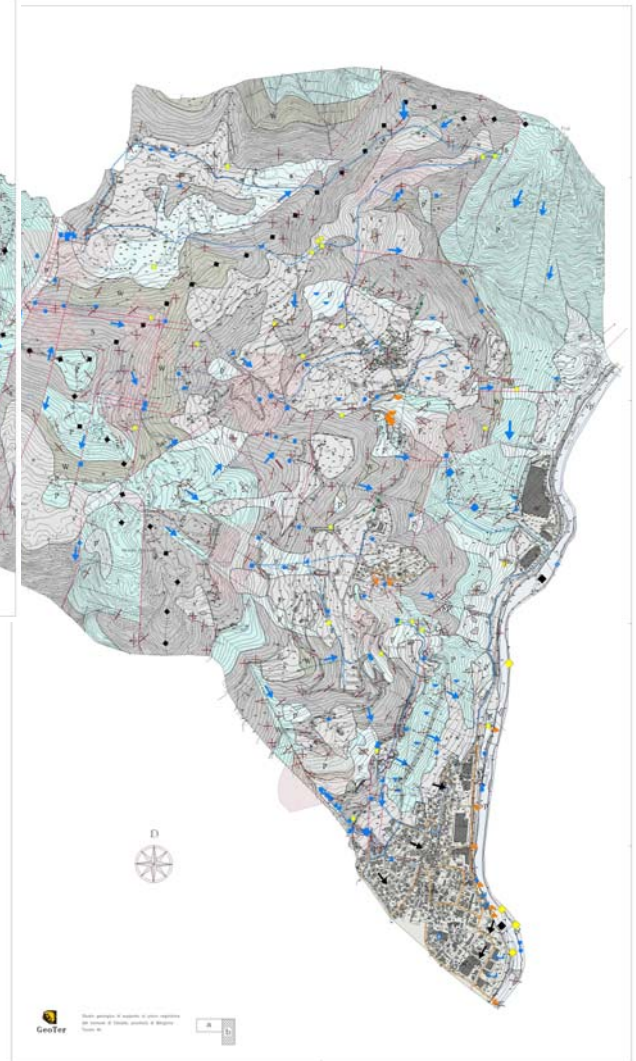
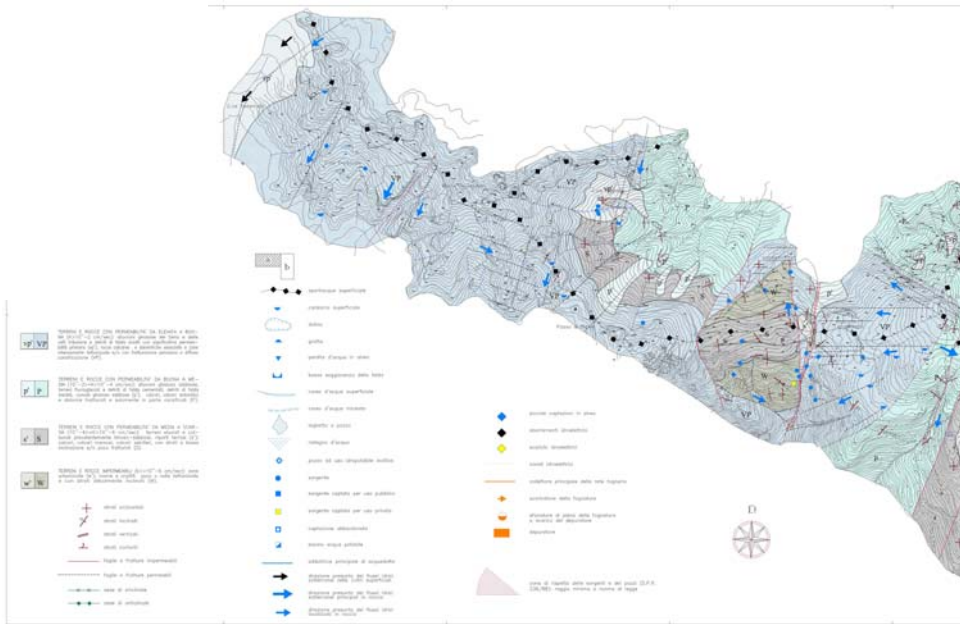
## INDICE

1. PREMESSA.....	2
2. ARTICOLAZIONE DEL LAVORO .....	3
3. PRESENTAZIONE DEL TERRITORIO .....	4
4. DESCRIZIONE DELLE CARTE TEMATICHE .....	6
4.1 CARTA LITOLOGICA.....	6
4.2 SEZIONI GEOLOGICHE E STRATIGRAFIE .....	13
4.3 CARTA GEOMORFOLOGICA E DEI PROCESSI GEOMORFICI IN ATTO .....	16
4.4 CARTA IDROGEOLOGICA.....	27
4.5 CARTA GEOLOGICO-TECNICA .....	36
4.6 CARTA DI SINTESI DEL RISCHIO GEOLOGICO .....	39
4.7 CARTA DELLA FATTIBILITA' GEOLOGICA .....	42
5. OSSERVAZIONI CONCLUSIVE E RICHIAMI NORMATIVI.....	48
6. BIBLIOGRAFIA.....	53





ANDAMENTO IN PROFONDITA'



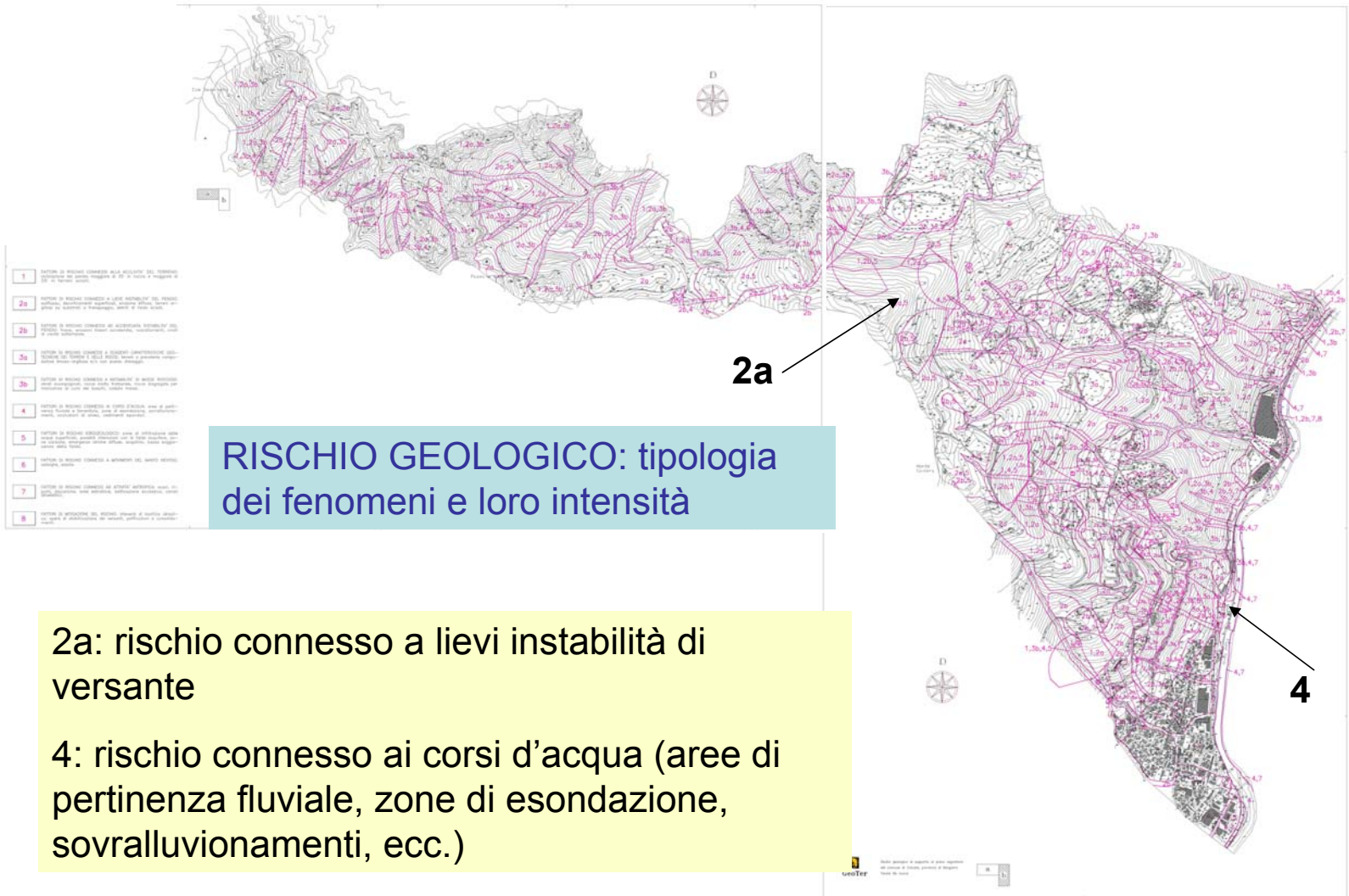
**ASSETTO IDROGEOLOGICO:**  
permeabilità media di rocce e  
terreni, assetto strutturale, direzioni  
preferenziali di flusso



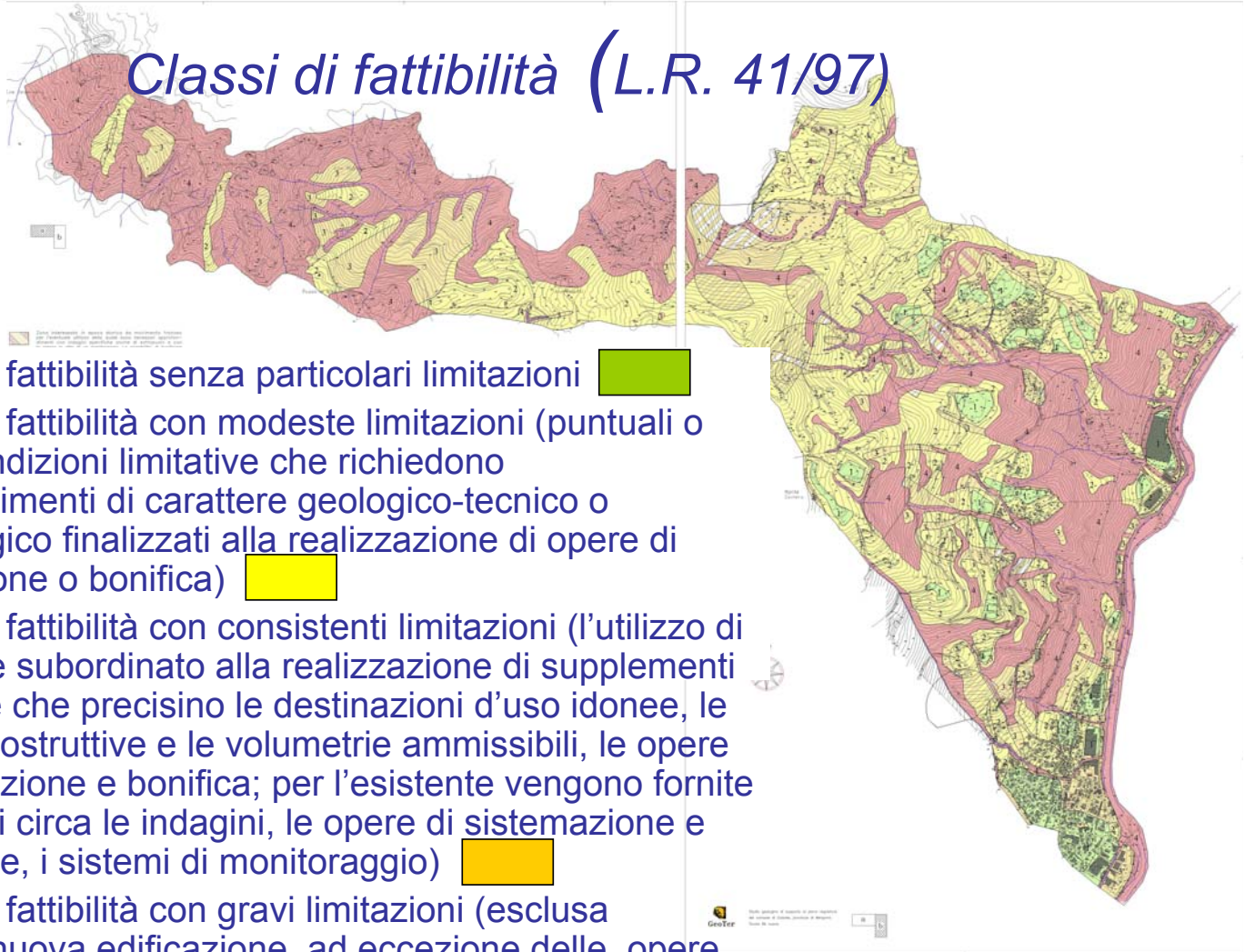
**Frane passate da data-base/archivi regionali, provinciali e comunali, foto aeree, interviste alla popolazione**











## Classi di fattibilità (L.R. 41/97)



- **Classe 1:** fattibilità senza particolari limitazioni 
- **Classe 2:** fattibilità con modeste limitazioni (puntuali o ridotte condizioni limitative che richiedono approfondimenti di carattere geologico-tecnico o idrogeologico finalizzati alla realizzazione di opere di sistemazione o bonifica) 
- **Classe 3:** fattibilità con consistenti limitazioni (l'utilizzo di tali aree è subordinato alla realizzazione di supplementi d'indagine che precisino le destinazioni d'uso idonee, le tipologie costruttive e le volumetrie ammissibili, le opere di sistemazione e bonifica; per l'esistente vengono fornite indicazioni circa le indagini, le opere di sistemazione e mitigazione, i sistemi di monitoraggio) 
- **Classe 4:** fattibilità con gravi limitazioni (esclusa qualsiasi nuova edificazione, ad eccezione delle opere di consolidamento e messa in sicurezza; necessità di predisporre piani di protezione civile e sistemi di monitoraggio per l'esistente) 

# ITER PROCEDURALE PER LA VALUTAZIONE E LA GESTIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO



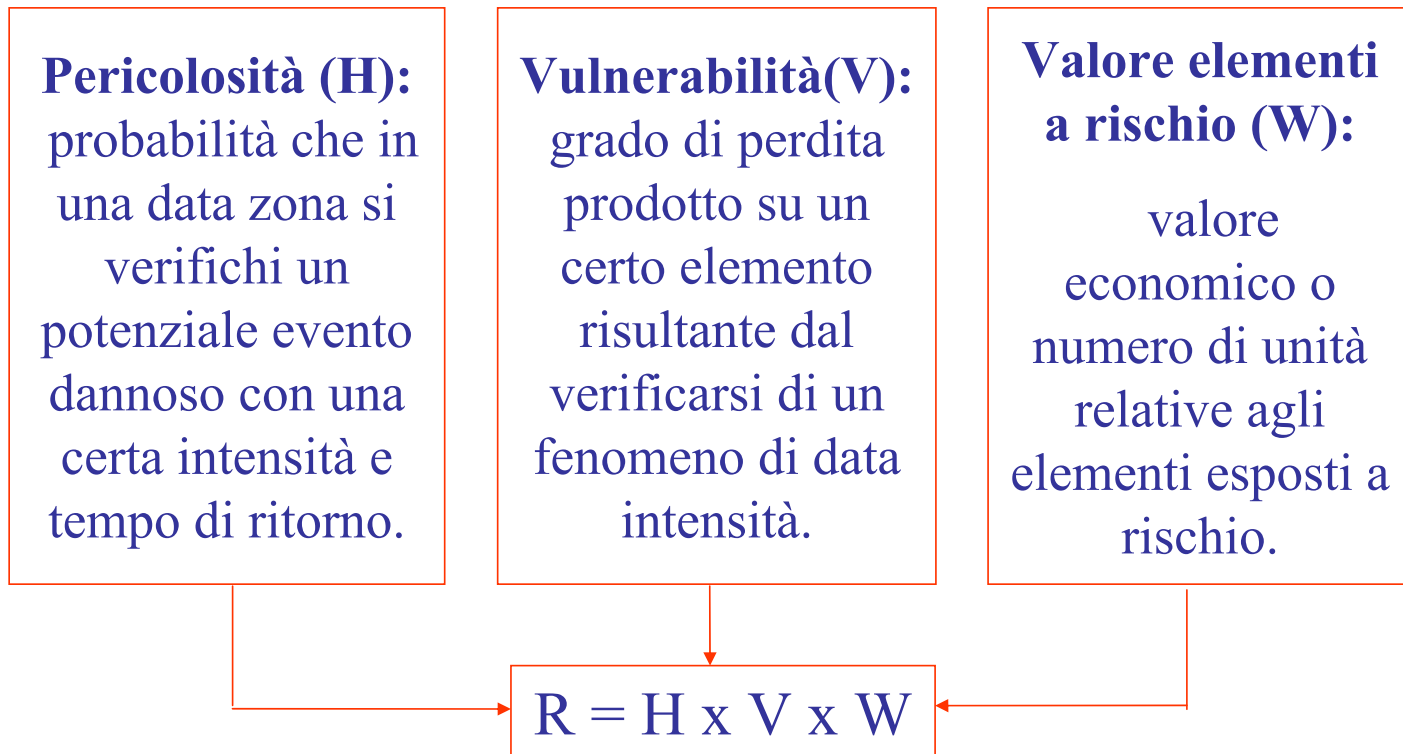
- **Acquisizione dei dati** ( $\Rightarrow$  conoscenza del territorio)
- Realizzazione di un **archivio informatizzato** dei dati riguardanti gli eventi oggetto dell'analisi
- Applicazioni di **metodologie** per la definizione del grado di rischio di una certa area
- **Scelta** progettuale degli interventi finalizzata alla pianificazione del territorio e/o alla gestione dell'emergenza

**FASE CONOSCITIVA**  
**per l'individuazione**  
**delle tipologie di**  
**rischio**

**FASE DI**  
**ELABORAZIONE** per la  
**definizione del grado di**  
**rischio**

**FASE DI**  
**MITIGAZIONE**  
**(progettuale o gestionale)**

# VALUTAZIONE DEL RISCHIO



**(UNESCO, 1984)**

# *PARAMETRI FONDAMENTALI*

## **I = Intensità** (pericolo, magnitudo)

Severità geometrica e meccanica del fenomeno potenzialmente distruttivo (UNESCO, 1984). Può essere espressa in una scala relativa o in termini di una o più grandezze caratteristiche del fenomeno (velocità, volume, energia, ecc.)

# VALUTAZIONE DELL'INTENSITA'

- **APPROCCIO MONO-PARAMETRICO:** si misura o si stima uno tra i diversi parametri legati all'intensità (velocità di movimento, volume o profondità dei depositi)
- **APPROCCIO MULTI-PARAMETRICO:** tiene conto dell'influenza dei diversi parametri
- **APPROCCIO INTEGRATO:** si valutano anche le conseguenze del fenomeno (es. Scala Mercalli)

# Approccio mono-parametrico: VELOCITA'

VELOCITÀ	DESCRIZIONE	CLASSE	DANNI
5 m/s	Estremamente rapida	7	Catastrofe di eccezionale violenza. Edifici distrutti per impatto del materiale. Morti ed impossibilità di fuga
3 m/min	Molto rapida	6	Perdita di alcune vite umane. Velocità troppo elevata per evacuazione
1,8 m/h	Rapida	5	Possibile evacuazione. Distruzione di strutture, immobili ed installazioni permanenti
13 m/mese	Moderata	4	Possibile mantenimento di strutture temporanee o poco danneggiabili
1,6 m/a	Lenta	3	Possibile realizzazione di lavori di rinforzo e restauro durante il movimento. Strutture meno danneggiabili e mantenibili con frequenti lavori di rinforzo salvo accelerazioni del movimento
16 mm/a	Molto lenta	2	Alcune strutture permanenti possono essere danneggiate dal movimento
	Estremamente lenta	1	Movimento impercettibile senza monitoraggio. Costruzione di edifici possibile con alcune precauzioni

(Regione Lombardia, 2001)

***N.B.:** l'assunzione di base severità  $\equiv$  intensità non è sempre vera; inoltre la stima della velocità di movimento è incerta!*

## Approccio mono-parametrico: VOLUME

VOLUME	DESCRIZIONE	CLASSE
$>5 \cdot 10^6$ mc	Estremamente grande	7
$10^6 \div 5 \cdot 10^6$ mc	Molto grande	6
$2,5 \cdot 10^5 \div 10^6$ mc	Mediamente grande	5
$5 \cdot 10^4 \div 2,5 \cdot 10^5$ mc	Media	4
$5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^4$ mc	Piccola	3
$5 \cdot 10^2 \div 5 \cdot 10^3$ mc	Molto piccola	2
$<5 \cdot 10^2$ mc	Estremamente piccola	1

(Regione Lombardia, 2001)

**N.B.**: *l'assunzione di base severità  $\equiv$  volumetria è abbastanza significativa, ma la stima è incerta e molto difficoltosa!*



# Approccio multi-parametrico: il Rock Engineering System

(Hudson, 1992)

1. **Scelta dei parametri** che descrivono il *sistema Ammasso Roccioso* in relazione all'instabilità del versante. Tali parametri devono essere misurabili.

$P_1$ : geologia;

$P_3$ : faglie;

$P_5$ : cicli di gelo e disgelo;

$P_7$ : resistenza della roccia intatta;

$P_9$ : numero famiglie di discontinuità;

$P_{11}$ : apertura delle fessure;

$P_{13}$ : spaziatura;

$P_{15}$ : resistenza dell'ammasso;

$P_{17}$ : orientazione del pendio;

$P_{19}$ : stato tensionale in sito;

$P_2$ : pieghe;

$P_4$ : precipitazioni;

$P_6$ : precedenti instabilità;

$P_8$ : stato di alterazione;

$P_{10}$ : orientazione delle discontinuità;

$P_{12}$ : persistenza;

$P_{14}$ : proprietà meccaniche (JRC);

$P_{16}$ : condizioni idrauliche;

$P_{18}$ : dimensioni del pendio (altezza);

$P_{20}$ : potenziale instabilità.

2. Costruzione della **matrice delle interazioni** sulla cui diagonale principale si mettono i parametri caratteristici del sistema
3. Analisi delle **interazioni binarie** fra ciascuna coppia di parametri. La quantificazione di tali interazioni avviene associando dei codici numerici (da 0 = interazione inesistente a 4 = interazione critica).
4. Attribuzione dei **pesi** ai parametri:  

$$W_i = (C_i + E_i) / (\sum_i C_i + \sum_i E_i)$$

$W_i$																					$C_i$
<b>3.89</b>	<b>P<sub>1</sub></b>	2	1	0	0	2	3	2	2	0	0	2	2	2	3	0	0	1	0	2	<b>24</b>
<b>5.09</b>	3	<b>P<sub>2</sub></b>	2	0	0	3	0	1	4	4	4	2	3	0	2	2	0	0	0	3	<b>34</b>
<b>7.37</b>	2	2	<b>P<sub>3</sub></b>	0	0	4	0	2	4	4	4	4	4	4	3	3	3	2	3	4	<b>52</b>
<b>2.82</b>	0	0	0	<b>P<sub>4</sub></b>	1	3	0	2	0	0	0	0	0	2	2	4	0	0	0	3	<b>17</b>
<b>5.09</b>	0	0	0	0	<b>P<sub>5</sub></b>	3	0	3	0	0	3	2	0	1	3	2	0	0	0	4	<b>21</b>
<b>8.58</b>	0	0	0	0	1	<b>P<sub>6</sub></b>	0	1	0	0	2	0	1	2	2	1	3	3	4	2	<b>22</b>
<b>3.08</b>	0	0	0	0	0	1	<b>P<sub>7</sub></b>	2	2	0	0	0	1	2	3	0	0	2	0	2	<b>15</b>
<b>4.83</b>	0	0	0	0	0	1	2	<b>P<sub>8</sub></b>	0	0	2	0	0	1	2	0	0	0	0	1	<b>9</b>
<b>4.96</b>	0	0	0	0	4	3	0	2	<b>P<sub>9</sub></b>	0	0	0	0	0	3	3	2	2	1	4	<b>24</b>
<b>5.36</b>	0	0	0	0	3	3	0	0	0	<b>P<sub>10</sub></b>	2	2	2	1	2	2	4	2	1	4	<b>28</b>
<b>6.57</b>	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	<b>P<sub>11</sub></b>	2	2	3	3	4	1	0	2	4	<b>27</b>
<b>6.03</b>	0	0	0	0	2	3	0	2	0	0	1	<b>P<sub>12</sub></b>	1	2	2	3	2	3	1	4	<b>26</b>
<b>5.09</b>	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	1	1	<b>P<sub>13</sub></b>	0	3	3	1	1	1	4	<b>18</b>
<b>4.69</b>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	<b>P<sub>14</sub></b>	3	0	1	0	0	4	<b>9</b>
<b>6.57</b>	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	1	0	<b>P<sub>15</sub></b>	0	0	1	0	3	<b>9</b>
<b>6.70</b>	0	0	0	0	2	3	0	3	0	0	2	1	0	3	2	<b>P<sub>16</sub></b>	0	0	2	3	<b>21</b>
<b>5.09</b>	0	0	0	4	4	3	0	2	0	0	0	1	1	0	0	0	<b>P<sub>17</sub></b>	2	1	3	<b>21</b>
<b>3.62</b>	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	<b>P<sub>18</sub></b>	0	3	<b>8</b>
<b>4.56</b>	0	0	0	0	0	2	0	0	1	4	1	1	1	2	2	1	0	0	<b>P<sub>19</sub></b>	3	<b>18</b>
<b>7.44</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>P<sub>20</sub></b>	<b>0</b>
<b>E<sub>i</sub></b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>17</b>	<b>42</b>	<b>8</b>	<b>27</b>	<b>13</b>	<b>12</b>	<b>22</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>26</b>	<b>40</b>	<b>29</b>	<b>17</b>	<b>19</b>	<b>16</b>	<b>60</b>	<b>403</b>

6. Attribuzione ad ogni parametro del **valore** che questo può assumere. Si utilizzano delle classi a cui viene assegnato un indice  $V_i$  (es. variabile da 0 a  $V_{max}$ ).

7. Si calcola l'indice di intensità del fenomeno:

$$RMII = \sum V_i * W_i$$

$W_i$																					$C_i$
3.89	P <sub>1</sub>	2	1	0	0	2	3	2	2	0	0	2	2	2	3	0	0	1	0	2	24
5.09	3	P <sub>2</sub>	2	0	0	3	0	1	4	4	4	2	3	0	2	2	0	0	0	3	34
7.37	2	2	P <sub>3</sub>	0	0	4	0	2	4	4	4	4	4	4	3	3	3	2	3	4	52
2.82	0	0	0	P <sub>4</sub>	1	3	0	2	0	0	0	0	0	2	2	4	0	0	0	3	17
5.09	0	0	0	0	P <sub>5</sub>	3	0	3	0	0	3	2	0	1	3	2	0	0	0	4	21
8.58	0	0	0	0	1	P <sub>6</sub>	0	1	0	0	2	0	1	2	2	1	3	3	4	2	22
3.08	0	0	0	0	0	1	P <sub>7</sub>	2	2	0	0	0	1	2	3	0	0	2	0	2	15
4.83	0	0	0	0	0	1	2	P <sub>8</sub>	0	0	2	0	0	1	2	0	0	0	0	1	9
4.96	0	0	0	0	4	3	0	2	P <sub>9</sub>	0	0	0	0	0	3	3	2	2	1	4	24
5.36	0	0	0	0	3	3	0	0	0	P <sub>10</sub>	2	2	2	1	2	2	4	2	1	4	28
6.57	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	P <sub>11</sub>	2	2	3	3	4	1	0	2	4	27
6.03	0	0	0	0	2	3	0	2	0	0	1	P <sub>12</sub>	1	2	2	3	2	3	1	4	26
5.09	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	1	1	P <sub>13</sub>	0	3	3	1	1	1	4	18
4.69	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	P <sub>14</sub>	3	0	1	0	0	4	9
6.57	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	1	0	P <sub>15</sub>	0	0	1	0	3	9
6.70	0	0	0	0	2	3	0	3	0	0	2	1	0	3	2	P <sub>16</sub>	0	0	2	3	21
5.09	0	0	0	4	4	3	0	2	0	0	0	1	1	0	0	0	P <sub>17</sub>	2	1	3	21
3.62	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	P <sub>18</sub>	0	3	8
4.56	0	0	0	0	0	2	0	0	1	4	1	1	1	2	2	1	0	0	P <sub>19</sub>	3	18
7.44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	P <sub>20</sub>	0
$E_i$	5	4	3	4	17	42	8	27	13	12	22	19	20	26	40	29	17	19	16	60	403

# Approccio integrato

CONSEGUENZE SULL'INCOLUMITA' UMANA ED ECONOMICHE

Grado	Intensità	Possibile conseguenza	Natura del fenomeno
H <sub>0</sub>	Nulla	Incidente improbabile	Movimento a cinematica lenta
H <sub>1</sub>	Media	Incidenti isolati	Crolli isolati
H <sub>2</sub>	Elevata	Qualche vittima	Crolli, scivolamenti, colate di terra
H <sub>3</sub>	Molto elevata	Catastrofe (qualche decina di vittime)	Crolli e scivolamenti catastrofici, colate rapide di terra o detrito

Grado	Intensità	Misure preventive	Esempi d'intervento
E <sub>0</sub>	Lieve	10% del valore economico di una singola abitazione	Disgaggio di blocchi instabili
E <sub>1</sub>	Media	Intervento tecnico sopportabile per un gruppo ristretto di proprietari	Disgaggio o realizz. di strutture paramassi; drenaggio di una zona instabile di modesta estensione
E <sub>2</sub>	Elevata	Intervento tecnico per un'area geografica estesa, costo rilevante	Stabilizz. di scivolamento di considerevoli dimensioni; consolidamento di parete rocciosa
E <sub>3</sub>	Molto elevata	Impossibile ogni intervento tecnico a costo accettabile per la collettività	-

# PARAMETRI FONDAMENTALI

## **H = Pericolosità** (probabilità di occorrenza)

Probabilità assoluta che un fenomeno F potenzialmente distruttivo di determinata intensità si verifichi in un dato periodo di tempo ed in una data area (UNESCO, 1984). E' espressa in termini di probabilità annuale (o di tempo di ritorno). La pericolosità definita in questo modo è pertanto riferita ad una determinata intensità del fenomeno:

$$\mathbf{H = H(I) = p(F=x,y,z,t)}$$

# VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITA'

- METODI STATISTICI INDIRETTI, basati su stime soggettive e qualitative  $\Rightarrow$  pericolosità relativa
- METODI STATISTICI DIRETTI, basati sullo studio di relazioni statistiche tra frane e fattori causali (**probabilità di rottura**)  $\Rightarrow$  pericolosità assoluta
- METODI DETERMINISTICI, basati su funzioni che forniscono la pericolosità a partire da leggi fisico-matematiche (**fattore di sicurezza**)  $\Rightarrow$  pericolosità assoluta

N.B.: differenza tra PERICOLOSITA' RELATIVA (susceptibilità) e PERICOLOSITA' ASSOLUTA

# Metodi statistici indiretti: Analisi Statistica Multivariata

Redazione di carte tramite la valutazione dell'importanza di alcune combinazioni critiche di diversi fattori (morfometrico, geologico, geomorfologico, geologico-tecnico) presenti nell'area in cui il dissesto si è verificato; analisi statistiche consentono poi di estrapolare le informazioni anche alle aree attualmente non interessate da movimenti di versante, circoscrivendo le zone potenzialmente pericolose (Carrara & Guzzetti, 1995).

## CRITERI INTUITIVI:

- Una frana già avvenuta tenderà a riattivarsi con la stessa tipologia,
- Zone con caratteristiche simili a quelle nelle quali si sono rilevate frane esistenti saranno suscettibili di fenomeni analoghi,
- L'assetto geologico, idrologico e geomorfologico possono fornire indicazioni sulla tipologia dei potenziali fenomeni di instabilità (un pendio argilloso a moderata pendenza non sarà soggetto a frane di crollo!).



I **fattori** determinanti per la valutazione della pericolosità:

- *fattori geologici* :
  - litologia,
  - assetto strutturale (faglie, fratture, stratificazione, ecc.);
- *fattori geomorfologici*:
  - pendenza dei versanti,
  - altezza relativa,
  - dislivello relativo,
  - vicinanza alle maggiori frane,
  - distanza dalle creste più vicine;
- *idrologia e climatologia*
- *vegetazione*
- *analisi frane esistenti o avvenute in passato*

Il **procedimento di rappresentazione cartografica** (scala 1 :25.000) è così articolato:

- 1.si suddivide l'area in esame in unità, ad esempio tramite una griglia;
- 2.si attribuisce un peso ad ognuno dei fattori sopra citati in funzione della loro importanza relativa quale causa di franamento;
- 3.si costruisce una carta delle frane passate, da sovrapporre poi alle carte tematiche dei singoli fattori per identificare le unità in cui si sono già verificati franamenti e svolgere quindi un'analisi statistica;
- 4.si suddivide ogni fattore in classi e ad ogni classe si attribuisce una valutazione numerica in funzione della frequenza areale delle frane;
- 5.si sovrappongono le carte tematiche di ciascun fattore e, tramite un'operazione di somma ponderata, si attribuisce ad ogni unità di territorio un indice numerico rappresentativo del grado di pericolosità.

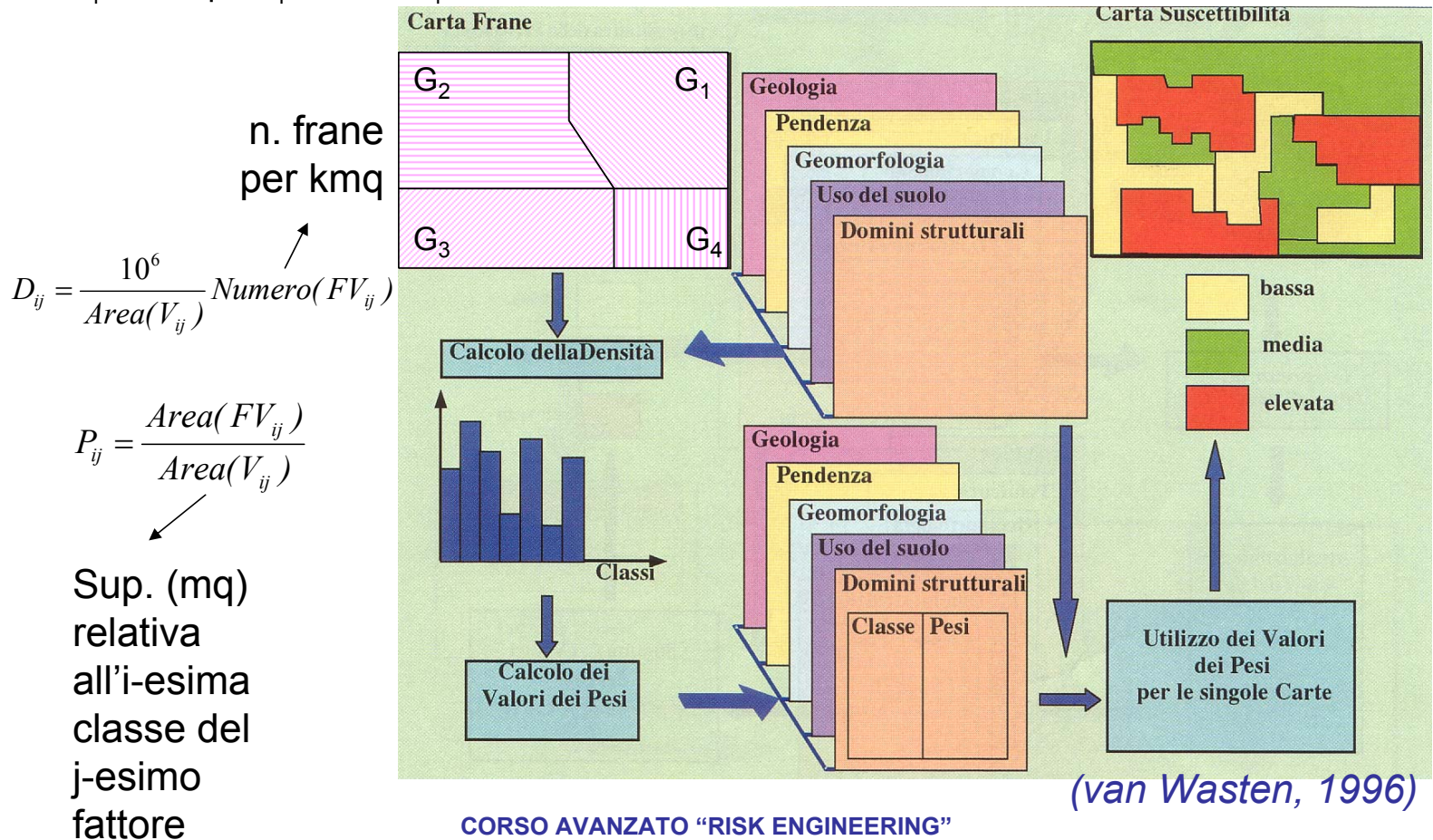
**Esempio:**

$$A^{G_1} = 4\text{kmq}; N^{G_1} = 4 \Rightarrow D^{G_1} = 1$$

$$A^{G_2} = 6\text{kmq}; N^{G_2} = 9 \Rightarrow D^{G_2} = 1.5$$

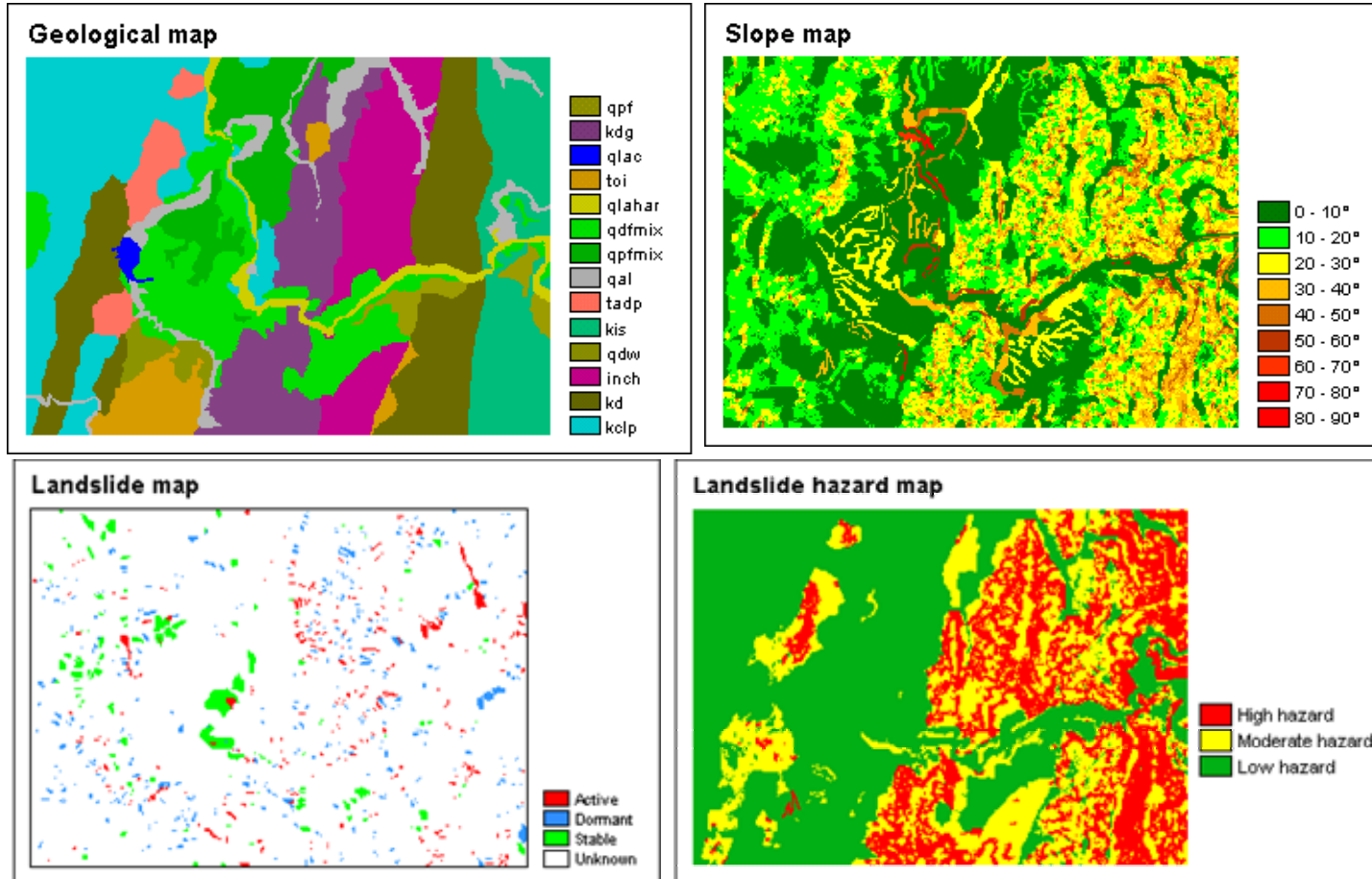
$$A^{G_3} = 3\text{kmq}; N^{G_3} = 5 \Rightarrow D^{G_3} = 1.67$$

$$A^{G_4} = 2\text{kmq}; N^{G_4} = 1 \Rightarrow D^{G_4} = 0.5$$



# *Esempi di modelli probabilistici*

SINMAP (Pack et al., 1998), PISA (Haneberg, 2004)



I metodi indiretti consentono di realizzare una cartografia del rischio tramite uno studio statistico della frequenza di frana e rivestono per questo un notevole interesse applicativo. Presentano però i seguenti limiti:

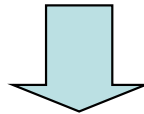
- la scala di rappresentazione comunemente utilizzata è 1:25000 e consente quindi una *bassa risoluzione*;
- il territorio risulta suddiviso in funzione del grado di pericolosità, ma si tratta di una *scala relativa* e non è quindi possibile fare riferimento ad una probabilità di accadimento o ad un tempo di ritorno.

*Per superare tali limiti è necessario affiancare i metodi indiretti con quelli deterministici.*

# Metodi deterministici

L'analisi deterministica si basa sulla **modellazione fisica** dei fenomeni franosi, in campo monodimensionale, bidimensionale o tridimensionale.

L'applicazione di tali modelli richiede la conoscenza di **dati geotecnici o geomeccanici puntuali** e specifici per le diverse tipologie di dissesto ⇒ **PROVE IN SITO E DI LABORATORIO.**



**I MODELLI DETERMINISTICI SONO APPLICABILI PER TIPOLOGIE DI INSTABILITA' FACILMENTE SCHEMATIZZABILI (scivolamenti traslazionali e colate) O SU SITI SPECIFICI (A SCALA DI VERSANTE)**

I modelli deterministici più semplici sono quelli che presuppongono la valutazione del **fattore di sicurezza**:

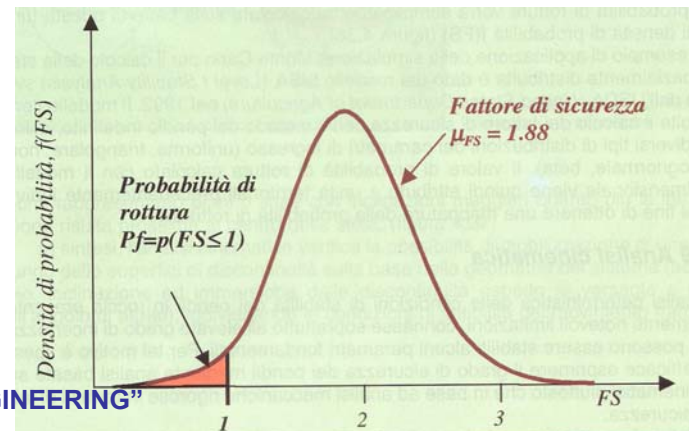
$$F_s = \frac{\text{resistenza al taglio del materiale}}{\text{resistenza al taglio mobilitata}} < 1$$

Pericolosità	F
Alta	< 1.2
Media	1.2 – 1.7
Bassa	> 1.7

Per alcuni tipi di movimento è possibile procedere alla determinazione del fattore di sicurezza (scivolamenti planari e rotazionali), mentre per altri è possibile fare riferimento a dei metodi analitici diversi, senza determinazione di un fattore di sicurezza (crolli, ribaltamenti e colamenti).

In termini statistici, la **probabilità di rottura** è data da:

$$P_f = p(F_s \leq 1)$$



## *Esempi di modelli deterministici*

- **LISA** (Hammond et al., 1992)
- **SHALSTAB** (Montgomery & Dietrich, 1994): modello previsionale deterministico su base fisica, lavora in ambiente SIT (é una estensione di ArcView!) e si basa sulla combinazione di due modelli, uno geotecnico (pendio indefinito) e uno idrogeologico (“Topmodel”, Beven & Kirkby, 1979) ⇒ carte di pericolosità, verificabili (“*validazione*”) attraverso il confronto con la cartografia dei dissesti rilevati.



# Evoluzione del movimento franoso

La previsione dell'evoluzione del fenomeno è fondamentale per una valutazione della pericolosità distribuita sul territorio, soprattutto per quelle tipologie di fenomeno caratterizzate da elevata velocità e notevole distanza di espandimento (es. debris flow e frane di crollo).

Le leggi che consentono di studiare la propagazione delle frane sono diverse a seconda della tipologia del fenomeno.

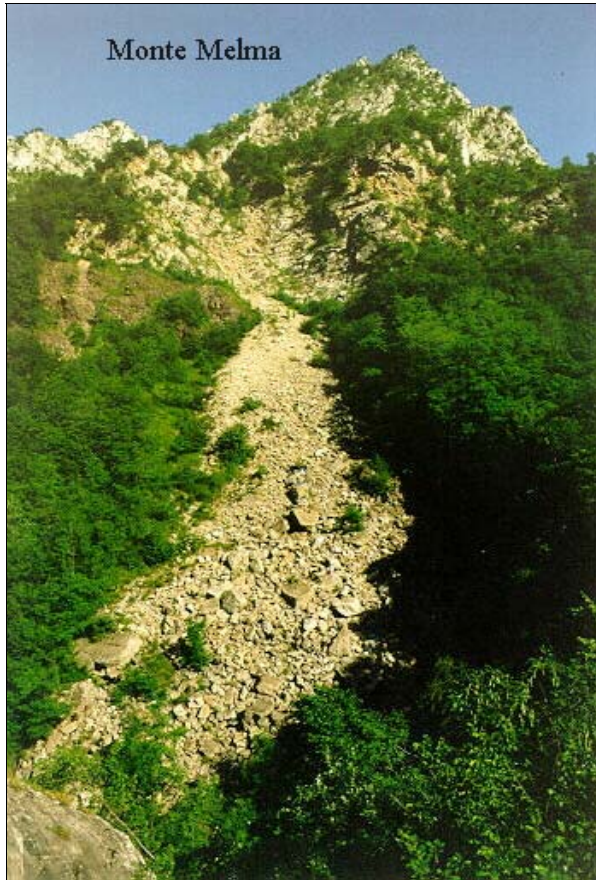
# Evoluzione del movimento franoso

## FRANE DI CROLLO

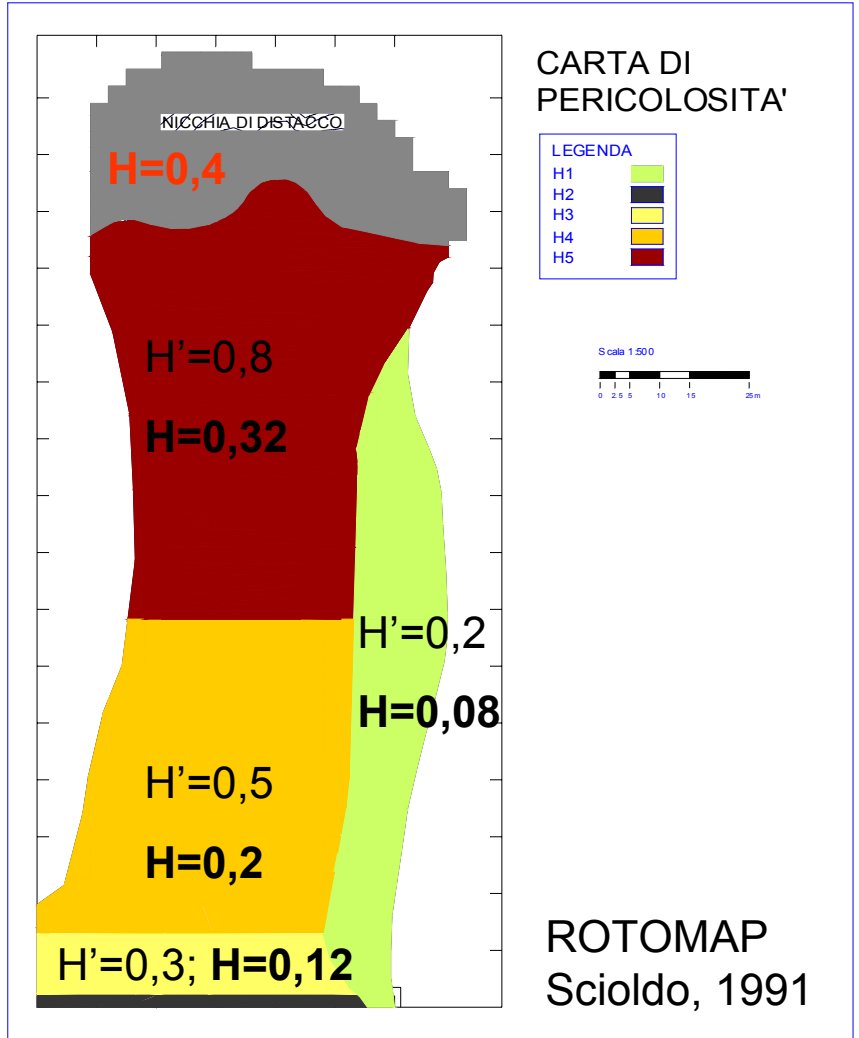
Il movimento dei blocchi è influenzato da diversi fattori:

- altezza della scarpata,
- caratteristiche geologiche e litologiche,
- caratteristiche morfologiche,
- vegetazione,
- presenza di opere di mitigazione e/o protezione o infrastrutture,
- possibilità di canalizzazione,
- presenza di tratti di versante a diversa pendenza.

# Esempio di modellazione di una frana di crollo



Le  
Mc  
Mc  
Isc  
Lir



# Evoluzione del movimento franoso

## COLATE DI DETRITO

- Riconoscimento eventuale **percorso** (pendio aperto, canali, aste fluviali, andamento in pianta)
- Misura delle **pendenze** delle singole aste e dell'angolo di confluenza tra le diverse aste
- Rilievo dei tratti con pendenza  $\theta > 20^\circ$  e con **copertura detritica** (soggetta ad instabilità anche in assenza di flusso superficiale); area del **bacino** di alimentazione
- Rilievo inclinazione media e volume del **materiale asportabile** o rimobilizzabile lungo il percorso ( $\theta > 10^\circ$ ) o derivante da **instabilità dei versanti**



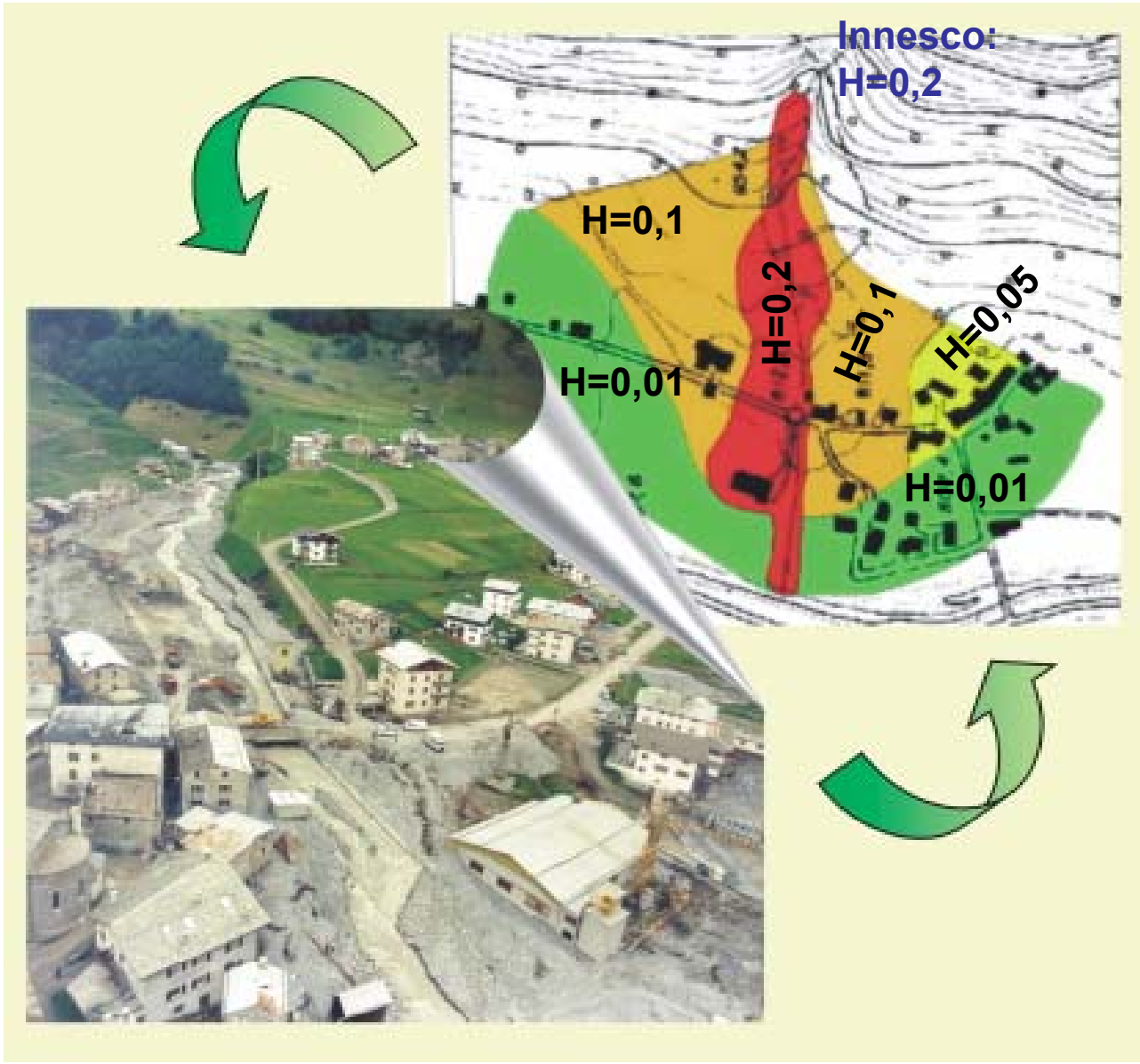
### STIMA PORTATE, VELOCITA', LIVELLI MASSIMI

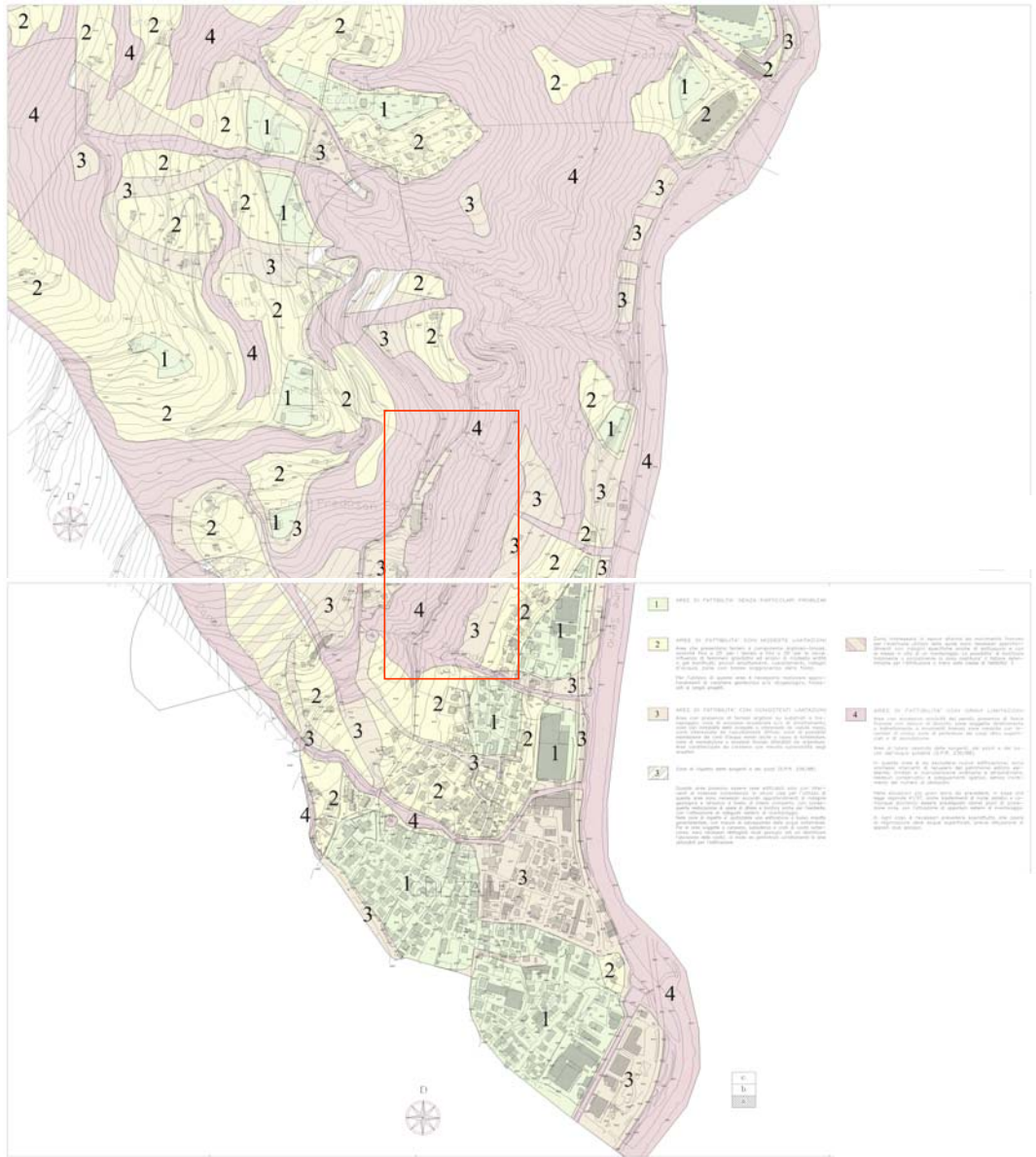
- Misura delle **pendenze**:  $3.5^\circ < \theta < 10^\circ$  → decelerazione e/o deposizione;  $\theta < 3.5^\circ$  → deposizione
- Confronto tra spessore della colata e topografia locale della conoide
- Individuazione di opere o infrastrutture (tipo, ubicazione, numero, costi, ecc.)



### PUNTO DI ESONDAZIONE E ZONE A RISCHIO DI ESPANDIMENTO

**Esempio di modellazione  
di una colata di detrito**



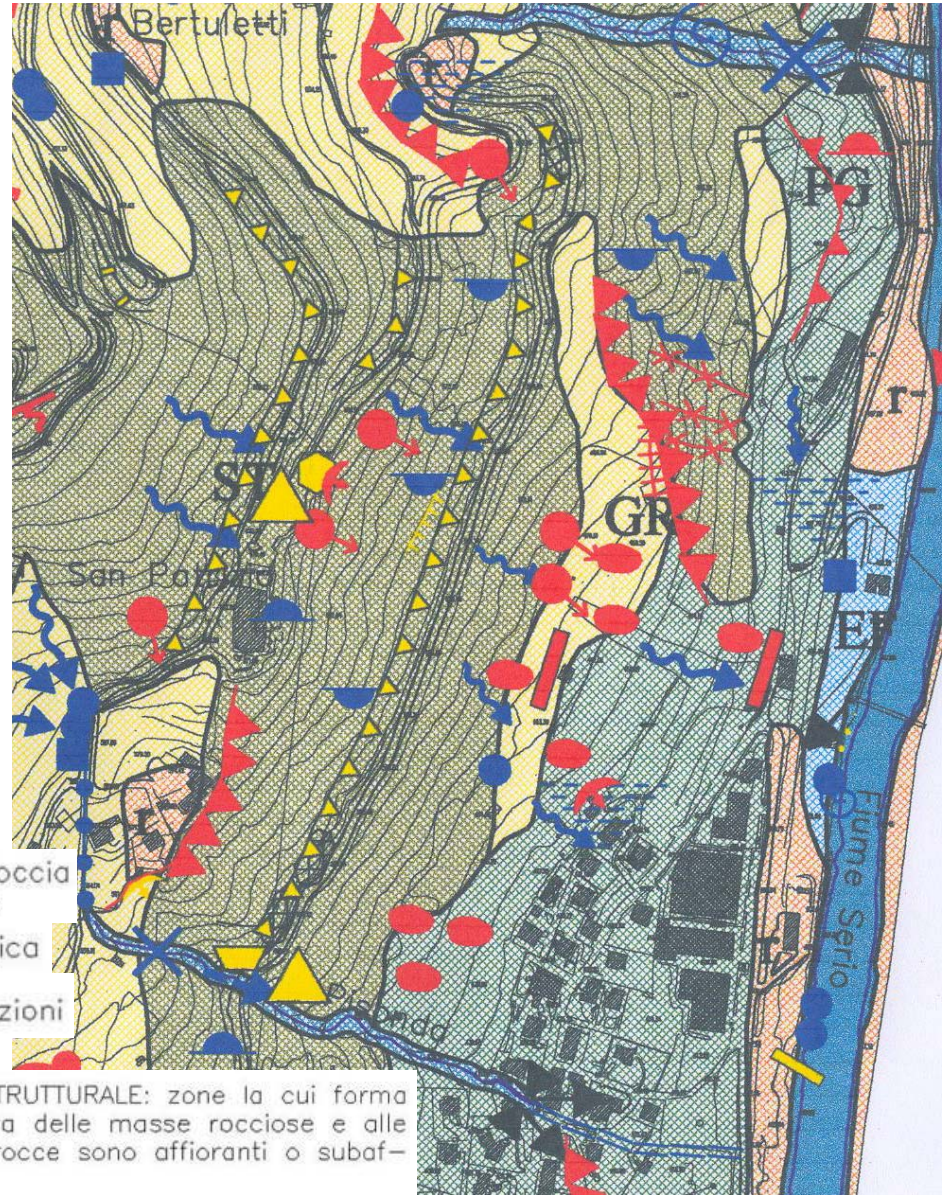


# Carta delle dinamica geomorfologica



ST


AREE A PREVALENTE MORFOLOGIA STRUTTURALE: zone la cui forma del territorio è dovuta alla giacitura delle masse rocciose e alle dislocazioni tettoniche; in esse le rocce sono affioranti o subaffioranti.



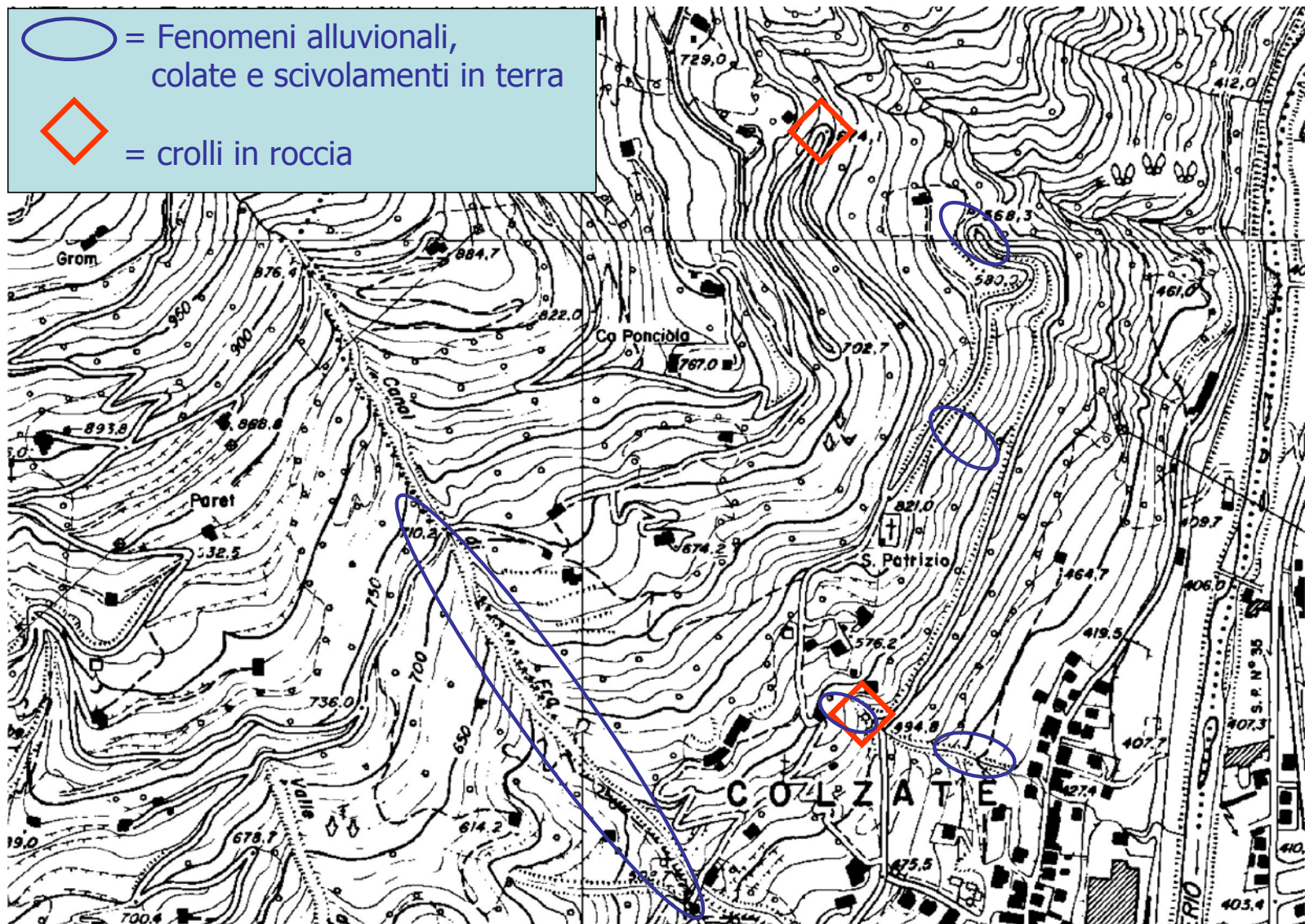
# Elenco dissesti

1960		Frane massi in fase costruzione strada (prot. n.6)
1968		Alluvione con conseguenti frane e smottamenti in diverse loc. (prot. n. 7)
1971		Frana proprietà Branchi (prot. n. 10)
1972	nov.	Piogge causano franamento ciglio strada Colzate-Bondo (prot. n. 11)
1972	luglio	Alluvione con crolli di massi e colate di terreno sulla strada (prot. n. 12)
1975	12-ago	Smottamento e frana lungo la strada (prot. n. 14)
1976	12-ago	Frane lungo la strada in seguito a nubifragio (prot. n. 16)
1979	27-ago	Precipitazioni provocano frana che invade la strada (prot. n. 17)
1984	26-nov	Segnalazione movimento franoso in località Bondo di Colzate (prot. n. 18)
1987	13-feb	Smottamento di terreno in località S. Patrizio (prot. n. 18)
1987		Frana terreno in località Cava del Marmo (prot. n. 18)
nnn		Precipitazioni straordinarie fratturano la roccia lungo la strada (prot. n. 18)
1987	luglio	Instabilità parete rocciosa zona Pisonda (prot. n. 24)
1987	18-mar	Crollo massi in loc. Pisonda (prot. n. 26)
1989	23-nov	Masso pericolante in via San Bernardino (Bondo) (prot. n. 26)
1993	02-ott	Colata di terra fa franare parte del parcheggio del santuario(prot. n. 30)
2000		Alluvione Canal di Fra'
2002	mag	Crollo masso 8mc in prossimità del parcheggio antistante il Santuario
2003	nov	Caduta detriti e massi (vol. max 1mc) al tornante della Cappella Alpini



 = Fenomeni alluvionali,  
colate e scivolamenti in terra

 = crolli in roccia



**LA VEGETAZIONE  
RICOPRE  
COMPLETAMENTE  
IL VERSANTE  
NASCONDENDO LA  
PARETE ROCCIOSA  
(NICCHIA DI  
DISTACCO).**

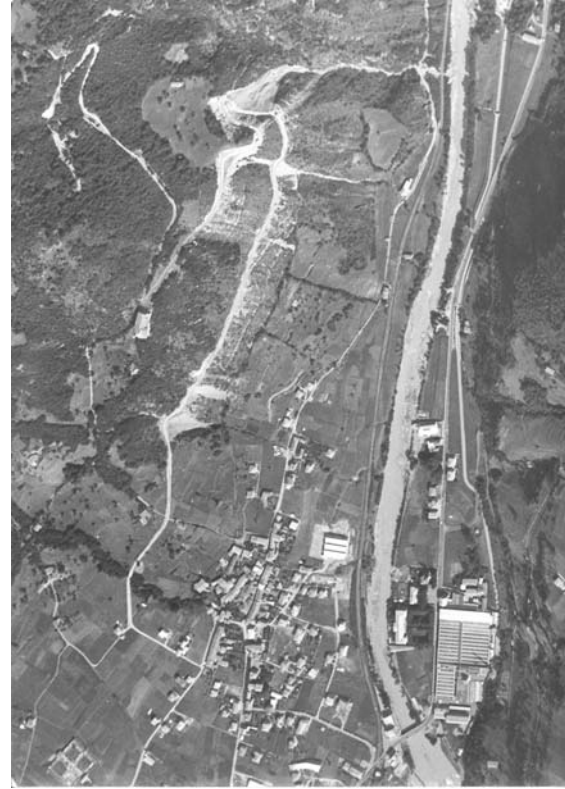
**NON E' VISIBILE  
UNA FALDA DI  
DETRITO ATTIVA**



# Analisi foto aeree



**1936**



**1962**

# Analisi dendrocronologica

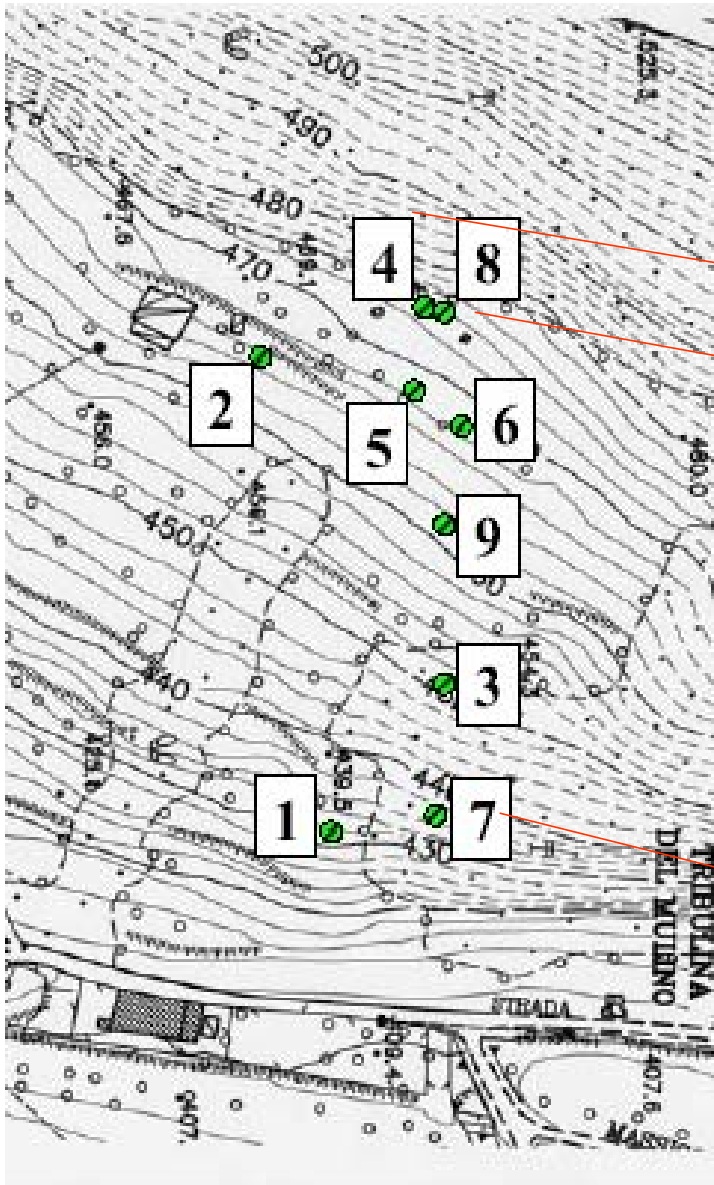
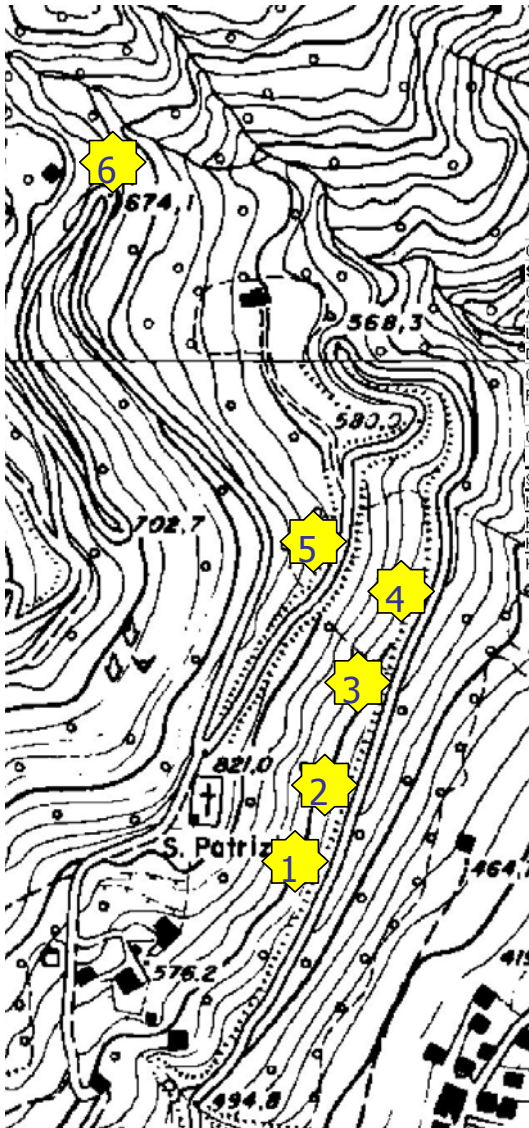


Foto 1. I due massi codici 4 (a sinistra) e 8 (a destra), con i rispettivi alberi (41, 42 e 81) che sono stati analizzati.



Foto 2. Albero codice 71.

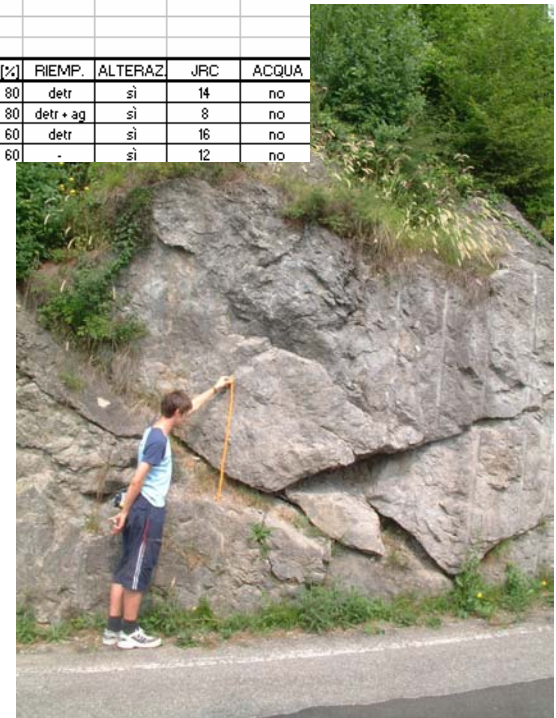
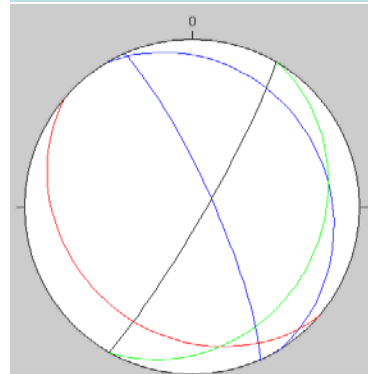
# Rilievo geomeccanico



Comune	Colzate	Località	San Patrizio
Stazione n	3	Data	29/06/2004
Quota	540 m s.l.m.		
Area aff.	24 mq		
Litotipo prevalente	Dolomia Principale		
Descrizione a. r.	massiccia, grigio chiara in patina, grigio medio in frattura		
Grado di alterazione	mediamente alterato		
Foto	3		
Giacitura versante	120°/84'		

SET	GIACITURA	JCS [Mpa]	RQD [%]	SPAZ. [cm]	AP. [mm]	PERS. [%]	RIEMP.	ALTERAZ	JRC	ACQUA
K1	220°/25'	52	95	95	10	80	detr	si	14	no
K2	60°/20'	32	95	100	2-100	80	detr + ag	si	8	no
K3	66°/80'	35	95	150	60	60	detr	si	16	no
K4	120°/24'	31	95	150	chiusa	60	-	si	12	no

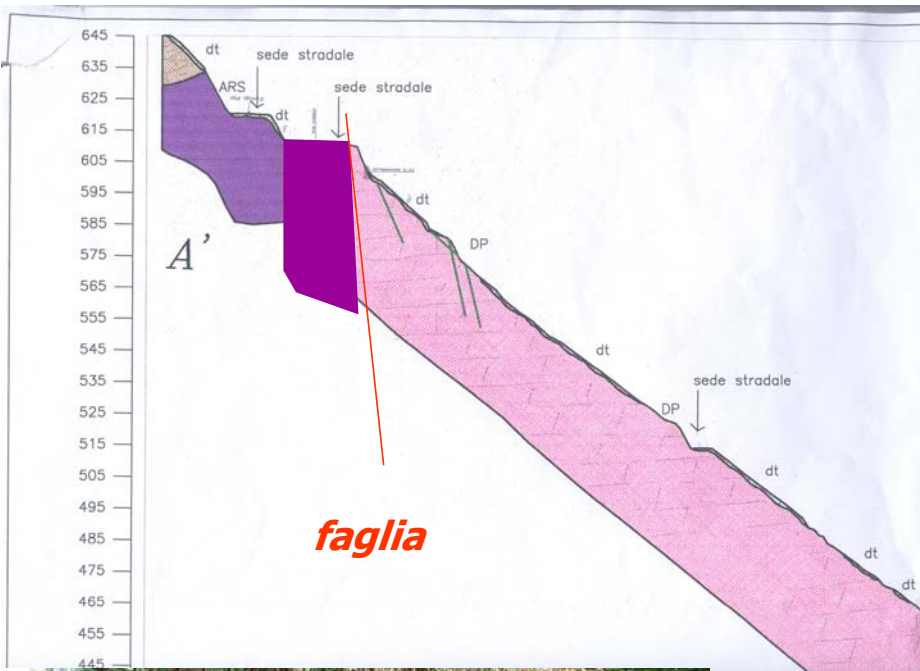
RMR = 54÷64 ⇒  
ROCCIA DA BUONA A  
MEDIOCRE



# Sondaggi meccanici



# Assetto geologico e tettonico rilevato nella zona di distacco



# Cause presunte di distacco

- Assetto litostratigrafico e strutturale dell'ammasso roccioso
- Pressioni neutre dovute alle precipitazioni meteoriche
- Progressivo scalzamento al piede delle acque ruscellanti
- Bioclastesi
- Spinta attiva delle argilliti





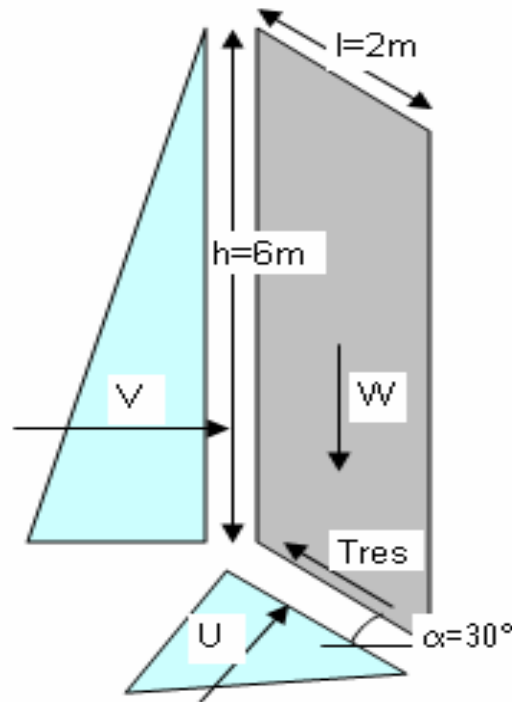
# ANALISI DI STABILITA'

Scivolamento

$$F_s = 1.25$$

Probabilità innesco  
medio-alta

$$H_d = p(F_s < 1) = 0.8$$



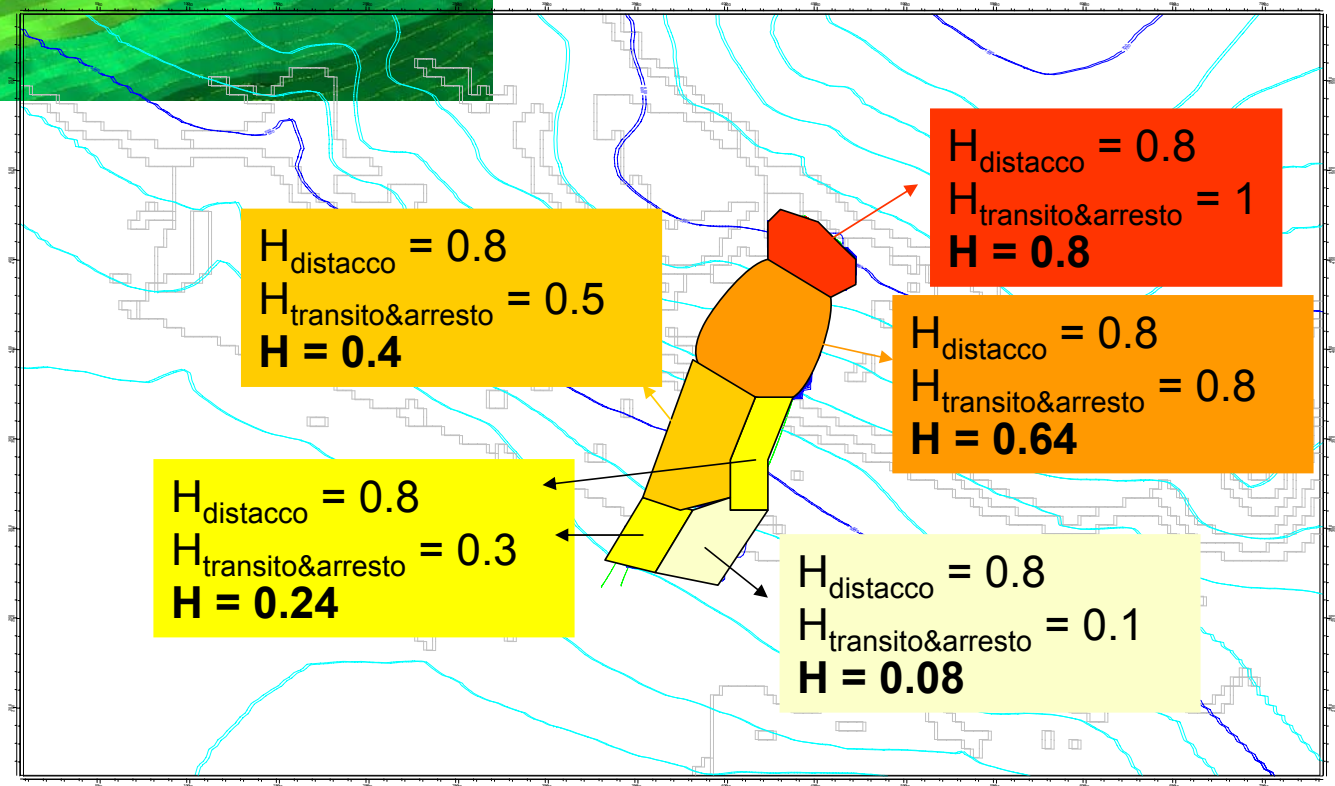
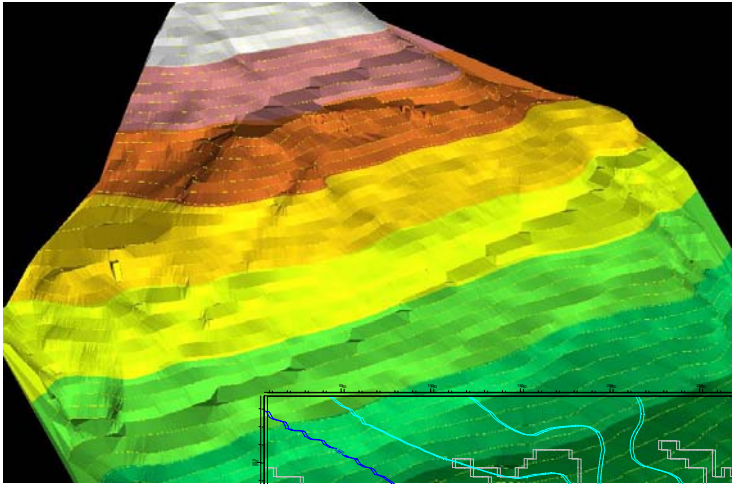
$$V \cong 10.4 \text{ mc}$$

$$\gamma = 25 \text{ kN/mc}$$

$$c' = 200 \text{ kPa}$$

$$\phi' = 30^\circ$$

# Ricostruzione della dinamica di caduta



# Previsione temporale dell'evento

## TEMPO DI RITORNO

$$T = 1/P_{\text{annua}}$$

- analisi delle serie temporali degli eventi
- analisi delle serie temporali dei fattori di innesco (es. piogge, terremoti, ecc.)
- monitoraggio

*N.B.: Per alcuni Autori il termine pericolosità indica unicamente la probabilità di occorrenza in termini temporali, mentre per altri Autori lo stesso termine può essere riferito ad ogni interpretazione dello stato di natura che contenga elementi previsionali.*

In riferimento alla vita attesa dell'opera ( $t$ ), è possibile definire la pericolosità  $H_t$  come la probabilità che nel periodo  $t$  si verifichi almeno un evento calamitoso di intensità  $I$  corrispondente a un tempo di ritorno  $T$ :

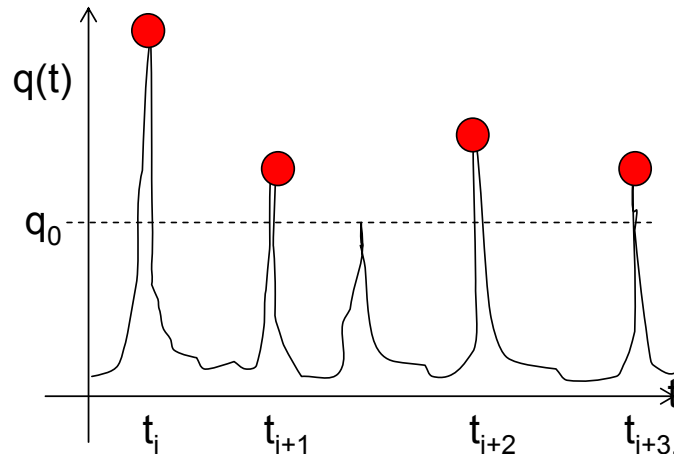
$$H_t = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^t$$

Tabella 1: Pericolosità in funzione del tempo di ritorno per diversi periodi di riferimento

	Tempo di ritorno [anni]							
	2	5	10	20	50	100	200	500
2	75.0%	36.0%	19.0%	9.8%	4.0%	2.0%	1.0%	0.4%
5	96.9%	67.2%	41.0%	22.6%	9.6%	4.9%	2.5%	1.0%
10	99.9%	89.3%	65.1%	40.1%	18.3%	9.6%	4.9%	2.0%
20	100.0%	98.8%	87.8%	64.2%	33.2%	18.2%	9.5%	3.9%
50	100.0%	100.0%	99.5%	92.3%	63.6%	39.5%	22.2%	9.5%
100	100.0%	100.0%	100.0%	99.4%	86.7%	63.4%	39.4%	18.1%
200	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	98.2%	86.6%	63.3%	33.0%
500	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	99.3%	91.8%	63.2%

Ad esempio, **i corpi di frana possono essere interessati da uno o più mobilizzazioni**, dannose o meno, per cui si osserva la seguente casistica:

- un singolo episodio catastrofico (*fenomeni istantanei e/o monoepisodici*), per eventi destabilizzanti fortemente anomali o per ammassi estremamente fragili;
- più episodi di rimobilizzazione (*fenomeni ricorrenti*), la cui frequenza dipende a parità di eventi destabilizzanti dalle caratteristiche dell'ammasso instabile e/o a parità di ammassi in frana dall'attività geodinamica e climatica dell'area (poco o molto ricorrenti);
- da processi deformativi a velocità quasi costante (*continui*).

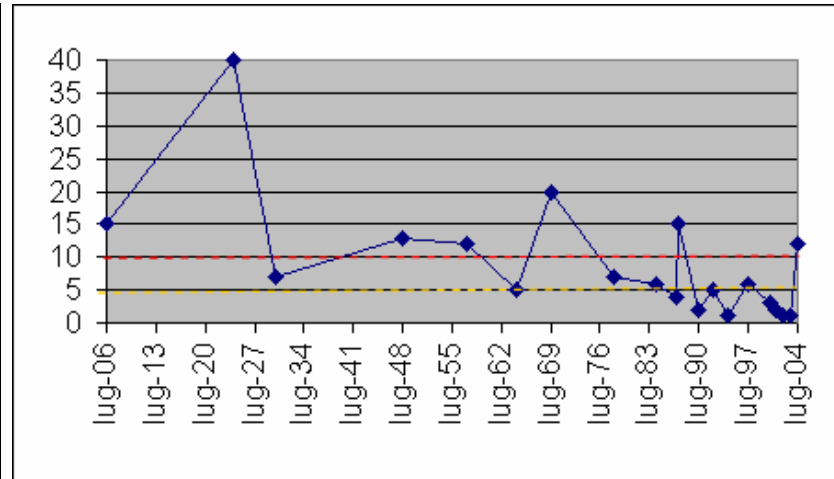


Nel caso di eventi ricorrenti l'analisi di rischio si basa generalmente su modelli statistici di tipo poissoniano, secondo il quale la probabilità di avere  $n$  eventi critici nel periodo  $\tau$  è data dalla seguente relazione:

$$P[N(0,\tau)=n] = (\lambda\tau)^n e^{-\lambda\tau}/n!$$

dove  $\lambda$  è il tasso di accadimento poissoniano

Data evento	Volume [mc]
1906	15
1924	40
1930	7
1948	13
1957	12
1964	5
1969	20
1978	7
1984	6
Mag - 1987	4
Lug - 1987	15
1999	2
1992	5
1994	1
1997	6
2000	3
2001	2
2002	1
2003	1
2004	12



Per una soglia di 10mc, la probabilità di accadimento risulta:

$$p(1 \text{ evento } 1 \text{ un anno}) = 0.066$$

$$p(1 \text{ evento in } 10 \text{ anni}) = 0.39$$

$$p(1 \text{ evento in } 20 \text{ anni}) = 0.436$$

Al diminuire della soglia critica, aumenta il tasso di accadimento poissoniano e quindi aumenta anche la probabilità:

$$p(1 \text{ evento in } 1 \text{ anno}) = 0.117$$

$$p(1 \text{ evento in } 2 \text{ anni}) = 0.209$$

$$p(1 \text{ evento in } 5 \text{ anni}) = 0.378$$

$$p(\text{un evento in } 10 \text{ anni}) = 0.440$$

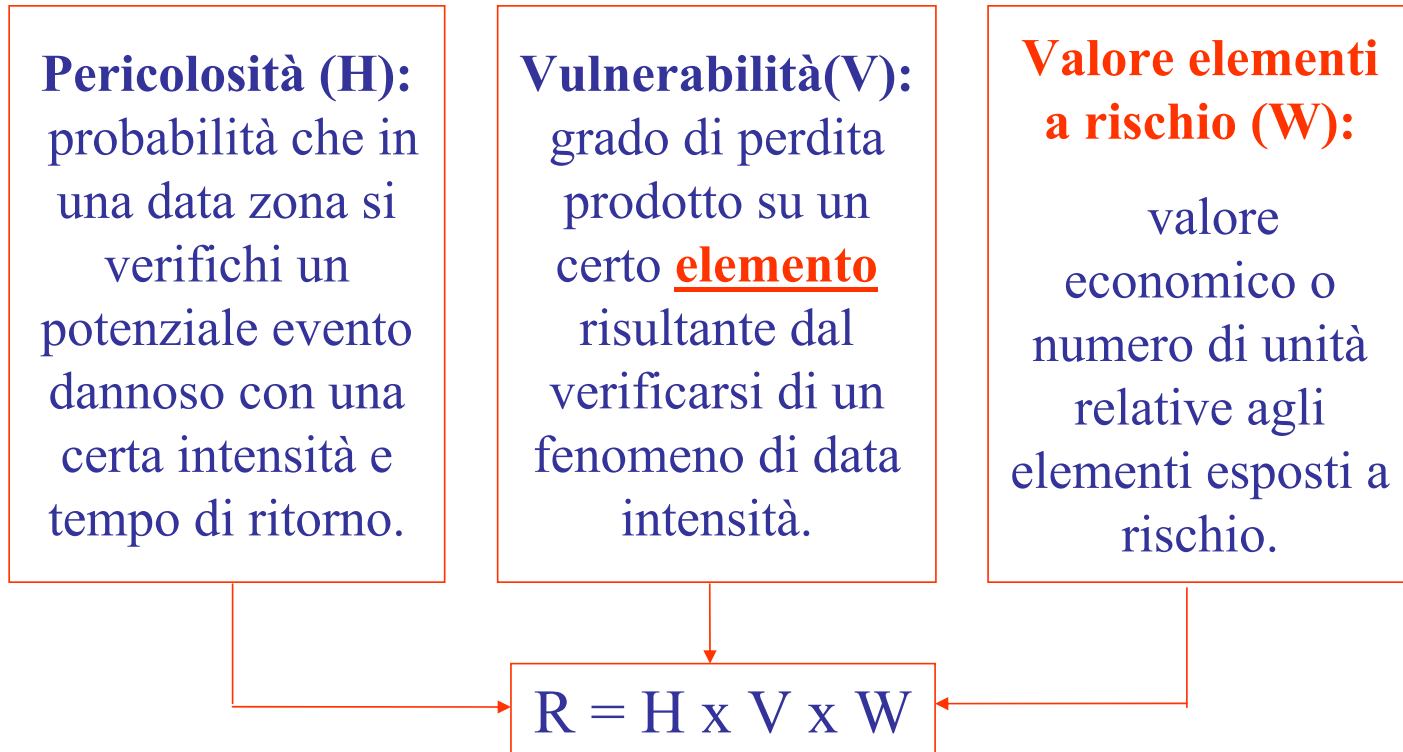
# Previsione temporale in relazione ai fattori d'innescio

- **Attività antropica:** esplosioni, vibrazioni, infiltrazioni d'acqua di origine antropica (fognature, irrigazione), modificazioni del livello di falda in seguito ad invaso-svaso di bacini artificiali ...
- **Erosione:** delle sponde fluviali (con scalzamento al piede del versante), delle testate d'impluvio, delle coste ...
- **Precipitazioni:** aumento delle pressioni interstiziali, del peso di volume e dell'erosione al piede
- **Terremoti**

$$P[evento_i | indicatore] = \frac{P[evento_i] * P[indicatore | evento_i]}{\sum_{i=1}^n P[indicatore | evento_i] * P[evento_i]}$$



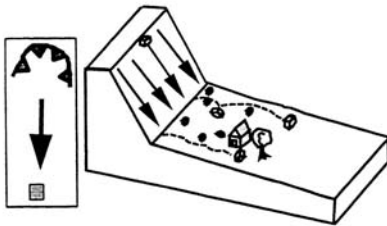
# VALUTAZIONE DEL RISCHIO



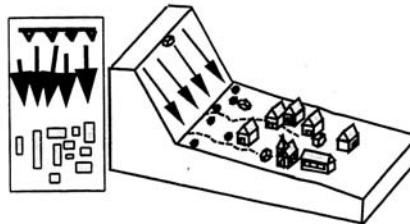
(UNESCO, 1984)

# PARAMETRI FONDAMENTALI

**ELEMENTO A RISCHIO PUNTIFORME**  
Distribuzione puntiforme  
Possibile impatto con elemento fisso

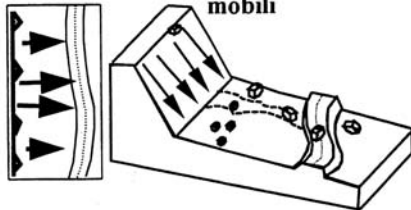


**ELEMENTI A RISCHIO MULTIPLI**  
Distribuzione Areale  
Possibile impatto con 1 o più  
elementi fissi

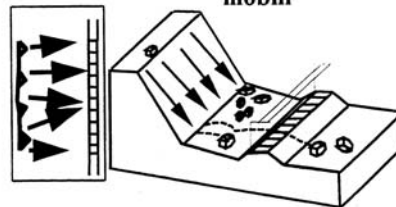


PROBABILITÀ DI IMPATTO COMPLESSA E CONDIZIONATA DA VARI FATTORI

**ELEMENTI A RISCHIO LINEARI**  
Distribuzione lineare  
Impatto con struttura fissa e/o elementi  
mobili



**ELEMENTI A RISCHIO LINEARI**  
Distribuzione lineare  
Impatto con strutture fisse e/o elementi  
mobili



## E = Elementi di rischio

Popolazione, proprietà, attività economiche, servizi pubblici e beni ambientali in una data area esposta a rischio (UNESCO, 1984).

## **Es = Es(I, H): Esposizione al rischio**

Probabilità che un certo elemento sia esposto al rischio all'occorrenza di un fenomeno di una certa intensità (I) in un certo momento e in un certo luogo, cioè la probabilità che un certo elemento si esposto ad una certa pericolosità (H).

$$Es = p(E=x,y,z,t)=p(E=x,y,z)*p(E=t)$$

Se l'elemento è in movimento, si deve tenere conto anche della probabilità di impatto:

$$pi = H*Es$$

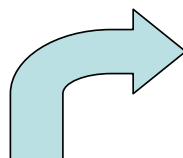
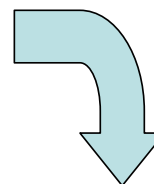
# VALUTAZIONE DEGLI ELEMENTI A RISCHIO

## Stima qualitativa (PRG - Regione Lombardia)

ELEMENTI A RISCHIO	ZONE URBANISTICHE
E1	<ul style="list-style-type: none"><li>- zona boschiva</li><li>- zona agricola estensiva</li><li>- demanio pubblico</li></ul>
E2	<ul style="list-style-type: none"><li>- zona agricola speciale</li><li>- infrastrutture pubbliche (strade comunali non strategiche)</li><li>- zona di protezione ambientale</li><li>- verde pubblico attrezzato, parchi pubblici</li></ul>
E3	<ul style="list-style-type: none"><li>- infrastrutture pubbliche (strade statali, provinciali e comunali strategiche, ferrovie, lifelines: oleodotto, elettrodotto, acquedotto)</li><li>- zone per impianti tecnologici e discariche di RSU o inerti, zone di cava</li></ul>
E4	<ul style="list-style-type: none"><li>- centri urbani</li><li>- nucleo rurale minore di particolare pregio</li><li>- zone di completamento urbanistico</li><li>- zone di espansione urbanistica</li><li>- zona artigianale, industriale e commerciale</li><li>- servizi pubblici</li><li>- infrastrutture pubbliche principali e strategiche</li><li>- zone di discarica speciali o tossico-nocivi</li><li>- zona alberghiera</li><li>- zona per campeggi e villaggi turistici</li></ul>

# ...Regione Lombardia

CLASSI DI  
FATTIBILITA'



ZONE  
URBANISTICHE

	H1	H2	H3	H4	H5
E1	R1	R1	R1	R1	R2
E2	R1	R1	R2	R2	R3
E3	R1	R2	R2	R3	R4
E4	R1	R2	R3	R4	R4

*Tabella 3. Matrice per la valutazione del rischio (R) in base alle classi di pericolosità (H) e alle classi di elementi a rischio (E).*

# VALUTAZIONE DEL RISCHIO

**Pericolosità (H):**  
probabilità che in  
una data zona si  
verifichi un  
potenziale evento  
dannoso con una  
certa intensità e  
tempo di ritorno.

**Vulnerabilità(V):**  
grado di perdita  
prodotto su un  
certo elemento  
risultante dal  
verificarsi di un  
fenomeno di data  
intensità.

**Valore elementi  
a rischio (W):**  
  
valore  
economico o  
numero di unità  
relative agli  
elementi esposti a  
rischio.

$$R = H \times V \times W$$

(UNESCO, 1984)

# *PARAMETRI FONDAMENTALI*

## **W = Valore degli elementi a rischio**

Valore economico o numero di unità relative ad ognuno degli elementi in una data area (UNESCO, 1984). Il valore degli elementi a rischio può essere pertanto espresso in termini di numero o di quantità di unità esposte (es. numero di persone, ettari di terreno agricolo) oppure in termini monetari. Il valore è una funzione del tipo di elemento a rischio:

$$\mathbf{W = W(E)}$$

# VALUTAZIONE DEGLI ELEMENTI A RISCHIO

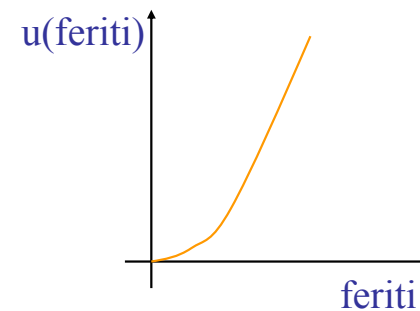
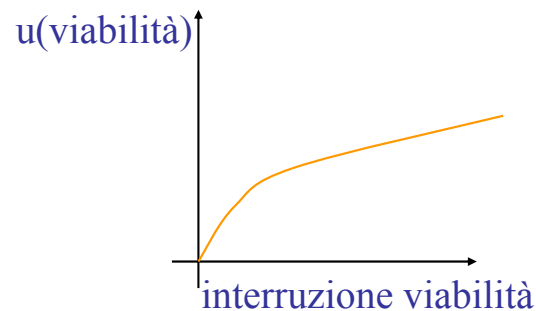
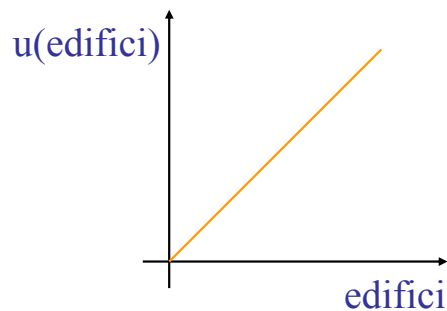


- QUANTIFICAZIONE DEGLI ELEMENTI A RISCHIO:
  - n° di unità discrete (N) per edifici, attività commerciali, ecc.
  - unità di superficie (S) per terreni, lotti abitativi, ecc.
- CALCOLO DEL VALORE:
  - calcolo di un valore discreto dei singolo elementi: il confronto tra le diverse tipologie è possibile solo se si sceglie un valore di riferimento, ad es. una valutazione assicurativa, altrimenti si hanno valori relativi
  - utilizzo di funzioni di utilità
  - utilizzo di formule empiriche
  - stima qualitativa del valore complessivo per una certa area



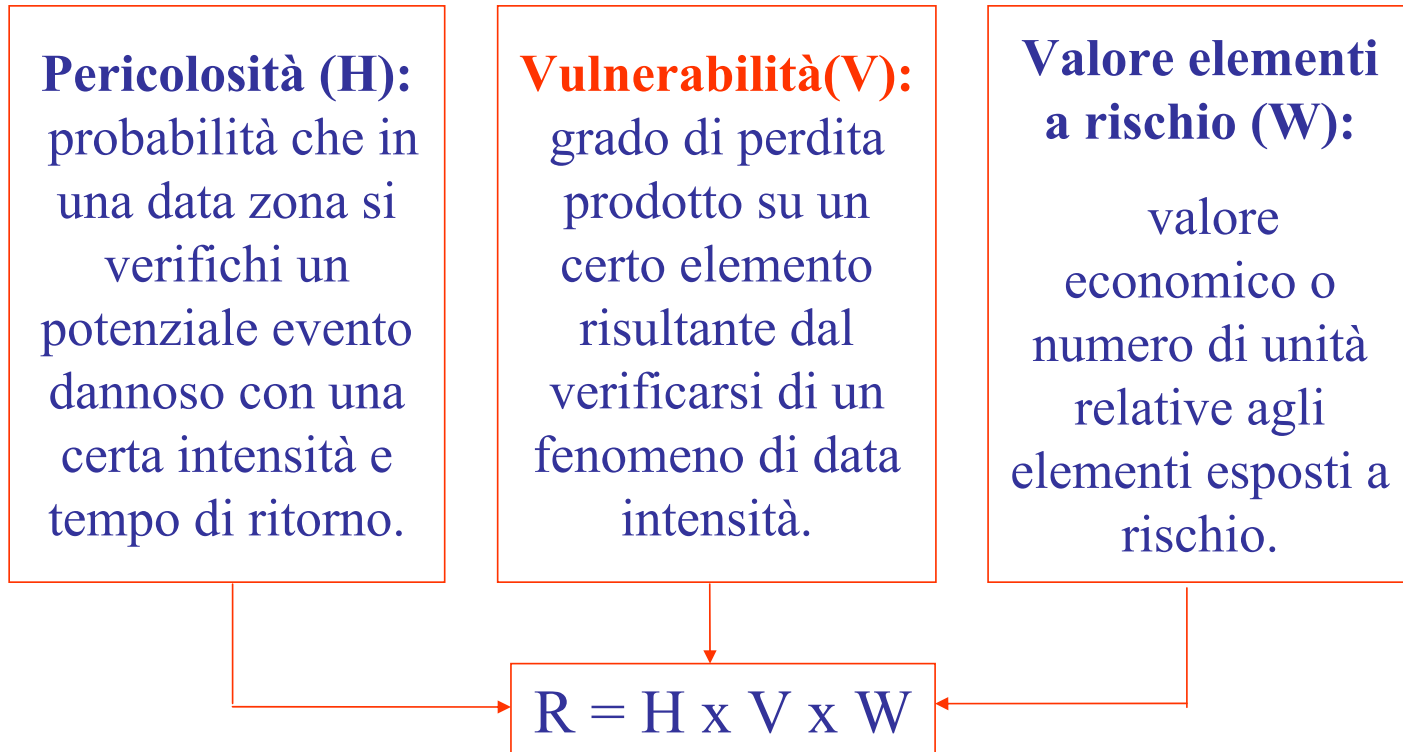
# VALUTAZIONE DEGLI ELEMENTI A RISCHIO - Funzioni di utilità

Per ogni elemento si individua l'andamento dell'utilità sociale o individuale  $u(x_i)$  e gli si attribuisce un peso  $w_i$ :



$$U = \sum w_i \cdot u(x_i)$$

# VALUTAZIONE DEL RISCHIO



(UNESCO, 1984)

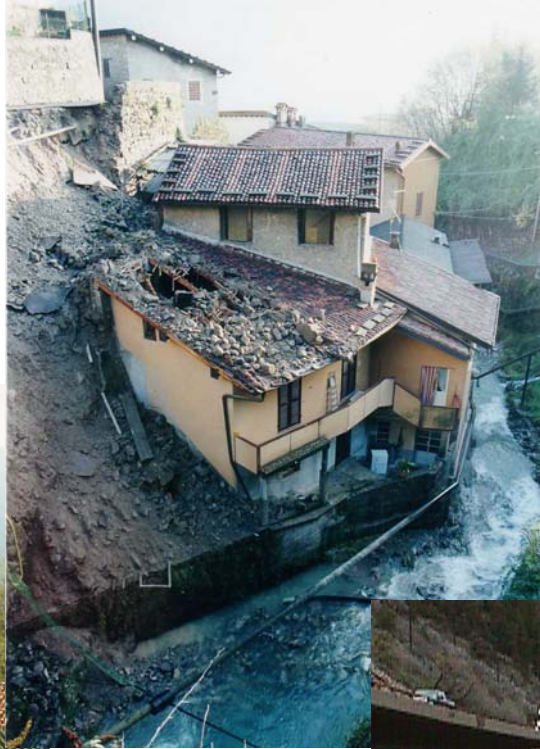
# *PARAMETRI FONDAMENTALI*

## **V = Vulnerabilità**

Grado di perdita del prodotto su un certo elemento o gruppo di elementi esposti a rischio risultante dal verificarsi di un fenomeno naturale di una data intensità (UNESCO, 1984). E' espressa in una scala da 0 (nessuna perdita) a 1 (perdita totale) ed è una funzione dell'intensità del fenomeno e della tipologia di elemento a rischio:

$$\mathbf{V = V(I,E)}$$





# VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA'



$$V = V(I, E)$$

*La vulnerabilità di uno stesso elemento per fenomeni pericolosi differenti deve essere valutata in modo differente!*

- APPROCCIO QUANTITATIVO
- APPROCCIO EURISTICO

# VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA'

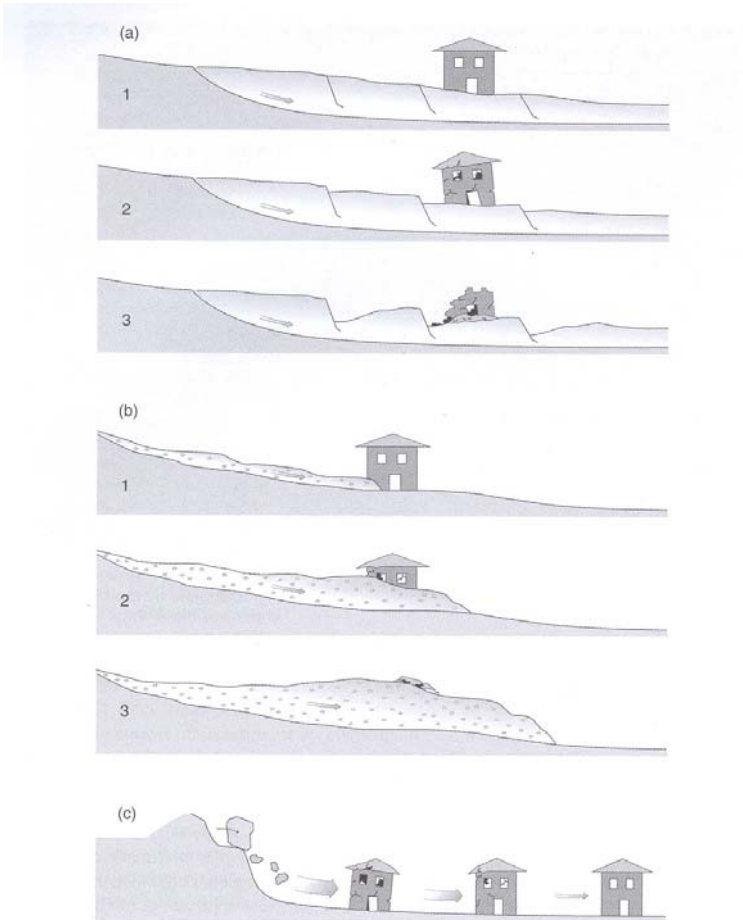
## Approccio quantitativo

Si calcola la vulnerabilità (compresa tra 0 e 1) per ogni elemento a rischio. La vulnerabilità complessiva è data dalla funzione  $f(V)$  di densità di distribuzione dei singoli valori con media  $E(V)$ .

Il calcolo della vulnerabilità dei singoli elementi deve tenere conto di:

- intensità  $I$  del fenomeno (variabile nello spazio!),
- costituzione e struttura dell'elemento,
- posizione (orientazione) dell'elemento rispetto al fenomeno,
- presenza di eventuali protezioni.

## Danni prodotti da diverse tipologie di dissesto in funzione della loro intensità e della vicinanza degli elementi a rischio:



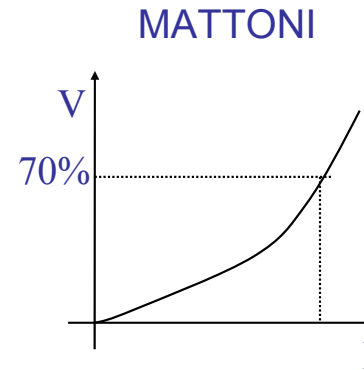
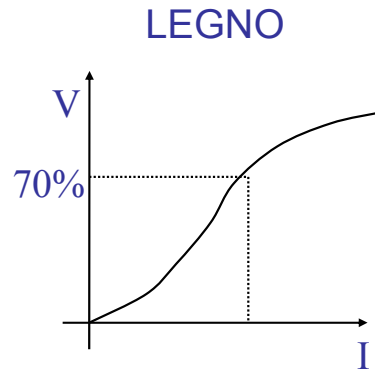
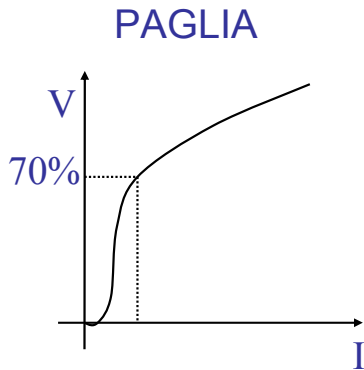
**Figure 2.16** Schematic consequences of different velocities of movement for different landslide types (adopted from Flageolett, 1999). (a1) A slide creeps or (a3) fails suddenly. (b1) A debris flow progresses in low or (b3) high velocities with respective changes in flow height. (c) A slow- or fast-moving rockfall damages, depending on the size and consequent momentum, elements at risk to a different degree. The degree depends on the distance between the process and the location of the element at risk

Flageolett, 1999

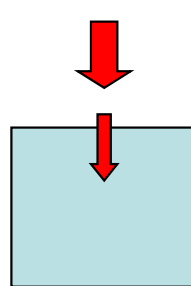


# VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA'

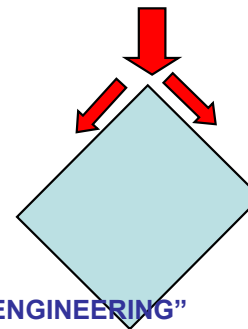
## Approccio quantitativo



Il muro viene  
abbattuto



CORSO AVANZATO "RISK ENGINEERING"



Nessun  
danno

# VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA'

## Approccio euristico

Portano ad una stima qualitativa o semi-quantitativa della vulnerabilità espressa generalmente in classi.

Si basano dunque su stime soggettive e sull'utilizzo di apposite matrici.

*(Regione Lombardia, 2001)*

Grado di danno	% valore della costruzione	Tipo di danno
1	Qualche %	Danni leggeri non strutturali. Stabilità non pregiudicata
2	10-30	Fessurazioni dei muri
3	50-60	Deformazioni importanti. Fessure aperte e conseguente evacuazione necessaria
4	70-90	Cedimento parziale dei pavimenti, brecciate nei muri, disarticolazione delle pareti. Evacuazione immediata
5	100	Distruzione totale e recupero impossibile

# VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA'

## Osservazioni

- E' uno degli aspetti più critici della valutazione del rischio.
- Gli approcci euristici e soggettivi hanno un impiego prevalente grazie alla facilità di applicazione, ma introducono un elevato margine di incertezza e pregiudicano a rigore la valutazione del rischio totale.
- Gli approcci quantitativi presentano notevoli difficoltà nell'integrazione e nella gestione di grandezze diverse e di difficile determinazione.

# PARAMETRI FONDAMENTALI

## **$W_1$ = Valore potenziale delle perdite**

Entità potenziale delle perdite nel caso di un evento con intensità fissata (UNESCO, 1984). Può essere espresso in termini di numero o quantità di una unità esposte oppure in termini monetari. Per una determinata Per una determinata tipologia di elementi a rischio e per una data intensità  $I$  il valore potenziale delle perdite è dato da:

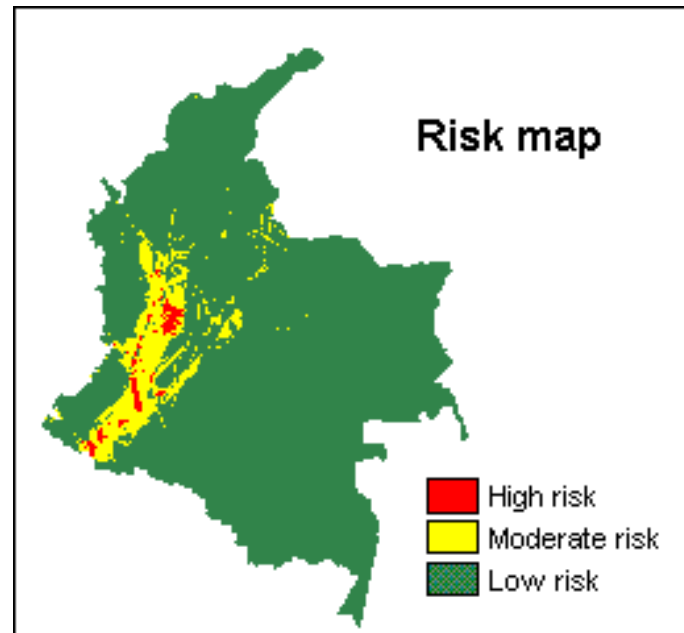
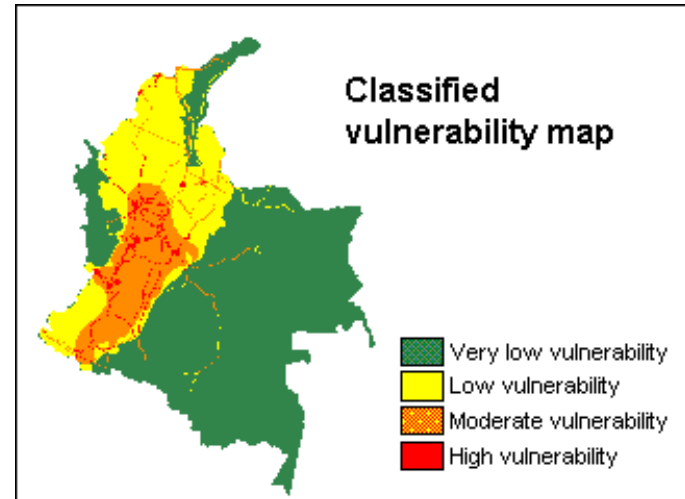
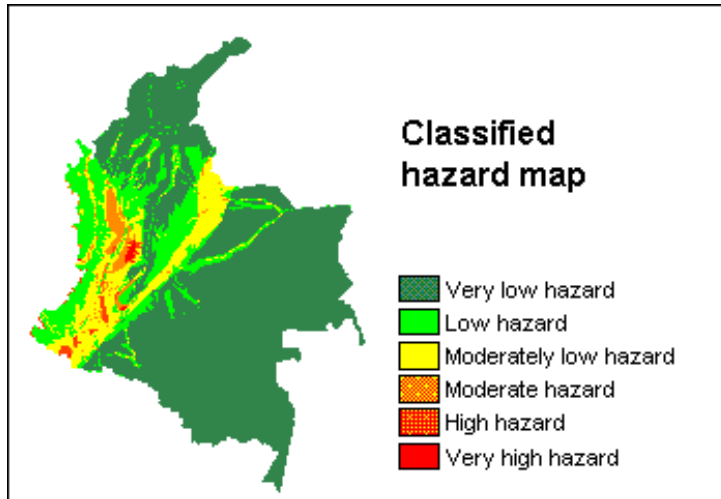
$$W_1 = W_1(I, E) = W * V$$

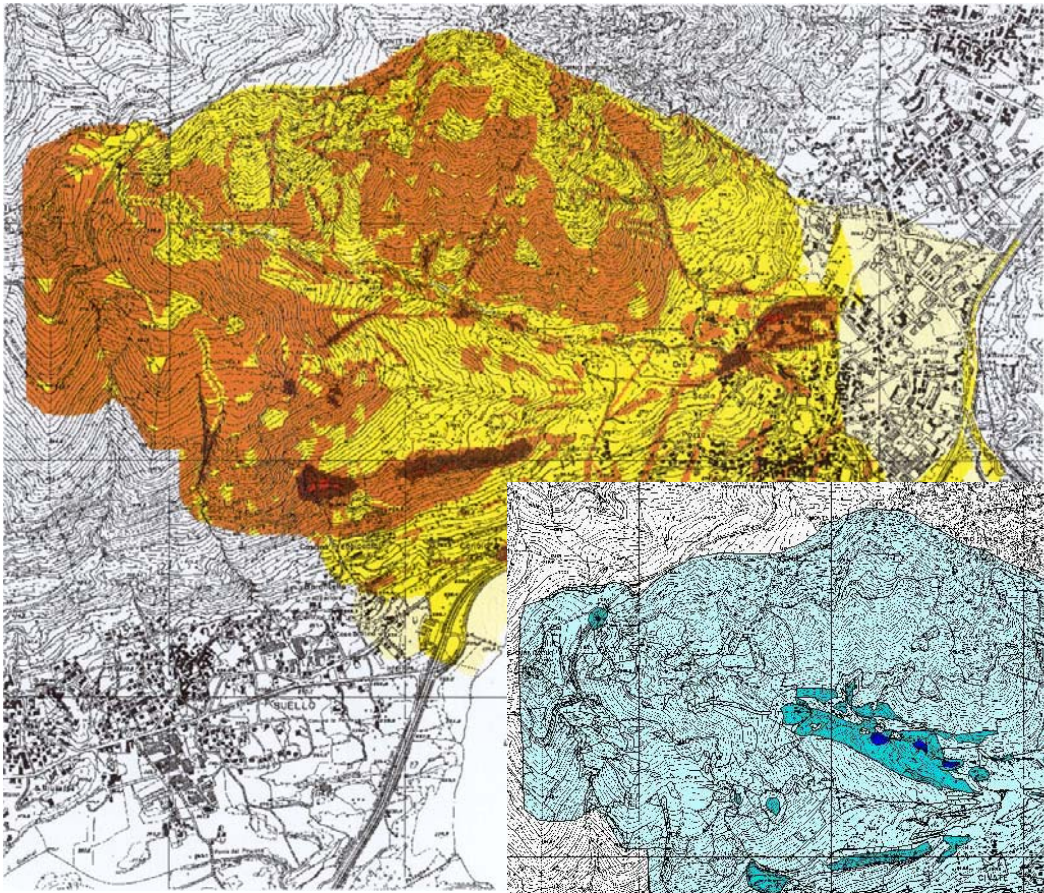
# IL RISCHIO GEOLOGICO

## Rischio specifico (Rs)

Grado di perdita atteso quale conseguenza di un particolare fenomeno naturale di data intensità, espresso in termini di probabilità annua (UNESCO, 1984); per una data tipologia di elemento a rischio **E** e per una data intensità **I** il rischio specifico è dato da:

$$R_s = R_s(I, E) = H * V$$

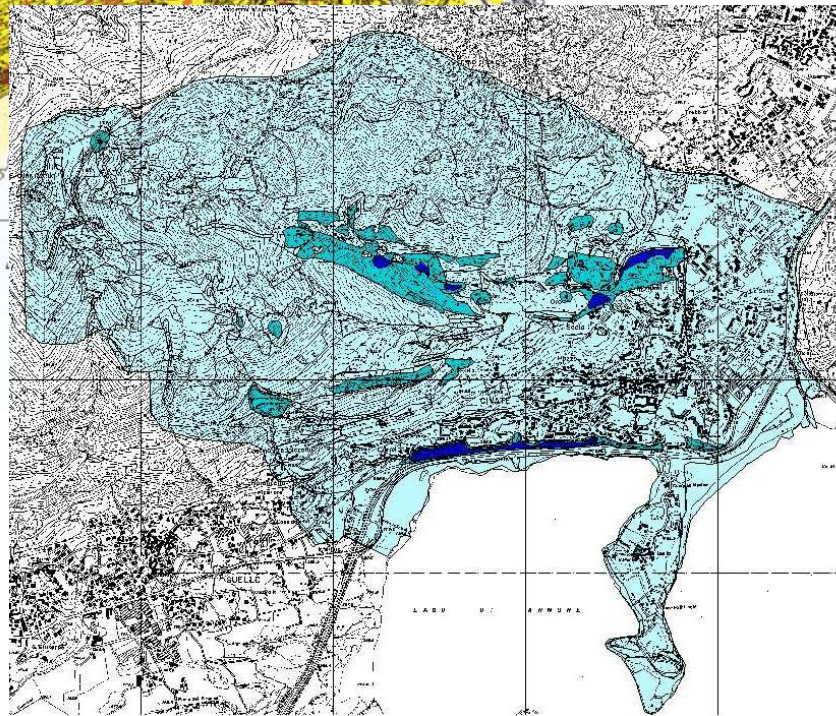




### Carta di Pericolosità Finale

Comune di Civate  
Provincia di Lecco

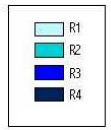
Scala 1:20000



### Carta del Rischio

Comune di Civate  
Provincia di Lecco

scala 1:20000



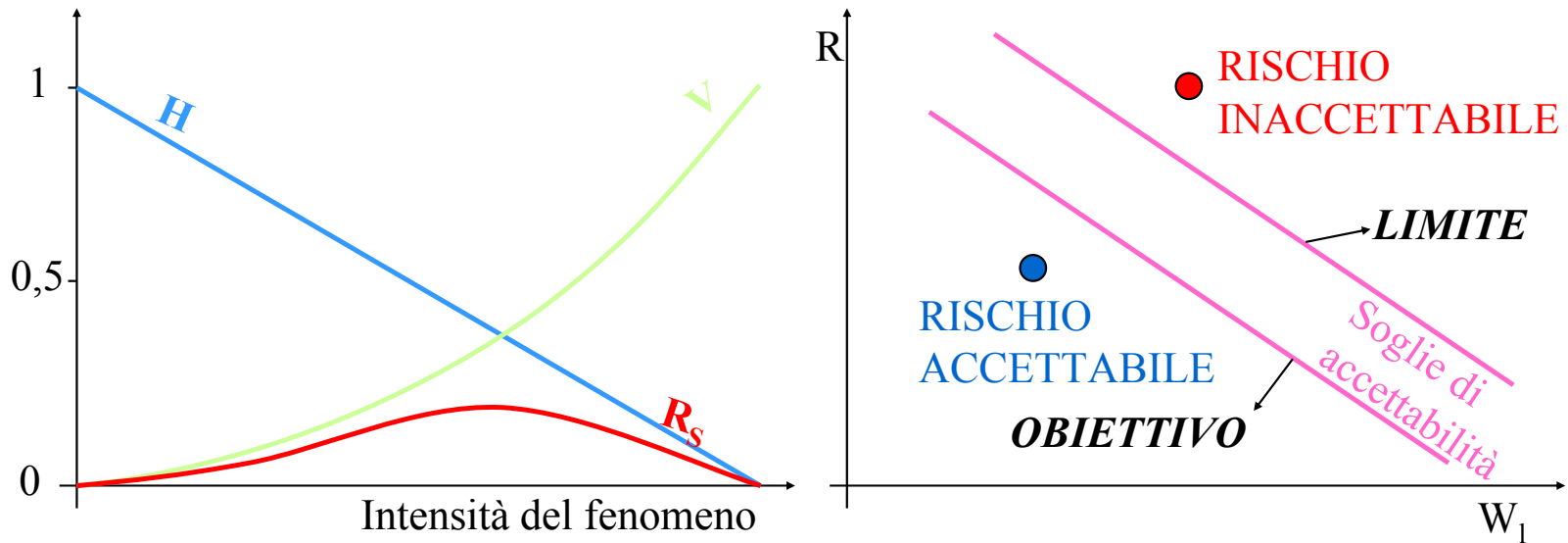
## Rischio totale (R)

Valore atteso delle perdite umane, dei feriti, dei danni alla proprietà e delle perturbazioni alle attività economiche dovuti ad un particolare fenomeno naturale; è espresso in termini di costo annuo oppure di numero o quantità di persone perse per anno (UNESCO, 1984); il rischio totale associato ad un particolare elemento a rischio e ad una data intensità  $I$  è il prodotto:

$$R = R(I,E) = H * V * W = H * W_1$$



$$R = R(I,E) = H * \underbrace{V * W}_{R_s} = H * W_1$$



# RIDUZIONE DEL RISCHIO



- Riduzione della pericolosità: si interviene sui fattori d'innescò del fenomeno (impossibile per terremoti e vulcani!) o sulla loro propagazione  $\Rightarrow$  sistemazioni attive e passive
- Riduzione della vulnerabilità: si diminuisce il grado di danno con interventi strutturali sugli elementi (edilizia antisismica) o sociali di educazione alla popolazione
- Riduzione dell'esposizione degli elementi a rischio: pianificazione del territorio e gestione dell'emergenza, con sistemi di allertamento e soccorso
- Riduzione del valore degli elementi a rischio: pianificazione

***N.B.:  $R = 0$  è impossibile!***

# IL RISCHIO GEOLOGICO

## Rischio residuo (Rr)

$$R_r = R - \Delta R$$

essendo  $\Delta R$  la variazione del livello di rischio a seguito delle opere di intervento adotta in relazione al fenomeno pericolo in esame.

# Tipologia degli interventi riduzione del rischio

## NON STRUTTURALI

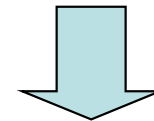
- Vincoli inibitori e cautelativi relativi all'uso del suolo ed alla costruzione di manufatti, imposti dalle normative
- Assicurazione contro i rischi da catastrofe



**PREVENZIONE**

## STRUTTURALI

- Opere destinate alla messa in sicurezza del territorio e delle popolazioni (sistemazioni idraulico-forestali o consolidamenti)



**MITIGAZIONE**

## ADOZIONE DI MISURE DI ATTENUAZIONE DEL RISCHIO:

- livello normativo (es. prescrizioni sulle tecniche costruttive)
- livello di pianificazione (es. PRG, misure di salvaguardia, ecc.)
- livello tecnico-scientifico (es. nuove tecnologie)
- livello informativo (educazione di operatori e popolazione)