

## COMUNE DI PISOGNE

# PROPOSTA DI RIPERIMETRAZIONE

AREA A RISCHIO

IDROGEOLOGICO MOLTO ELEVATO

COD. 146-LO-BS

## 01 RELAZIONE

Data: Marzo 2009

N° Progetto: 0803879

Scala: ---

AGGIORNAMENTI E REVISIONI		Data	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato
	c					
	b					
	a					



**I PROFESSIONISTI:**

Dott. Geol. Luca Maffeo Albertelli

**GRUPPO DI LAVORO:**

Dott.ssa Simona Bianchetti

Dott. Fabio Canova

# INDICE

<b>PREMESSA.....</b>	<b>3</b>
<b>1.0 FASE DI RACCOLTA DATI.....</b>	<b>3</b>
1.1 DATI ESISTENTI .....	3
1.1.1 EVENTO FRANA GASSO.....	3
1.1.2 STUDI E PROGETTI DELL'AREA IN FRANA .....	3
1.1.3 INTERPRETAZIONE GEOLOGICA DEI DATI OTTENUTI DALLA INTERFEROMETRIA DIFFERENZIALE SAR .....	3
1.1.4 ANALISI STORICA EVENTI IN DISSESTO.....	3
1.1.5 BACINO TROBIOLO.....	3
1.2 ATTIVITA' ANTROPICHE .....	3
1.3 RILIEVI E SOPRALLUOGHI .....	3
1.4 ASPETTI GEOLOGICI.....	3
1.5 ASPETTI GEOMORFOLOGICI.....	3
1.6 ASPETTI IDROGEOLOGICI .....	3
1.7 ASPETTI GEOMECCANICI .....	3
<b>2.0 FASE DI ANALISI.....</b>	<b>3</b>
2.1 PREMESSA.....	3
2.2 TORRENTE TROBIOLO.....	3
2.2.1 ANALISI PORTATA LIQUIDA.....	3
2.2.2 VERIFICA IDRAULICA DEFLUSSO LIQUIDO DI PIENA .....	3
2.2.3 DESCRIZIONE AREE IN FRANA LUNGO IL BACINO IDROGRAFICO .....	3
2.2.4 ANALISI TRASPORTO LIQUIDO-SOLIDO .....	3
2.3 FRANA DEL GASSO.....	3
<b>3.0 FASE DI SINTESI E PROPOSTE.....</b>	<b>3</b>
3.1 ANALISI SCENARI DI PERICOLOSITA' .....	3
3.1.1 INFLUENZA FATTORI ANTROPICI.....	83
3.1.2 SCENARIO ESONDAZIONE TORRENTE TROBIOLO .....	34
3.1.3 SCENARIO INNESCO FRANA DEL GASSO.....	3
3.1.4 PERICOLOSITA' SCENARIO TORRENTE TROBIOLO E FRANA GASSO .....	3
3.2 PROPOSTA DI RIPERIMETRAZIONE DELL'AREA 267 (cod. 146-LO-BS).....	3
3.3 VINCOLI E PRESCRIZIONI .....	3
3.4 APPROFONDIMENTI DI INDAGINE MONITORAGGIO .....	3
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>3</b>

## TAVOLE ALLEGATE

- 01 RELAZIONE (presente documento)
- 02 COROGRAFIA
- 03 CARTA GEOLOGICA
- 04 CARTA GEOMORFOLOGICA
- 05 CARTA DELLA DINAMICA
- 06 SEZIONI GEOLOGICHE
- 07 RILIEVI GEOMECCANICI
- 08 PERICOLOSITA' SCENARIO ESONDAZIONE TORRENTE TROBIOLO SU CONOIDE
- 09 PERICOLOSITA' SCENARIO ESONDAZIONE TORRENTE TROBIOLO CON TRASPORTO SOLIDO SU CONOIDE
- 10 PERICOLOSITA' SCENARIO FRANA DEL GASSO
- 11 PERICOLOSITA' SCENARIO FRANA DEL GASSO E CONOIDE TROBIOLO
- 12 CARTA DEL DISSESTO CON LEGENDA UNIFORMATA PAI E FATTIBILITA'

## PREMESSA

Il presente lavoro è stato condotto su incarico dell'Amministrazione Comunale di Pisogne con lo scopo di analizzare le condizioni di pericolosità morfologica delle aree di conoide alluvionale del Torrente Trobiolo e dell'area in frana in sinistra idrografica dello stesso (frana del Gasso), finalizzate alla verifica delle condizioni di possibile ripermetrazione dell'area a rischio su conoide.

Tali aree sono attualmente soggette ai vincoli introdotti dalla L.267/98 e sono comprese nel Piano Straordinario per le aree a rischio idrogeologico molto elevato con codice **146-LO-BS**.

Ai sensi dell'art. 54 delle N.d.A. del PAI, come modificato con deliberazione 4/2004 del Comitato Istituzionale dell'Autorità di bacino del Fiume Po, la perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico molto elevato può essere modificata con la procedura di cui all'art. 18 delle N.d.A. del PAI.

La presente proposta di ripermetrazione è stata condotta utilizzando, oltre alle già citate procedure, quelle di cui agli Allegati 2 Parte II e 3 dei criteri attuativi l.r. 12/05 per il Governo del Territorio a seguito delle opere di messa in sicurezza dell'area in frana.

La Regione Lombardia ha già espresso un proprio parere riguardo alla proposta di ripermetrazione presentata da Idro s.r.l. nel giugno 2005, con parere protocollo Z1.2006.00.10706 del 8 maggio 2006 con il quale richiedeva delle integrazioni in merito ad alcuni aspetti legati principalmente ad una maggiore analisi delle problematiche di trasporto liquido-solido del torrente Trobiolo da confrontare con le problematiche della frana del Gasso.

L'area interessata dal presente studio è localizzata nel Comune di Pisogne (BS) e nella cartografia tecnica regionale C.T.R. la zona è individuabile nel foglio D4, alla scala 1:50.000 ed in maggior dettaglio nella sezione D4A5 alla scala 1:10.000.

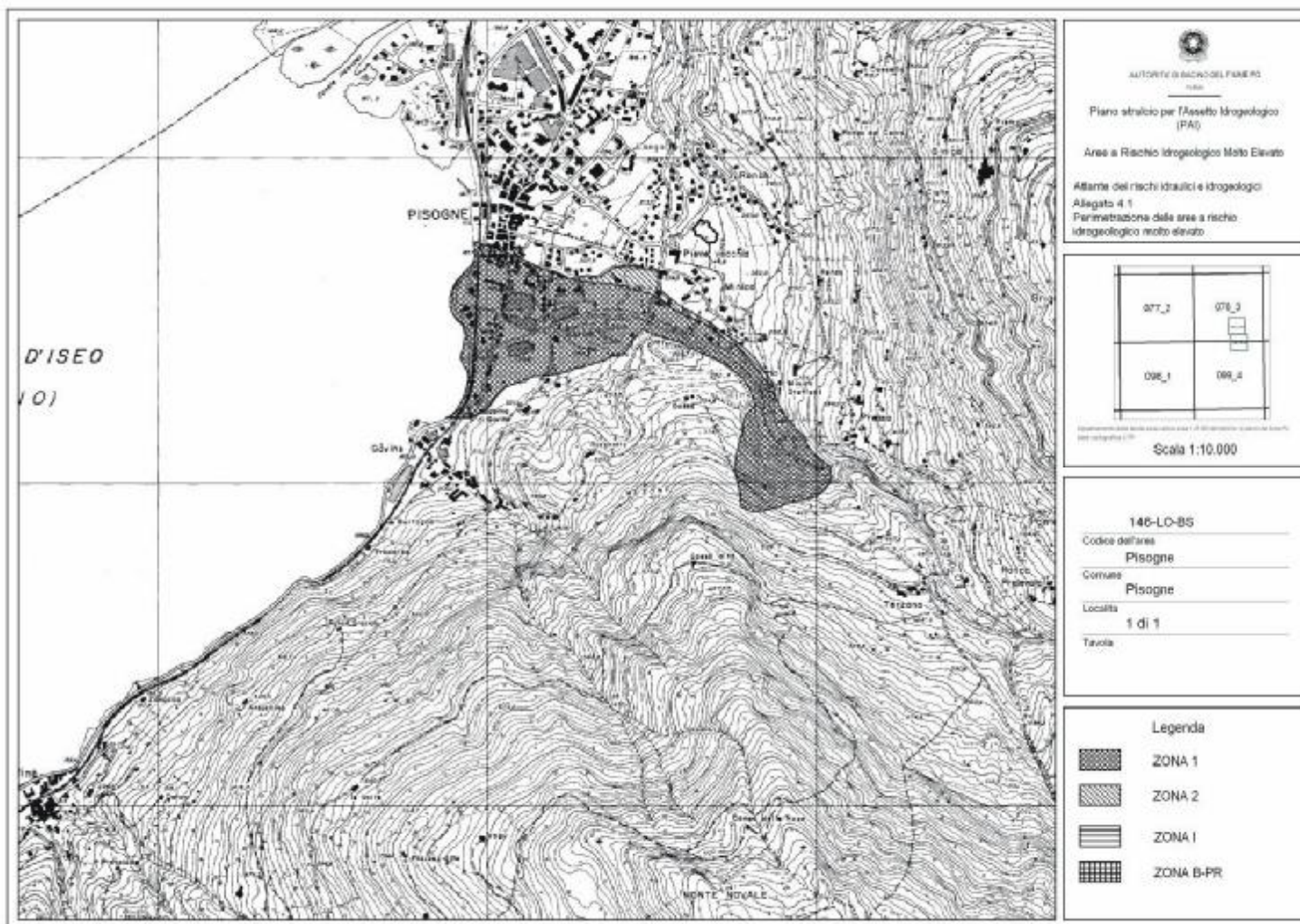
La conoide del torrente Trobiolo costituisce il deposito di fondovalle del torrente omonimo, laddove questo sbocca sul fondovalle, sulla riva sinistra del lago d'Iseo; su questa conoide è sorto e si è sviluppato parte dell'abitato di Pisogne.

Il 15 Novembre 2000 dal versante sinistro della valle del Trobiolo, più o meno all'altezza dell'apice della conoide, si è verificato un episodio franoso di grosse dimensioni (circa 400.000 m<sup>3</sup> di materiale franato), episodio che ha coinvolto detrito di versante, depositi di origine glaciale, gesso della Carniola di Bovegno e Calcare della Formazione del Calcare di Angolo.

La frana ha ostruito l'alveo del torrente Trobiolo andando a creare un laghetto retrostante l'accumulo di frana che, con il passare del tempo ed il migliorare delle condizioni meteorologiche, nei giorni successivi al 15 Novembre 2000, si è poi prosciugato.

In seguito a questo evento franoso e vista la situazione di pericolosità instauratasi la Regione Lombardia, tramite gli uffici preposti, ha perimetrato l'area di frana e parte della conoide del Trobiolo vincolando la perimetrazione ai sensi della L. 267/98.

In considerazione di quanto appena premesso la valutazione del grado di pericolosità sulla conoide del Trobiolo, valutata adottando come base topografica la cartografia di dettaglio del territorio comunale, viene proposta in sostituzione alla perimetrazione delle aree soggette a rischio idrogeologico riportate nella cartografia del piano di Assetto Idrogeologico (PAI).



**Figura 1 Perimetrazione vigente delle area a rischio idrogeologico molto elevato (146-LO-BS)**

Lo studio è suddiviso in tre parti distinte, la fase di RACCOLTA DATI nella quale è riportata una descrizione degli eventi dell'anno 2000 ed un'analisi storica degli eventi accaduti, sono poi riportate le attività antropiche interferenti con l'area in frana ed i dati di carattere geologico e geomeccanico.

Segue la fase di ANALISI che affronta le problematiche connesse all'intero bacino, distinte tra Torrente Trobiolo con l'analisi delle portate liquide e solide e frana del Gasso, con verifica delle condizioni di stabilità.

La fase conclusiva è quella di SINTESI E PROPOSTE dove si considerano vari scenari di pericolosità e si arriva a considerare una proposta di ripermetrazione della zona di conoide, vi è inoltre un richiamo normativo e le indicazioni per nuovi approfondimenti e per la creazione di un piano di monitoraggio dell'area.

*Il presente studio si compone delle seguenti tavole:*

**01** RELAZIONE (presente documento)

**02** COROGRAFIA

**03** CARTA GEOLOGICA

**04** CARTA GEOMORFOLOGICA

**05** CARTA DELLA DINAMICA

**06** SEZIONI GEOLOGICHE

**07** RILIEVI GEOMECCANICI

**08** PERICOLOSITA' SCENARIO ESONDAZIONE TORRENTE TROBIOLO SU CONOIDE

**09** PERICOLOSITA' SCENARIO ESONDAZIONE TORRENTE TROBIOLO CON TRASPORTO SOLIDO SU CONOIDE

**10** PERICOLOSITA' SCENARIO FRANA DEL GASSO

**11** PERICOLOSITA' SCENARIO FRANA DEL GASSO E CONOIDE TROBIOLO

**12** CARTA DEL DISSESTO CON LEGENDA UNIFORMATA PAI E FATTIBILITA'



## 1.0 FASE DI RACCOLTA DATI

### 1.1 DATI ESISTENTI

Nei paragrafi che seguono viene riportata una sintesi dei dati disponibili da studi precedenti riguardanti sia la Frana del Gasso che il Bacino del Torrente Trobiolo.

Dopo una descrizione dell'evento franoso del Novembre 2000, vengono ripresi alcuni studi eseguiti a seguito della frana per la sua messa in sicurezza ed un'analisi storica degli eventi in dissesto legati all'area, in particolare sono stati consultati e in parte riportati:

- “Studio del movimento franoso in località Gasso a Pisogne e proposta di messa in sicurezza” a cura di ARETHUSA srl, Responsabile Tecnico Dr. Geol. E. Dolci, del 2001;
- Progetto esecutivo “Messa in sicurezza del versante di frana e del torrente Trobiolo in comune di Pisogne, interventi di 1° fase” a cura di STUDIO MAIONE INGEGNERI ASSOCIATI, Progettista Incaricato Prof. Ing. Ugo Maione, del 2002;
- Studio “Interpretazione geologica dei dati ottenuti dall'Interferometria differenziale SAR con la tecnica dei PS (Permanent Scatterers technique) relativamente a fenomeni franosi e di subsidenza”, Provincia di Brescia – Settore Protezione Civile, del 2007;

Nell'ultimo paragrafo vengono invece riportati i dati di carattere morfologico ed idraulico del bacino del Torrente Trobiolo tratti da:

- Studio di Caratterizzazione Idrologica a supporto dell'Elaborato Tecnico relativo al Reticolo Idrico Minore e relative Fasce di rispetto (ai sensi D.G.R. n.7/7868 del 25-01-2002 e n.7/13950 del 01-08-2003), a firma del Dott. Ing. Pier Giuseppe Fenaroli;
- Sistema Informativo dei Bacini e dei Corsi d'acqua (SIBCA) della Regione Lombardia.
- Studio “Messa in sicurezza del versante di frana e del torrente Trobiolo in comune di Pisogne, interventi di 1° fase – Riperimetrazione delle aree a rischio (procedura 267/98)” a cura di IDRO srl, Progettisti Prof. Ing. Ugo Majone, Dott. Ing. Denis Cerlini, Dott. Ing. Franco Galli, Dott. Ing. Beatrice Majone del 2005;

#### 1.1.1 EVENTO FRANA GASSO

Nei mesi di Ottobre e Novembre 2000 tutto il territorio della Lombardia è stato interessato da eventi meteorici particolarmente gravosi. I pluviometri in provincia di Brescia, durante il mese di Novembre, hanno registrato 20 giorni di precipitazioni con valori complessivi elevati, tra i 400 mm e i 500 mm. In particolare tra il 13 e il 18 novembre nella stazione di Bessimo, subito a monte del Lago di Iseo, sono caduti 155.2 mm. Nell'area in esame la precipitazione dei mesi di ottobre e novembre 2000 è stata la più alta registrata dal 1923 e l'aumento delle precipitazioni rispetto alla media è risultato essere stato pari al 300%.

La severità degli eventi meteorici ha causato centinaia di frane soprattutto in provincia di Sondrio e di Brescia, tra cui quella in oggetto.

In data 15 novembre 2000, verso le ore 18.30 si è verificato un fenomeno franoso nella porzione inferiore della Val Trobiolo, in sinistra orografica, nell'area adiacente alla cava di gesso LAGES.

Il versante interessato dalla frana è costituito nella parte inferiore da evaporiti e subordinate peliti di età triassica inferiore (Carniola di Bovegno), mentre nella parte superiore affiorano rocce carbonatiche molto tettonizzate, riferibili al calcare di Angolo. Sul versante sono presenti coltri detritiche colonizzate da vegetazione di medio-alto fusto che ricoprono parzialmente il substrato roccioso. Una parte del versante interessato dall'evento è in concessione alla società LAGES, che ha in atto attività estrattive nel corpo gessoso.

La nicchia della frana ha un fronte stimato in circa 200 metri, dal coronamento al fondovalle il dislivello è di circa 150-170 metri. Il volume del materiale secondo il calcolo effettuato dallo studio ARETHUSA con la formula dei prismoidi, si attesta a 430.000 m<sup>3</sup>. La frana risulta molto complessa e di notevoli dimensioni. Il meccanismo di rottura non è assimilabile ai più semplici modelli di eventi franosi, ma risulta una combinazione di scorrimenti rotazionali e traslazionali e del crollo di alcune porzioni di versante e detriti, costituiti in prevalenza da depositi morenici, che si sono mobilitati a seguito del cedimento del pendio roccioso.

La superficie di scivolamento ha nell'insieme una forma pressoché concava; al centro assume una forma pianeggiante con immersione 27° (la stessa del pendio) e inclinazione vicino alla nicchia di circa 35/40° che si mantiene costante fino alla zona di accumulo dove si ha un pianoro dovuto alla sedimentazione dei limi. In questa striscia centrale il versante è coperto da detriti di frana non stabilizzati. Sono inoltre ben evidenti le superfici di scivolamento laterali, soprattutto sulla sponda sinistra (guardando dall'alto verso valle) dove è visibile uno specchio di faglia, completamente liscio di forma convessa con immersione 43° e inclinazione 75° nella parte inferiore e 45° sulla faccia superiore. Questa porzione di pendio è formata da anidriti e gessi della Carniola di Bovegno a stratificazione spesso evidente, molto tettonizzati e piegati come conferma la faglia stessa e come si può facilmente osservare dalla strada di arroccamento che sale dalla cava. Tutto l'orlo di frana della sponda sinistra è tuttora soggetto a fenomeni di erosione ed arretramento. La zona è composta da una coalescenza di materiale morenico, detritico in matrice limoso-sabbioso-argilloso e di blocchi di calcare e gesso con comportamento sciolto, talvolta con coperture eluvio-colluviali. Mentre la zona sottostante è composta da ammasso roccioso di gesso ed evaporiti in precario equilibrio statico. Fenomeni di instabilità locale si sono riscontrati nella stessa formazione rocciosa anche in prossimità dei gradoni di cava non coinvolti nella frana dopo il 15 novembre 2000, manifestatisi con piccoli crolli e con fratture; lungo le quali si riscontrano venute d'acqua di entità limitata ma che evidenziano la presenza di filtrazione nel pendio. Questi fenomeni potrebbero essere dovuti al detensionamento dell'ammasso roccioso a seguito della frana o solamente causati dal processo di coltivazione del gesso. Tuttavia è chiaramente osservabile un progressivo degrado delle qualità meccaniche e chimiche dell'ammasso proseguendo da ovest verso est. Si passa, infatti, da anidriti e gesso di qualità tale da permetterne lo sfruttamento estrattivo ad una roccia di purezza inferiore per la presenza di lenti conglomeratiche e per l'eccessiva fratturazione. La sponda destra è composta da depositi detritici a composizione prevalentemente sabbiosa e ghiaiosa con eluvi e colluvi abbondanti messi a nudo nel corpo di frana; questa zona è probabilmente instabile trattandosi di materiale prevalentemente

detritico poco cementato su substrato roccioso, costituito presumibilmente da affioramenti calcarei e calcareo-marnosi della Formazione di Prezzo (Anisico) ben stratificato e fortemente tettonizzato in cubi di V.R.U. dell'ordine del metro. Non va dimenticato che su tutto lo sviluppo della nicchia di distacco e sull'orlo di frana di entrambe le sponde vi sono diedri ed accumuli di blocchi rocciosi instabili che possono dare origine a frane di crollo di limitata estensione.

Il detrito di frana ha granulometria variabile da prevalentemente fine e limosa a media con sabbia, ghiaia e ciottoli prevalenti, fino alla presenza di massi e blocchi di alcuni metri cubi immersi in matrice ghiaioso-sabbioso-limosa più o meno argillosa. In particolare, l'accumulo è costituito nelle parti sommitali da detrito a pezzatura ridotta e con una matrice prevalentemente fine, mentre nella zona a valle prevalgono grossi blocchi di rocce evaporitiche.

L'accumulo di frana aveva occupato l'alveo del torrente Trobiolo alla base del versante creando un dislivello di circa 50 m tra il punto in cui il Trobiolo si infiltrava in profondità ed il punto in cui era nuovamente visibile l'alveo originario; la massa detritica era poi risalita sul versante opposto fino ad una quota massima pari a circa 326 m s.l.m. Parte del materiale franato era confluito lungo l'alveo canalizzato arrestandosi poco a monte delle prime propaggini dell'abitato di Pisogne.

L'ostruzione del torrente Trobiolo aveva causato lo sviluppo di un invaso, avente un volume d'acqua stimato in 8000-10.000 m<sup>3</sup> (in data 16.11). La circolazione sotterranea nell'area in oggetto, interessata da evidenti fenomeni di carsismo dei depositi evaporitici, ha conseguentemente subito modifiche. I tecnici comunali avevano segnalato un aumento di portata relativo ad una sorgente ubicata alcune centinaia di metri a valle della frana, e l'improvvisa comparsa di consistenti (1 m<sup>3</sup>/sec) venute d'acqua nella galleria stradale ANAS allora in costruzione, che attraversa l'alveo del Trobiolo a valle della frana.

Dato il rischio di tracimazione o sfondamento dello sbarramento, con possibile rimobilizzazione del materiale accumulato, l'amministrazione comunale aveva provveduto all'evacuazione di 500 persone, residenti nelle aree immediatamente a valle della frana. In seguito al sopralluogo effettuato il giorno successivo (in data 17-11) che aveva evidenziato un innalzamento quantificabile in 4 m del livello delle acque, l'amministrazione comunale emise un'ordinanza di blocco del transito sia sulla strada statale che sulla ferrovia Brescia-Iseo-Edolo.

La possibilità di esondazione e cedimento del deposito detritico che occludeva l'alveo si era rivelata infondata, in breve tempo l'acqua del torrente ha trovato via di fuga in profondità, infiltrandosi sotto lo sbarramento e disperdendosi presumibilmente nel conoide di deiezione sul quale sorge l'abitato di Pisogne e nelle fessure carsiche tipiche delle formazioni gessose.

Nei giorni successivi la frana aveva presentato un graduale ma continuo sviluppo legato a fenomeni di distacco progressivo nel settore di nicchia. Il fronte della frana era arretrato di parecchi metri nei giorni compresi tra il 15 ed il 20 novembre, tuttavia l'intensa fratturazione dei depositi costituenti la zona di nicchia ha favorito un distacco graduale del materiale, riducendo il rischio di distacchi più estesi e portando allo sviluppo di un conoide di detrito nella zona di nicchia.



## 1.1.2 STUDI E PROGETTI DELL'AREA IN FRANA

Gli studi esistenti sull'area in frana sono stati effettuati da ARETHUSA srl nell'anno 2001 e successivamente dallo STUDIO MAIONEINGEGNERI ASSOCIATI nel 2002 **“Studio del movimento franoso in località Gasso a Pisogne e proposta di messa in sicurezza” a cura di ARETHUSA srl**, Responsabile Tecnico Dr. Geol. E. Dolci.

Lo studio ARETHUSA ha svolto innanzitutto un calcolo dei volumi secondo la formula dei prismoidi, effettuata sulla base di sezioni con distanza di 20 m. Come già accennato, la frana ha interessato un volume di circa 430.000 m<sup>3</sup>. Successivamente lo studio ha condotto un'analisi di stabilità a posteriori, per stabilire le cause scatenanti del fenomeno e verificare la presenza di sezioni instabili che hanno favorito il crollo. L'analisi è stata effettuata sia con condizioni di pendio secco sia con l'ipotesi di presenza d'acqua. Quest'ultima condizione è stata ritenuta plausibile data la presenza, nei fronti di cava, di venute d'acqua osservate in corrispondenza degli intensi eventi meteorici verificatisi nel novembre 2000. La stratigrafia del pendio interessato dal dissesto è stata modellizzata idealmente in un substrato di rocce evaporitiche (anidriti e gesso), al di sopra del quale, a partire dalla quota di circa 400 m s.l.m., è adagiata una coltre morenica, al fine di semplificare l'analisi. Per definire le caratteristiche generali dell'ammasso roccioso, lo studio ARETHUSA ha utilizzato in parte i dati del rilievo geomeccanico eseguito nei giorni 19 e 30 giugno 2000, prima dell'evento franoso. Oltre ai dati forniti dal predetto rilievo (famiglie di discontinuità K1, K2, K3 e K4) è stato necessario aggiungere giaciture venute alla luce a seguito del crollo di parte del pendio. In primis sono state introdotte le caratteristiche dello specchio di faglia, espresse tramite due set di discontinuità, K8 e K9, al fine di rappresentare nel modello l'effettiva superficie convessa. In più sono state rilevate altre tre giaciture di discontinuità nella zona della nicchia di distacco e rappresentate dai sets K5, K6, K7 (stratificazione). A causa della pericolosità della scarpata principale i parametri che si riferiscono alle tre ultime famiglie di discontinuità sono stati stimati sulla base dei rilievi effettuati sul fronte di cava.

Sulla base dei dati ricavati dal rilievo geomeccanico eseguito lo studio ARETHUSA ha classificato l'ammasso roccioso sia sulla base di quanto proposto da Bieniawski (RMR – Rock Mass Rating), sia da Barton (Q-System); utilizzando, un criterio prudenziale. Si riassumono di seguito i parametri meccanici e geotecnici utilizzati per le verifiche di stabilità:

### Morena:

RMR base= 10

Q= 0.02

$\sigma_c$ = 80 (Kg/cm<sup>2</sup>), res. a compr. monoassiale

$\gamma_d$ = 2100 (Kg/cm<sup>3</sup>)

$\gamma_{sat}$ = 2300 (Kg/cm<sup>3</sup>)

E= 10000 (Kg/cm<sup>2</sup>), modulo elastico

Costante  $m_i$ = 20

### Gesso:

RMR base= 25

Q= 0.5

$\sigma_c = 200$  (Kg/cm<sup>2</sup>), res. a compr. monoassiale

$\gamma_d = 2300$  (Kg/cm<sup>3</sup>)

$\gamma_{sat} = 2500$  (Kg/cm<sup>3</sup>)

$E = 30000$  (Kg/cm<sup>2</sup>), modulo elastico

Costante  $m_i = 15$

La verifica di stabilità effettuata dallo studio ARETHUSA è stata eseguita tramite l'utilizzo di un apposito software (B-Rock della Programgeo) che consente sia la verifica di stabilità del pendio nella sua globalità allo scivolamento traslazionale-rotazionale (stabilità globale), sia quella degli ammassi rocciosi isolati da superfici di discontinuità: scivolamento planare e scivolamento a cunei.

Il metodo di calcolo utilizzato per la verifica allo scivolamento traslazionale-rotazionale si basa sulla teoria dell'equilibrio plastico limite, tramite la quale viene calcolato il fattore di sicurezza alla traslazione e/o rotazione del volume di roccia compreso fra la superficie topografica ed una superficie di taglio potenziale imposta o reale. La procedura di calcolo prende in considerazione tutte le forze e/o momenti agenti lungo il piano di taglio, fornendo una valutazione della stabilità globale attraverso equazioni d'equilibrio fornite dalla statica.

I vari metodi di calcolo prevedono la divisione della massa di cui si vuole verificare la stabilità alla rotazione e/o traslazione in un certo numero di conci al fine di poter considerare rettilinea la base di ciascuno di essi. In particolare il metodo di calcolo utilizzato è stato quello proposto da Janbu semplificato in cui si pone la condizione che le forze verticali agenti sulle superfici di separazione dei conci siano trascurabili, supponendo di conseguenza che essi interagiscano solo attraverso forze orientate lungo l'orizzontale. La scelta è ricaduta su tale metodo in quanto è quello che meglio si presta alla verifica dell'influenza delle superfici di discontinuità geomeccaniche sulla stabilità globale del pendio: il programma di calcolo fornisce la possibilità di far intervenire nel calcolo di stabilità globale le caratteristiche meccaniche dei singoli giunti. Inoltre il criterio di Janbu è l'unico idoneo ad operare su superfici di scivolamento di forma allungata e non circolare, come nella fattispecie dove l'andamento della superficie critica è noto essendosi già verificato il crollo.

La verifica di stabilità allo scivolamento planare di ammassi rocciosi isolati da singole superfici di discontinuità è stato effettuato con il metodo di Matheson. Tale metodo sostiene che lo scivolamento avviene se si verificano le seguenti condizioni:

1. La differenza d'immersione della discontinuità e del versante deve essere compresa tra i +/- 20°;
2. L'inclinazione del versante deve essere > dell'inclinazione della discontinuità;
3. L'inclinazione della discontinuità deve essere > dell'angolo d'attrito lungo la superficie stessa.

Per ciò che concerne la stabilità dei singoli cunei, formati dall'intersezione dei vari set di litoclasti, evidenziati nell'ammasso roccioso, la loro analisi di stabilità è stata anch'essa condotta tramite il metodo dell'equilibrio limite, assumendo che la resistenza allo scorrimento sia diretta parallelamente

alla direzione del movimento. Ciò ha permesso di eseguire la verifica della loro stabilità espressa anch'essa attraverso un coefficiente di sicurezza.

Inoltre la stabilità dei singoli cunei è stata verificata anche utilizzando il test di Markland il quale fornisce un'indicazione qualitativa della stabilità del cuneo in funzione del suo orientamento nello spazio e della stima della resistenza al taglio mobilitabile lungo i piani di possibile scorrimento. Quest'ultima grandezza viene quantificata attraverso l'angolo d'attrito di picco medio delle discontinuità meccaniche. Le condizioni perché avvenga lo scivolamento del cuneo sono le stesse richieste per lo scivolamento planare, con la differenza che invece di considerare la giacitura di una singola discontinuità si considera immersione e inclinazione della linea d'intersezione delle superfici formanti il cuneo.

L'applicazione delle relazioni di Hoek e Bray ha consentito l'utilizzazione dei metodi dell'equilibrio limite normalmente impiegati nelle verifiche di stabilità di pendii in terra anche al caso di pendii in roccia. In queste condizioni geologiche, infatti, la correlazione fra la resistenza al taglio del materiale e la pressione di confinamento non è di tipo lineare e di conseguenza per la descrizione della resistenza al taglio del materiale costituente il pendio non può essere utilizzato il criterio di rottura di Coulomb. Hoek e Bray hanno descritto una procedura che consente l'applicazione, per la verifica di pendii in roccia, delle formule classiche di equilibrio limite usate per i pendii in terra.

Risultati:

L'analisi effettuata dallo studio ha messo in evidenza, relativamente allo scivolamento globale, fattori di sicurezza inadeguati soltanto per una delle sezioni analizzate, sia in condizioni di pendio asciutto che saturo. Lo studio conclude pertanto che questa sezione in precario equilibrio statico abbia innescato il processo franoso che ha in seguito coinvolto le sezioni adiacenti secondo un processo di rottura progressiva del pendio, a seguito delle forti precipitazioni del novembre 2000. Inoltre la faglia presente all'interno dell'ammasso, testimoniata dallo specchio di faglia ora a cielo aperto, ha contribuito in modo determinante al crollo visto che la superficie di rottura corrisponde per gran parte alla faglia stessa.

La verifica della stabilità allo scivolamento dei cunei di ammassi rocciosi isolati da superfici di discontinuità intersecantesi ha invece fornito valori di  $F_s$  sempre maggiori ad 1.3.

Successivamente lo studio ARETHUSA ha verificato, con gli stessi metodi, la stabilità dei due fianchi della frana, considerando superfici di scivolamento di forma allungata, così da analizzare il versante nella sua globalità. L'analisi del fianco sinistro è stata più dettagliata date le più approfondite conoscenze del settore (zona di cava) e la presenza di potenziali bersagli esposti al rischio di frana (abitazioni, cava). Per il fianco destro, dove la presenza della coltre detritica limita le conoscenze geologiche e geotecniche dell'ammasso roccioso, lo studio ha ipotizzato, a favore di sicurezza, la presenza della medesima lente di gesso con gli stessi parametri precedentemente utilizzati.

Il calcolo è stato eseguito imponendo 300 possibili superfici di scivolamento e suddividendo la massa movimentata in 20 conci. Le analisi hanno fornito valori di  $F_s$  sempre inferiori ad 1.3 per il fianco destro, mentre sul fianco sinistro valori inadeguati limitatamente ad alcune sezioni e a condizioni di pendio saturo.

Alla luce dei risultati ottenuti la ARETHUSA ha individuato una proposta di intervento per il recupero e la messa in sicurezza dell'area in frana. Sono innanzitutto previsti disgaggi controllati, scoronamento e riprofilatura del ciglio di frana. Viene inoltre proposta la realizzazione di un vallo di controllo come difesa passiva, di opere di ingegneria naturalistica e l'inerbimento nella zona di scorrimento. Per quanto riguarda il ripristino del torrente Trobiolo veniva proposta la realizzazione di un alveo con relativo sfioro, la gradonatura del piede della frana, (caratterizzato da forti pendenze e presenza di grossi massi) e la messa in opera di briglie per il deflusso idraulicamente controllato delle acque.

Per quanto riguarda il dosso instabile sul fianco sinistro è stata proposta la riprofilatura e l'arretramento del versante con asportazione di materiale a partire dall'alto, dati i bassi valori di  $F_s$  evidenziati dalle analisi e il rischio per le abitazioni sottostanti. L'intervento suggerito prevede la realizzazione di gradoni di altezza 10 m, con pedata di larghezza 6 m leggermente inclinata verso monte, e scarpate di  $60^\circ$ . Il profilo finale del fronte avrebbe così una pendenza di  $40^\circ$ , quest'ipotesi di intervento è valida fino alla quota di 354 m s.l.m., mentre al di sopra e fino alla quota di 431.5 m i gradoni assumeranno una geometria differente e comunque a favore di sicurezza, infatti, le pedate avranno larghezza minima di 7 m, altezza complessiva di 8 m ed una pendenza media del pendio di  $29^\circ$ . Questa discontinuità nella modellazione del versante è resa necessaria dalla morfologia stessa della zona che implica un addolcimento del pendio, il quale si assesta ad una pendenza minore a partire dalla quota approssimativa di 350 m s.l.m. In aggiunta a queste considerazioni si tenga presente che a partire da quota 380 m è rilevata la presenza di una copertura morenica difficilmente stimabile. Questo strato superficiale è stato osservato in sito e si estende per un'area maggiore di quanto riportato dalle carte geologiche della zona, perciò a seguito dell'incertezza di questi dati si è optato per una configurazione della sezione finale con pendenze più lievi proprio nella parte di pendio interessata da questo tipo di copertura. Ed ancora viene sottolineato il fatto che l'effettiva consistenza del detrito superficiale sarà appurata con esattezza in corso d'opera durante i lavori di escavazione e riprofilatura.

L'intervento ipotizzato risulta plausibile anche dal punto di vista operativo, infatti, è possibile raggiungere la quota massima dei gradoni più alti tramite i sentieri individuati nella tavola e le strade di arroccamento già presenti in cava. L'intervento interessa una superficie di circa  $25991 \text{ m}^2$  ed un volume complessivo asportato nell'ordine di  $180000 \div 200000 \text{ m}^3$ .

L'analisi di stabilità sul pendio a fine lavori è stato condotta ipotizzando la situazione maggiormente penalizzante in presenza di acqua nell'ammasso, sia per l'intero versante che localmente per il singolo gradone che risulta essere quello potenzialmente più pericoloso, data la sua pendenza ( $60^\circ$ ) i valori di  $F_s$  ottenuti sono maggiori di 2.

Non sono invece stati proposti interventi rilevanti per il fianco destro, che tuttavia pone minori problemi di sicurezza pubblica e pertanto l'analisi specifica è stata demandata ad una prossima fase di studio; si auspica di ricomprendere nella fase nella stabilizzazione del fianco destro anche l'accumulo di smarino delle miniere di siderite collocato poco più a monte e di accertata instabilità.

Progetto esecutivo “Messa in sicurezza del versante di frana e del torrente Trobiolo in comune di Pisogne, interventi di 1° fase” a cura di STUDIO MAIONE INGEGNERI ASSOCIATI, Progettista Incaricato Prof. Ing. Ugo Maione.

Lo STUDIO MAIONE ha svolto un’analisi articolata in più fasi di lavoro, concernenti i diversi aspetti dell’area in frana e del Bacino del torrente Trobiolo.

### 1. Relazione idrogeologica ed idraulica:

La relazione in questione illustra il procedimento per il calcolo degli apporti meteorici dell’area in esame e per la stima della portata al colmo di piena del Torrente Trobiolo. Lo scopo è stato definire la portata di progetto per la realizzazione delle future opere di sistemazione dell’alveo.

Tale portata è stata assunta corrispondente ad un tempo di ritorno pari a 200 anni, così come previsto dalle norme dell’Autorità di Bacino del Po.

Nell’analizzare le caratteristiche morfometriche del bacino sono state individuate due sezioni: quella terminale, indicata come sezione 1 (cfr Tab.1), e la sezione 2, in corrispondenza dell’accumulo di frana (cfr Tab.2).

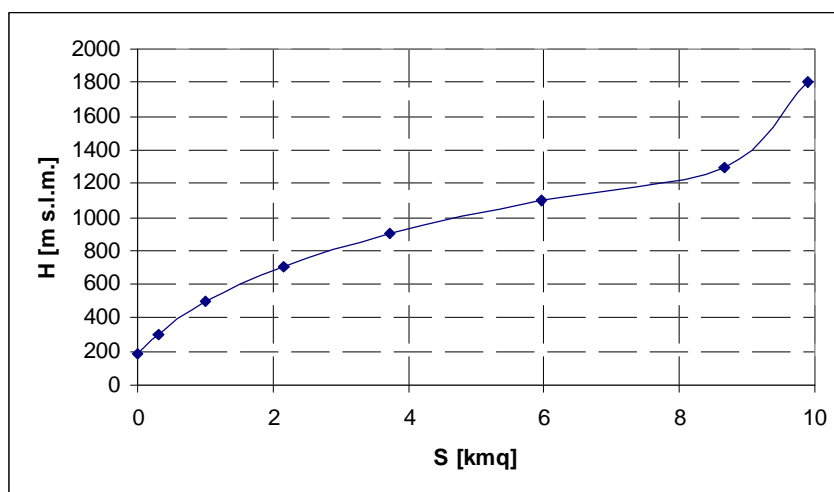


Figura 2 Curva ipsografica del bacino complessivo (sez. 1)

**Tabella 1 Caratteristiche morfometriche del bacino del Trobiolo chiuso alla confluenza in Lago- sez. 1**

Superficie (km <sup>2</sup> )	9.9
Lunghezza asta (km)	5.9
H <sub>media</sub> (m s.l.m)	978
H <sub>o</sub> (m s.l.m)	190
H <sub>max</sub> (m s.l.m).	1800



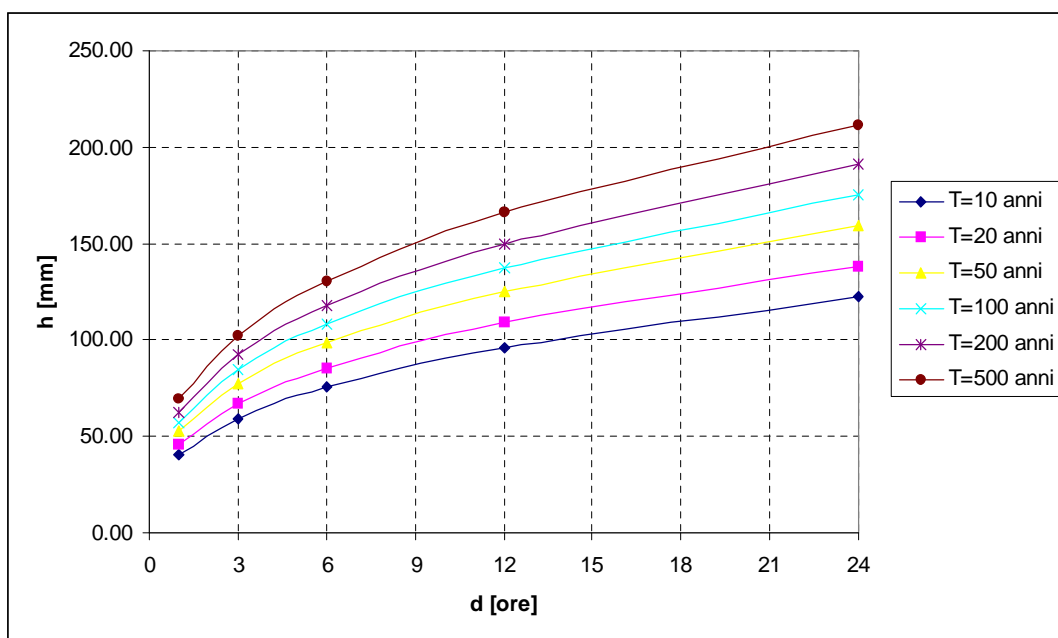
**Tabella 2 Caratteristiche morfometriche del bacino del Trobiolo chiuso a monte dell'accumulo di frana- sez. 2**

Superficie (km <sup>2</sup> )	8.9
Lunghezza asta (km)	4.6
H <sub>media</sub> (m s.l.m.)	1029
H <sub>o</sub> (m s.l.m.)	300
H <sub>max</sub> (m s.l.m.)	1800

Successivamente, utilizzando i dati relativi alle stazioni pluviografiche di Memmo e Breno, disponibili negli annali idrologici, lo studio ha ottenuto la curva di possibilità pluviometrica rappresentativa per l'intero bacino del Trobiolo.

**Tabella 3 Coefficienti delle L.S.P.P. per i diversi tempi di ritorno significativi**

T (anni)	a (mm/h)	n (-)
10	40.23	0.35
20	45.58	0.35
50	52.46	0.35
100	57.65	0.35
200	62.89	0.35
500	69.60	0.35



**Figura 3 Linee segnatrici di possibilità pluviometrica del bacino del Trobiolo**

Una volta elaborati i dati di possibilità pluviometrica, sono state calcolate le portate associate, tramite il modello cinematico. Esso prende origine dallo schema di calcolo più semplice basato sulla formula razionale:

$$q(T) = \Phi A i_c(T)$$

Dove  $q(T)$ ,  $A$  e  $i_c(T)$  indicano rispettivamente la portata al colmo di piena di tempo di ritorno  $T$ , la superficie del bacino e l'intensità della precipitazione relativa al centro di scroscio di durata pari al tempo  $t_c$  critico del bacino;  $\Phi = \Phi_1 \Phi_2 \Phi_3$  è un coefficiente minore di 1 che tiene conto delle perdite per infiltrazione ( $\Phi_1$ ), del ragguaglio delle piogge all'area ( $\Phi_2$ ) e dell'effetto di laminazione del bacino ( $\Phi_3$ ). Nell'elaborazione effettuata è stato assunto per il coefficiente di afflusso  $\Phi$  un valore medio di 0.5, rappresentativo del grado di permeabilità ed uso del suolo del territorio.

Per le successive valutazioni è stata presa in considerazione la curva di possibilità pluviometrica corrispondente alla media dei parametri delle curve ricavate nelle singole stazioni considerate senza operare nessun ragguaglio all'area tenuto conto delle ridotte dimensioni del bacino in esame e del fatto che tale fenomeno è già contemplato all'interno del coefficiente  $\Phi$ . Essa, in corrispondenza di un tempo di ritorno di 200 anni, assume la forma:

$$h(T) = 62.89 t^{0.35}$$

Utilizzando il modello cinematico per la stima dei valori al colmo della portata di piena, l'evento critico di un bacino idrografico coincide con un evento piovoso di durata pari al tempo di corrvazione del bacino stesso ed intensità di pioggia pari a:

$$i = \frac{h}{t_c}$$

Il tempo di corrvazione, funzione delle caratteristiche morfologiche dell'area, è stato valutato attraverso la nota formula di Giandotti, la cui espressione è:

$$t_c = \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot \sqrt{H}}$$

dove  $A$  è la superficie del bacino espressa in  $\text{km}^2$ ,  $L$  la lunghezza in km del percorso idraulicamente più lungo del bacino e  $H$  (m s.l.m.) è la sua altezza media rispetto alla sezione di chiusura.

In corrispondenza del valore di  $t_c$  individuato, pari a circa 1 ora, si sono ottenuti i seguenti valori di portata al colmo di piena per i tempi di ritorno considerati.

**Tabella 4 Portata al colmo alle sezioni di interesse per i tempi di ritorno considerati**

T [anni]	Q <sub>C sez.1</sub> [mc/s]	Q <sub>C sez. 2</sub> [mc/s]
10	68.47	65.28
20	77.58	73.96
50	89.29	85.13
100	98.12	93.55
200	107.04	102.05
500	118.46	112.94

Il risultato finale della relazione idrologica ed idraulica è stato calcolare le altezze di deflusso determinate dalla piena duecentennale per dimensionare le opere di regimazione.

È stata quindi applicata la nota formula di Chezy:

$$Q = K_s A \sqrt{Ri}$$

dove il coefficiente di Gauckler-Strickler  $K_s$  è stato assunto pari a  $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  in quanto trattasi di alveo rivestito in pietrame .

Per la sezione dell'alveo nel tratto a valle dell'accumulo di frana, la cui larghezza è pari a 6 m, è stato trovato un valore del tirante idrico corrispondente alla portata duecentennale pari a circa 1,5 m.

La sezione dell'alveo è risultata quindi sufficiente a contenere la portata di progetto con un franco di sicurezza superiore al metro.

## **2. Relazione geologico-geotecnica:**

Oggetto della relazione è stata la caratterizzazione geologica e geotecnica dei soli materiali presenti nella parte bassa del versante, costituenti il corpo di accumulo della frana con riferimento alle modalità di riprofilatura previste in sede di progetto. L'indagine è consistita nell'esecuzione di due sondaggi geognostici denominati S1 e S2, spinti rispettivamente alla profondità di 37.50 m e 20.00 m da p.c..

Il sondaggio n°1 è stato eseguito nell'area avente massimo spessore di copertura, il terreno in posto è stato identificato a circa -25m dal p.c. Di seguito viene riportata la stratigrafia semplificata (l'unica attualmente disponibile):

da p.c. a -4m	breccia (calcarea)
da -4m a -8m	sabbia limosa
da -8m a -23m	gesso (tenero)
da -23m a -25m	breccia (calcarea, talora di gesso)
da -25m	materiale sabbio limoso in posto

Analoghe considerazioni hanno portato a schematizzare la stratigrafia relativa alla perforazione n°2, come di seguito:

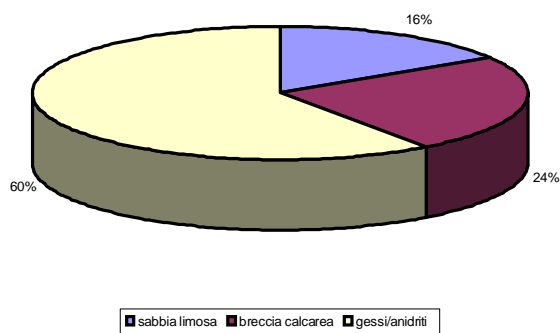
da p.c. a -1m	breccia (di anidrite)
da -1m a -5m	anidrite (mediamente dura)
da -5m a -5.5m	breccia (calcareea)
da -5.5m	materiale sabbio limoso in posto

In entrambi i casi non è stata rilevata traccia di circolazione idrica a livello tale da interessare il materiale in frana (falda a circa -24 m per il sondaggio 1 e a circa -9 m per il sondaggio 2).

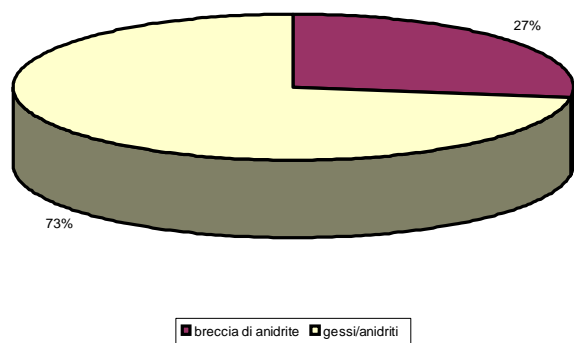
Come ben evidenziato dai valori di RQD, il materiale costituente l'accumulo di frana ha rivelato caratteristiche di coerenza e di granulometria proprie più di un terreno che di una roccia.

Allo scopo di classificare la presenza percentuale di materiale, suddiviso sulla base dei litotipi sopra utilizzati (più su base granulometrica che mineralogica), vengono nel seguito esposti (figg. 1 e 2) i grafici riassuntivi realizzati dallo studio Maione.

**Figura 4 Sondaggio 1: distribuzione dei materiali componenti il corpo di frana**



**Figura 5 Sondaggio 2: distribuzione dei materiali componenti il corpo di frana**



Si ritiene utile sottolineare come in fase di sondaggio i redattori della stratigrafia abbiano adottato una differente classificazione dei materiali di tipo gessoso: in particolare, per ciò che riguarda il litotipo rilevato nel sondaggio 1, si è parlato di “gesso biancastro con sottili venature nocciola, tenero, friabile, sfaldabile, fratturato e sbrecciato” caratterizzato sempre dall'assenza di valori di RQD diversi da zero. Viceversa, il materiale rilevato nel corso del sondaggio 2 è invece stato definito come “anidrite grigio-biancastra mediamente dura, molto fratturata e degradata in breccia in matrice sabbioso limosa

nocciola biancastra”, e in questo caso si è registrato un andamento di RQD che per 2.5 m su 4 è pari al 10%.

Nel corso della perforazione si è proceduto a:

- prelievo di campioni rimaneggiati
- prove di resistenza meccanica S.P.T.
- prove di permeabilità tipo Lefranc

Le prove tipo Lefranc sono state eseguite in avanzamento entro i fori di sondaggio rivestiti fino all’orizzonte di prova. Le prove sono state realizzate a carico idraulico costante, misurando, dopo il raggiungimento della condizione di regime, la portata immessa per la durata di un’ora ad intervalli di 5 minuti. Le prove sono state eseguite in modo da interessare materiali sostanzialmente non gessosi ma prevalentemente classificabili come sabbio-limosi (più che limo-sabbiosi) ed i relativi risultati confermano tali caratteristiche di granulometria, attestandosi su valori compresi tra  $1E-3$  e  $1E-4$  cm/sec.

E’ ben noto, infatti, come la permeabilità di tali materiali sia fortemente condizionata, non già dalle caratteristiche di porometria dell’ammasso, ma dalle cavità dovute agli effetti di dissoluzione chimica (permeabilità per carsismo).

Tali valori indicano una discreta attitudine al drenaggio ed allo smaltimento delle pressioni neutre, per questa ragione, considerando anche l’elevato stato di fratturazione del substrato, non è stato ritenuto ipotizzabile un livello di falda vero e proprio all’interno dei materiali costituenti i versanti riprofilati.

Successivamente sono state eseguite anche prove di laboratorio su campioni rimaneggiati prelevati dalle cassette catalogatrici: sono state eseguite l’analisi granulometrica (a causa della presenza di materiale gessoso), la determinazione dei pesi di volume naturale ed allo stato secco e prove di taglio diretto a secco sulla sola frazione passante a 0.420 mm (per evitare il disturbo da effetto scala).

Nella definizione dei parametri di resistenza il materiale provato non è stato addensato in alcuna maniera: i risultati ottenuti sono pertanto da ritenersi indicativi del comportamento relativo a condizioni a minimo addensamento.

I risultati ottenuti (vedi tabelle nella pagina seguente) hanno permesso di ipotizzare un valore di angolo di attrito medio pari a  $30^\circ$  ed una coesione media pari a  $13 \text{ KN/m}^2$ . Tale valore è da ritenersi cautelativo in quanto ottenuto sulla sola frazione fine, che per quanto prevalente sul totale, ha portato alla definizione di valori che risultano in genere minori di quelli ipotizzabili per il campione originario.



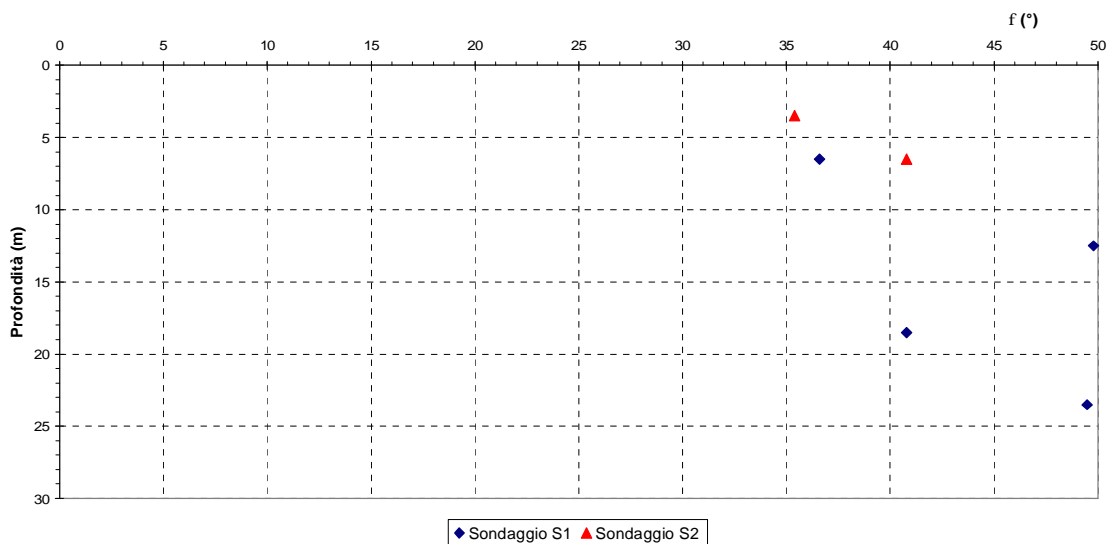
Campione C1	Prov.1	Prov.2	Prov.3
Press. Vert. [Kg/cm <sup>2</sup> ]	0.5	1.0	2.0
Resist. [Kg/cm <sup>2</sup> ]	0.46	0.77	1.41
Def. a rottura [%]	1.47	2.06	3.66

Angolo di attrito: 31° Coesione: 0.16 Kg/cm<sup>2</sup>

Campione E1	Prov.1	Prov.2	Prov.3
Press. Vert. [Kg/cm <sup>2</sup> ]	0.5	1.0	2.0
Resist. [Kg/cm <sup>2</sup> ]	0.38	0.68	1.24
Def. a rottura [%]	1.52	1.74	3.25

Angolo di attrito: 29° Coesione: 0.11 Kg/cm<sup>2</sup>

Inoltre, i valori ottenuti si riferiscono a condizioni di minimo addensamento; allo scopo di ottenere un confronto con quanto ipotizzabile nelle reali condizioni di sito, sono stati considerati i risultati delle prove SPT in foro ed i valori di Dr e  $\phi$  con la profondità ottenuti dalle correlazioni di *Gibbs e Holtz* e di *Shioi*. Dall'esame dei grafici riportati in figura si evidenzia uno stato di addensamento, e quindi una resistenza al taglio, decisamente superiore (almeno 35°) a quanto desumibile dai risultati delle prove di taglio.



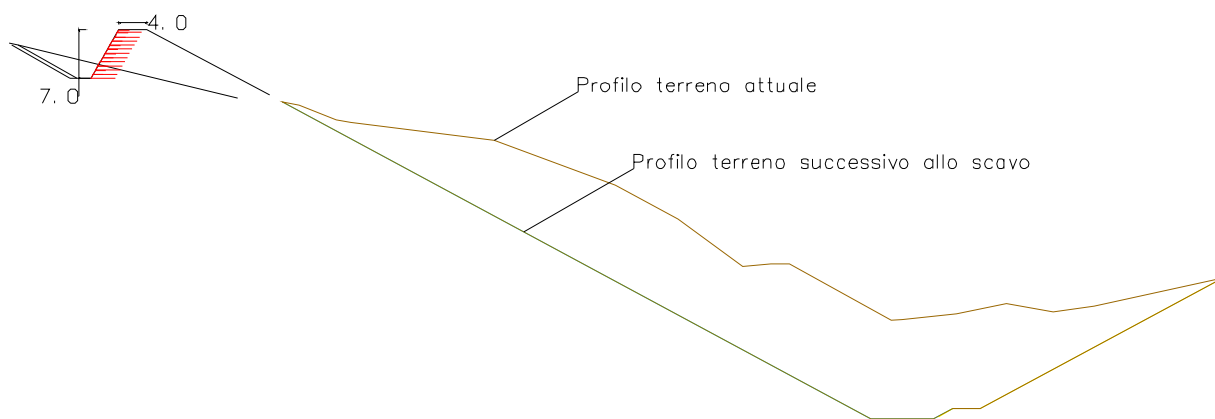
**Figura 6 Andamento dell'angolo di attrito interno con la profondità (da prove SPT in foro)**

Tuttavia ai fini della progettazione, e pertanto in considerazioni certamente conservative, si è stimato ragionevole effettuare le verifiche di stabilità con i valori dei parametri di resistenza determinati dalle prove di taglio, sulla sola frazione fine dei materiali gessosi (e trascurando quindi il contributo delle sabbie e delle breccie, certamente più resistenti dei gessi).

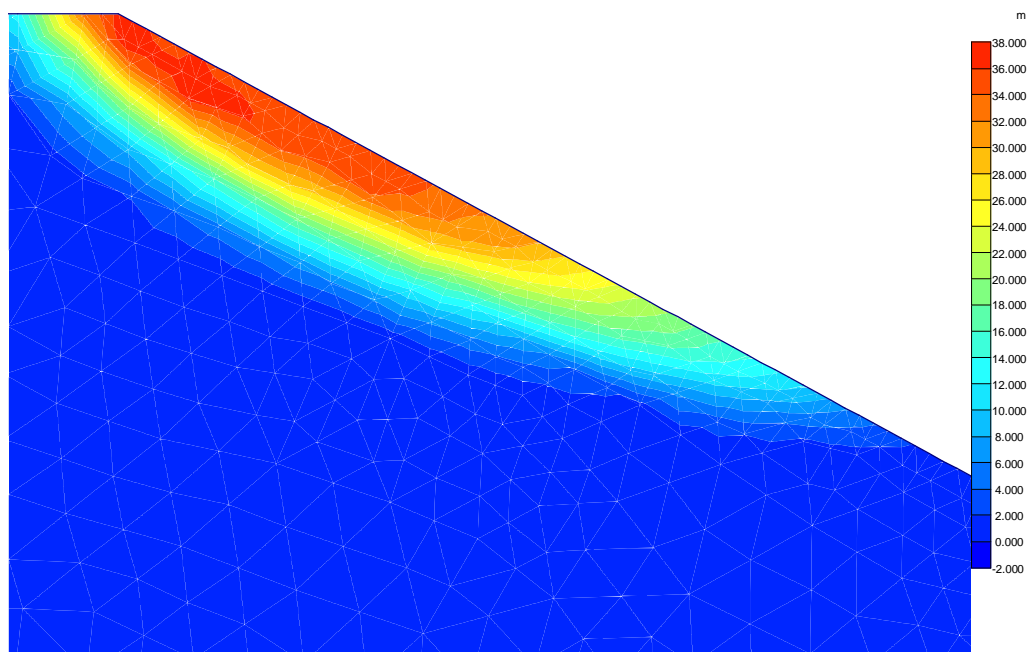
L'analisi è stata eseguita utilizzando un codice di calcolo ad elementi finiti, PLAXIS, specificatamente realizzato per lo studio di problematiche geotecniche.

È stata ipotizzata la presenza di uno strato di terreno uniforme avente i parametri geotecnici,  $\Phi = 30^\circ$  e  $c' = 0.13 \text{ Kg/cm}^2$ , rappresentativi della sola frazione fine del materiale gessoso.

Di seguito (fig. 7 e 8) viene mostrata la sezione ritenuta più critica ai fini dell'analisi di stabilità e la mesh di calcolo relativa ai cedimenti incrementali totali:



**Figura 7 Sezione critica di calcolo**



**Figura 8 Sezione critica di calcolo**

La superficie di frana individuata dalle aree colorate è stata ottenuta considerando un coefficiente riduttivo dei parametri di resistenza pari a 1.4. I differenti colori fanno riferimento a differenti valori degli spostamenti incrementali totali. La profondità media di tale frana è di circa 25 ÷ 30 m. Aver considerato un unico terreno omogeneo, i cui parametri sono stati precedentemente descritti, rappresenta una condizione cautelativa in quanto la presenza di un substrato roccioso profondo anche 30-35 m, peraltro presente nella realtà del sito considerato, avrebbe indotto una superficie di scivolamento più superficiale caratterizzata da un coefficiente di sicurezza maggiore di quello determinato.

In conclusione i risultati delle analisi di stabilità hanno dimostrato che, anche in presenza di ipotesi certamente conservative, la stabilità dei versanti riprofilati era garantita con sufficiente margine di sicurezza ( $F_s = 1.393$ ).

Per questa ragione, e per quanto già ampiamente descritto nei capitoli precedenti, si è ritenuto di disporre di margini di sicurezza reali ancora più elevati, e pertanto ben più che soddisfacenti.

In realtà alcune osservazioni sembrano comunque da formularsi, in relazione soprattutto al controllo delle acque scolanti lungo il versante sovrastante.

L'intercettazione ed il successivo smaltimento delle acque di scolo sono, in effetti, da considerarsi di vitale importanza, sia per impedire la formazione di un livello di falda (anche se tale circostanza è sembrata poco probabile data la permeabilità del substrato e dei depositi di versante), sia per impedire effetti di erosione accelerata sulle pendici della zona riprofilata a 28°.

Gli interventi realizzati tuttavia, ad oggi non dimostrano una piena efficacia, sono infatti presenti sull'accumulo incisioni anche profonde, recenti, e un ristagno d'acqua a monte del rilevato realizzato.

### **3. Relazione di sintesi delle attività di rilevamento geomorfologico, geomeccanico e geostrutturale:**

Gli aspetti geomorfologici e strutturali sono stati già discussi nelle sezioni relative all'inquadramento della zona, di rilevante importanza è stata l'esecuzione di rilievi geomeccanici in parete, allo scopo di definire i cinematismi caratterizzanti il fenomeno franoso al livello del substrato roccioso, e soprattutto di valutare il rischio residuo di distacco di ulteriori volumi rocciosi. I sistemi di fratture misurati in parete sono stati successivamente confrontati con quelli osservabili nei settori limitrofi alla nicchia di distacco e con dati raccolti precedentemente all'evento franoso.

Il settore sommitale della nicchia di distacco è caratterizzato da una parete rocciosa subverticale di altezza variabile da 20 a 30 m e con larghezza di circa 50 m. Altri affioramenti rocciosi sono presenti nelle zone laterali della nicchia stessa.

In base ai sistemi di discontinuità rilevati ed alle possibilità cinematiche del distacco di blocchi sono stati individuati i principali compartimenti rocciosi potenzialmente mobilizzabili, ed è stato stimato il loro grado di pericolosità in base agli indizi osservabili.

La stratificazione presenta in genere valori decimetrici, mentre i restanti sistemi di discontinuità hanno valori di spaziatura intorno a 1 – 1.5 m. Le aperture sono generalmente elevate, denotando uno stato

di avanzato rilascio dell'ammasso roccioso. Le fratture esposte presentano un'alterazione superficiale da bassa a media (W2 – W3).

Per quanto riguarda la circolazione idrica, anche se all'atto del rilievo non erano stati evidenziati stillicidi in atto, sono state individuate concrezioni solfato-calciche sulle pareti delle fratture, denotanti l'esistenza di una circolazione di una certa entità proveniente dagli ammassi rocciosi sovrastanti (trasporto di sali in soluzione).

In base alle caratteristiche rilevate ed alla combinazione dei sistemi di fratture con l'orientazione della parete è stato possibile classificare l'ammasso roccioso nella classe IV ("scadente" ) della classificazione RMR.

I caratteri generali dell'area di rilievo geomeccanico effettuate dallo studio sono sintetizzabili come segue:

Quota 500-530 m s.l.m.;

Superficie: circa 50 m (larghezza) x 30 m (altezza);

Esposizione: N – NNE;

Litologia: calcari nodulari nerastri con intercalazioni pelitiche, ben stratificati con stratificazione decimetrica (Calcari di Angolo).

Alcune misure di carattere puntuale sono state effettuate anche nei settori laterali della nicchia di distacco, all'interno della nicchia stessa e in settori esterni limitrofi.

La zona di rilievo rappresenta il settore sommitale della nicchia di distacco del fenomeno franoso oggetto di studio; l'ammasso roccioso si presenta in genere rilasciato e talora disarticolato, con compartimenti rocciosi separati da fratture molto aperte.

Come meglio illustrato nella parte di inquadramento geologico, il settore oggetto di studio è caratterizzato da lineamenti strutturali con orientazione prevalente NNW-SSE; una faglia appartenente a tale sistema è evidente nel settore sinistro (orografico) della nicchia.

Le famiglie di discontinuità (giunti di stratificazione St; piani di fratturazione K1-2-3-4) e le relative caratteristiche geomeccaniche sono riportate sinteticamente nella tabella della pagina seguente:

Nome	Imm, media (°)	Incl media (°)	Spaz (cm)	Apert (mm)	JRC	Riemp	JCS (MPa)	note
St	225 (120)	20	10-50	1-5	4.6			
K1	090-270	72	100-150	100-150	8-10	Detrito grossolano; limo		
K2	022	70	50-100	100	4-6	Limo o assente	36;52**	Fronte principale parete
K3	310	68	100	100-150	4-6	Assenti: loc. deposito di sali solfato-calcarei	22.5;34.5*	
K4	340	72	150	20-50	12-16*	Limo: loc. deposito di sali solfato-calcarei	23	Importante nel settore sx della parete; piano di faglia

In base alla combinazione dell'orientazione dei sistemi di fratture principali con l'orientazione della parete è stato possibile definire preliminarmente i potenziali meccanismi di distacco di compartimenti rocciosi o di singoli blocchi:

1. Ribaltamento/Scivolamento superficiale lungo K2 + taglio lungo K1 + piano di debolezza al piede lungo St;
2. Ribaltamento/Scivolamento superficiale lungo K3 + taglio lungo K1 + piano di debolezza al piede lungo St;
3. Scivolamento a cuneo lungo intersezione tra K3 e K2;
4. Scivolamento a cuneo lungo intersezione tra K3 e K1.

Successivamente, grazie al rilievo in sito ed al riconoscimento del grado di attività delle singole fratture principali, sono stati individuati i principali compartimenti rocciosi potenzialmente mobilizzabili o le principali zone di distacco dei blocchi.

### **Zona instabile n. 1**

Descrizione: pilastrino prismatico alla sommità della parete

Meccanismo: GS su k2 + C su k3 + crollo su piano di St alla base

Volume totale: ca. 20 x 5 x 1.5 = 80-100 m3

Volume unitario blocchi: 0.5-1 m3

Grado pericolosità (stima): medio (fratture aperte e con tendenza al rilascio)



### **Zona instabile n. 2**

Descrizione: pilastrino prismatico alla sommità della parete, a sinistra della zona n° 1

Meccanismo: GS su k2 + C su k3 + crollo su piano di St alla base

Volume totale: ca.  $20 \times 5 \times 1.5 = 80-100 \text{ m}^3$

Volume unitario blocchi: 0.5-1 m<sup>3</sup>

Grado pericolosità (stima): medio (fratture aperte e con tendenza al rilascio)

### **Zona instabile n. 3**

Descrizione: Speroni parzialmente disarticolati

Meccanismo: GS su k2 + C su 160/80 + 090/70

Volume totale:  $2 \times 4 \times 10 = 80 \text{ m}^3$

Volume unitario blocchi: 0.5 - 1 m<sup>3</sup>

Grado pericolosità (stima): elevato (ammassi rocciosi disarticolati)

### **Zona instabile n. 4**

Descrizione: caduta blocchi diffusa a monte della zona n° 2

Meccanismo: GS su k2 + C su k3 o k4 + crollo su piano St

Volume unitario blocchi: 0.5-1 m<sup>3</sup>

Forma blocchi: prismi triangolari; cubi

Frequenza: elevata (molti blocchi già accumulati alla base, rimobilizzabili soprattutto in seguito ad un crollo dell'instabilità n° 3)

### **Zona instabile n. 5**

Descrizione: sperone disarticolato sul lato destro della nicchia

Meccanismo: rilascio di fratture disarticolate (k2 + k3 + k4)

Volume totale: ca. 150 m<sup>3</sup>

Volume unitario blocchi: 0.5 m<sup>3</sup>

Grado pericolosità (stima): elevato (ammasso roccioso già disarticolato)

N.B.: GS = scivolamento superficiale  
C = taglio

Come emerge da quanto sopra descritto, fenomeni di crollo di blocchi rocciosi dalle porzioni disarticolate della parete esaminata sono abbastanza frequenti. I blocchi in parete hanno dimensioni da decimetriche fino ad un massimo di circa 1 m<sup>3</sup>, mentre in detrito si osservano blocchi di dimensioni generalmente decimetriche.

L'accumulo detritico che si trova all'interno della nicchia di distacco è caratterizzato da blocchi di dimensioni medie di alcuni  $\text{dm}^3$ , con isolati blocchi fino a  $0.5 \text{ m}^3$  e un'elevata percentuale di detrito fine (clasti di dimensioni centimetriche). Quest'ultimo è particolarmente abbondante nella parte bassa dell'accumulo, probabilmente anche in seguito a fenomeni di trasporto e rimaneggiamento da parte delle acque.

Agli esecutori dei rilievi è stato possibile osservare in sito la caduta di alcuni massi dalla parete. Il moto avviene prevalentemente per rimbalzo, con elevata restituzione di energia soprattutto in senso tangenziale. Indicativamente sono stati stimati i coefficienti di restituzione energetica come:

Coefficiente di restituzione normale: 0.55 – 0.6

Coefficiente di restituzione tangenziale: 0.65 – 0.67

Dal confronto fra le diverse campagne di rilievo si possono trarre le seguenti osservazioni:

1. Si nota in generale una buona concordanza fra i sistemi di discontinuità presenti in parete, nelle aree limitrofe ed all'interno della nicchia di distacco, anche al passaggio fra litotipi e formazioni differenti (calcari/carniole/gessi);
2. La stratificazione è in generale concordante; sono presenti alcune variazioni locali dovute alla presenza di flessure o pieghe aperte a scala metrica o decametrica (es. affioramento di gessi sul versante a W della nicchia di distacco; nel settore sinistro della nicchia sono invece presenti alcuni affioramenti di calcare che presentano giacitura differente (120-090/30) e che sono da considerarsi con ogni probabilità disarticolati;
3. Nel settore di valle, all'interno della nicchia, alcuni sistemi di fratture ad elevata inclinazione risultano leggermente ruotati rispetto a quelli presenti alla testata della nicchia stessa (e.g. 170/45 in basso → 340/72 in alto; 200/90 in basso → 022/70 in alto); questo fatto può essere attribuito sia a variazioni locali nell'orientazione, sia al rilascio dell'ammasso roccioso situato alla sommità della zona di distacco.

Come evidenziato nei paragrafi precedenti, la parete alla sommità della nicchia di distacco presenta un rischio residuo per il distacco di volumi rocciosi e frequenti fenomeni di caduta di singoli blocchi. Il rischio del distacco di volumi rocciosi elevati (fino a  $100 \text{ m}^3$ ) può considerarsi da medio a elevato, mentre i fenomeni di caduta di singoli massi sono ricorrenti e con elevata frequenza.

Nel settore destro (orografico) della parete erano presenti diversi blocchi disarticolati, per i quali si è opportuno valutare l'ipotesi di un intervento di disaggio.

I settori centrale e sinistro presentano invece volumi rocciosi più elevati parzialmente disarticolati, per i quali, in una prima fase si era ritenuto valutabile un intervento di stabilizzazione mediante chiodature e ancoraggi, successivamente ritenuto inefficace e oneroso.

#### **4. Studio ed analisi numerica del fenomeno franoso, relazione conclusiva:**

Utilizzando i dati acquisiti durante le campagne di rilevamento, lo STUDIO MAIONE ha definito lo stato dell'ammasso roccioso secondo le classificazioni geomeccaniche RMR e GSI:

##### **RMR (Rock Mass Rating):**

Sono stati classificati con l'indice RMR la zona di nicchia, costituita da calcari di Angolo, ed il fianco sinistro, dove affiora la Carniola di Bovegno.

I parametri necessari alla classificazione con questo metodo sono:

→ L'indice RQD ottenuto mediante le relazioni di Palmstrom (1982)

$$RQD = 115 - 3.3 J_v \quad \text{e} \quad J_v = (1/sK_1) + (1/sK_2) + \dots (1/sK_n)$$

dove  $sK_n$  = spaziatura della discontinuità ennesima.

- Apertura (determinata direttamente nelle stazioni di rilievo).
- Coefficiente di rugosità JRC (Joint Roughness Coefficient) (determinata direttamente nelle stazioni di rilievo).
- Riempimento delle discontinuità (determinata direttamente nelle stazioni di rilievo).
- Condizioni di umidità (determinata direttamente nelle stazioni di rilievo).

Sono stati ottenuti valori di RMR pari a 37 nella Carniola di Bovegno e a 43 nei calcari di Angolo. Tali valori sono stati successivamente corretti in base alla predisposizione delle orientazioni di pendio e discontinuità a provocare il dissesto. Osservando condizioni più sfavorevoli sul fianco sinistro, al valore ricavato nelle Carniole è stato sottratto un coefficiente pari a 25 (possibilità cinematiche di scivolamento planare e a cuneo), mentre ai calcari un coefficiente di 5 (possibili ribaltamenti). Ne sono conseguiti valori RMR\* pari a 12 per la formazione gessifera, corrispondente ad una definizione molto scadente, e pari a 38 per la formazione carbonatica, corrispondente a mediocre.

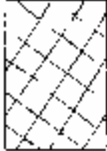
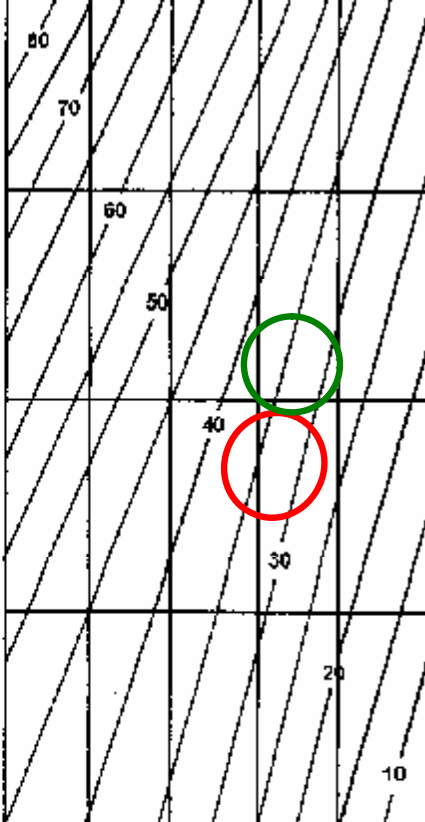



##### **GSI (Geological Strength Index):**

È stato definito anche l'indice di resistenza dell'ammasso roccioso, secondo quanto proposto da Hoek (1997). I gessi della Carniola di Bovegno presentano struttura tipo "BLOCKY/DISTURBED": piegata e/o fagliata con blocchi angolari formati per intersezione di numerose famiglie di discontinuità (almeno 6) lisce, spesso alterate, localmente coincidenti con specchi di faglia, striate o interessate da riempimenti granulari (scaglie) o coesivi. Il valore di GSI è stato considerato compreso tra 30-40 nell'area circolare rossa di Tabella 5.

I calcari che costituiscono la zona di nicchia presentano struttura "VERY BLOCKY": ammassi rocciosi disarticolati per effetto di più sistemi di discontinuità (almeno 4) che separano blocchi prismatici, o al limite strutture tipo "BLOCKY/DISTURBED". Le discontinuità possiedono scarsi o mediocri caratteri di resistenza (POOR - FAIR).

Anche in questo caso si sono considerati valori di GSI compresi tra 30-40, corrispondenti all'area circolare verde di Tabella 5.

**Tabella 5 Caratterizzazione degli ammassi rocciosi fratturati**

<b>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX</b>  From the letter codes describing the structure and surface conditions of the rock mass (from Table 4), pick the appropriate box in this chart. Estimate the average value of the Geological Strength Index (GSI) from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range of GSI from 38 to 42 is more realistic than stating that $GSI = 38$ .		<b>SURFACE CONDITIONS</b>  <b>VERY GOOD</b> Very rough, fresh unweathered surfaces  <b>GOOD</b> Rough, slightly weathered, iron stained surfaces  <b>FAIR</b> Smooth, moderately weathered or altered surfaces  <b>POOR</b> Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings of angular fragments  <b>VERY POOR</b> Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings				
<b>STRUCTURE</b>		<b>DECREASING SURFACE QUALITY</b>				
 <p><b>BLOCKY</b> - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets</p>	 <p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES</p>					
 <p><b>VERY BLOCKY</b> - interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets</p>						
 <p><b>BLOCKY/DISTURBED</b>- folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets</p>						
 <p><b>DISINTEGRATED</b> - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces</p>						

Di seguito vengono riportati i criteri utilizzati per la definizione dei parametri di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso (Hoek & Brown) e dei parametri di resistenza al taglio delle principali discontinuità (Barton):

#### **Criterio di rottura di Hoek & Brown (1997):**

Le coppie di valori di  $s_3'$ ,  $s_1'$  ottenute dalle relazioni di Hoek & Brown sono state interpretate con il più comune criterio lineare di Mohr-Coulomb per ottenere i parametri di resistenza dell'ammasso roccioso  $c'$  e  $\phi$ .

I valori richiesti nella formula di Hoek & Brown sono stati ricavati tramite relazioni empiriche dall'indice GSI, oppure da tabelle (funzione dei caratteri petrografici e tessiturali), mentre alcuni, come la resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta, confrontando i dati di campagna con quelli riportati in letteratura. Di seguito sono riportati i dati di output determinati per interpolazione Mohr-Coulomb dei dati a rottura secondo il criterio di Hoek & Brown.

Output	CARNIOLA DI BOVEGNO (fianco sx)	CALCARI DI ANGOLO (nicchia)
$\phi$ [°]	49	53
c [MPa]	0.18	0.41

#### **Equazione empirica di Barton:**

I parametri di resistenza al taglio lungo le discontinuità sono stati calcolati tramite l'Equazione empirica di Barton:

$$\tau = \sigma_n' \tan[JRC \text{ Log}(JCS/\sigma_n') + \phi_b']$$

dalla relazione sopra si riconosce la dipendenza dell'angolo di resistenza al taglio dalla relazione

$$\phi = \phi_b' + i = f(\sigma_n')$$

La resistenza opposta dalla superficie è dovuta all'attrito ed alla resistenza meccanica del materiale in corrispondenza delle asperità, la quale a sua volta dipende dal carico normale ad essa applicato. La coesione è trascurabile. Tale equazione è stata applicata per caratterizzare la resistenza lungo le famiglie di discontinuità rilevate nell'ammasso roccioso, con particolare riferimento alla superficie rilevata sul versante sinistro con giacitura 055°/45° (immersione/inclinazione), corrispondente al sistema indicato con K9. Tale superficie è stata ritenuta responsabile dello scivolamento di massa occorso il 15 novembre 2000. La superficie di scorrimento si è sviluppata in buona parte nei gessi della Carniola di Bovegno, per i quali si ammette un peso di volume  $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$  ed un angolo di resistenza al taglio di base  $\phi_b' = 28^\circ$ .

Gli spessori della massa in movimento lungo tale superficie, sono compresi tra 14 m e 38 m.

Lo sforzo verticale  $\sigma_v = \gamma z$ , per una profondità media  $z = 22.5 \text{ m}$ , è  $\sigma_v = 0.5 \text{ Mpa}$ . Gli sforzi normali alla superficie di scivolamento sono stati approssimati a quelli verticali, in considerazione del fatto che

sono state trascurate, nelle analisi, le componenti degli sforzi orizzontali normali alla superficie di movimento.

I valori medi rappresentativi di JRC e JCS, definiti a partire dalle misure dirette in sito, sono rispettivamente:

$$JRC = 6, JCS = 18 \text{ MPa}$$

Da questi valori si è ottenuto infine:

$$\phi = \phi b' + i = 38^\circ, c = 0$$

Analoghe considerazioni hanno condotto alla definizione dei parametri di resistenza dei Calcarei di Angolo, per i quali, lungo la medesima discontinuità, si è posto:

$$\phi b' = 30^\circ, JRC = 6, JCS = 28 \text{ MPa}$$

Ottenendosi pertanto:

$$\phi = \phi b' + i = 41^\circ, c = 0$$

### **Back-analysis:**

Lo STUDIO MAIONE ha effettuato un'analisi a ritroso tramite modellazione numerica del dissesto, utilizzando il codice di calcolo PLAXIS, basato sul modello ad elementi finiti.

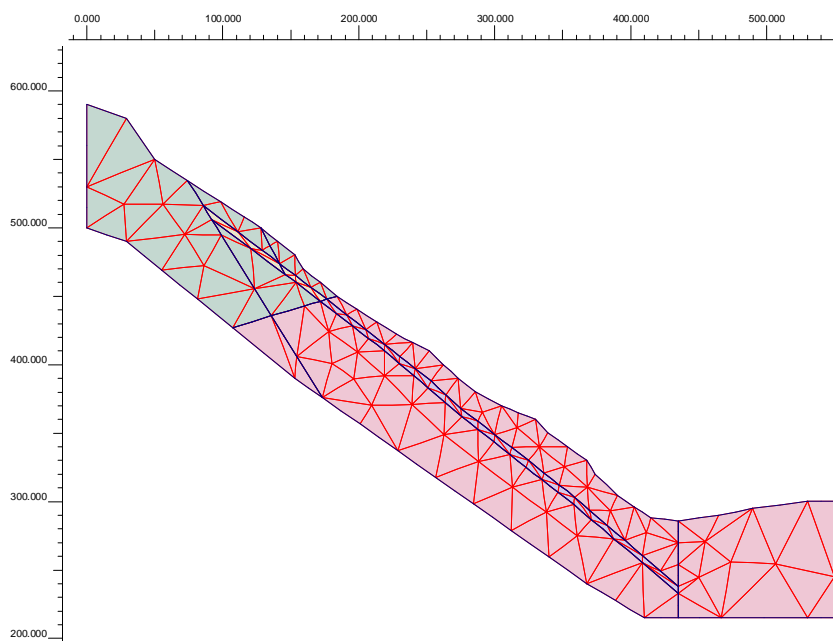
Si è utilizzato uno schema di calcolo piano delle deformazioni (plane strain), ciò significa che, per il problema considerato, il calcolo delle condizioni di una generica sezione longitudinale al pendio può essere considerata rappresentativa della situazione reale. Per la rappresentazione degli elementi di roccia sono stati utilizzati elementi triangolari a 6 nodi (interpolazione di quarto ordine con 3 punti di integrazione). Per la modellazione del comportamento tenso-deformativo di tali elementi è stato utilizzato il modello elastoplastico di Mohr-Coulomb (2 parametri di deformabilità elastica - E e  $\nu$  - e 3 parametri di resistenza – rispettivamente coesione efficace  $c'$ , angolo di attrito interno  $\phi'$  e angolo di dilatanza  $\psi$ ).

La scelta dei valori assegnati a tali parametri, riassunti nella Tab. 6, è descritta nel capitolo contenente l'inquadramento geomeccanico. Vengono inoltre indicati i colori con i quali vengono rappresentati i diversi materiali nella successiva Fig. 9.

Come emerso dall'analisi del dissesto, un ruolo determinante nell'innesco del fenomeno è stato rivestito dalla faglia indicata come K9. La modellazione di tale faglia è stata affrontata introducendo una banda di taglio di 4-5 m di spessore con parametri geotecnici diversi rispetto al materiale costituente l'ammasso.

**Tabella 6 Parametri utilizzati per il modello Mohr-Coulomb**

Materiale		$\gamma_{dry}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\phi'$ [°]
Calcari	verde	25.0	410	53
Calcari_K9	kaki	25.0	0	41
Gessi	rosa	22.0	180	49
Gessi_K9	viola	22.0	0	37



**Figura 9 Mesh utilizzata nelle analisi**

In particolare, si è scelto di definire la legge di resistenza dell'ammasso dei gessi in accordo con il criterio di Hoek & Brown; mentre per modellare il comportamento lungo la faglia K9 è stato utilizzato il criterio di Barton.

Sono state quindi condotte diverse analisi, classificabili secondo due differenti condizioni: nella prima è stata studiata la stabilità del pendio, supponendo che fosse completamente drenato, mentre la seconda è stata eseguita considerando la presenza di un livello di falda, posto a profondità variabile dal piano campagna. Tale condizione dovrebbe riprodurre la situazione del versante nelle condizioni immediatamente antecedenti all'evento franoso. In questo secondo caso, la permeabilità elevata dei litotipi costituenti il versante e l'elevata fratturazione degli stessi hanno portato gli analisti ad escludere una completa saturazione del versante, e a supporre un livello piezometrico all'interno dei gessi, ad una profondità media di 5-10 m. Date le considerazioni sopra effettuate bisogna però sottolineare come in realtà l'andamento della piezometrica debba essere meno regolare e di difficile previsione. Le analisi sono state eseguite riducendo i parametri di resistenza ( $\tan\phi$  e  $c$ ) progressivamente fino al collasso del sistema. Il fattore di sicurezza  $F_s$  è dato dal rapporto resistenza mobilabile/resistenza a rottura. Pertanto il valore del coefficiente di sicurezza fornito dall'analisi rappresenta il fattore di riduzione dei parametri di resistenza che ha determinato il collasso.



In assenza di falda è stato necessario ridurre i parametri di resistenza di un  $F_s$  pari a 1.5, la superficie di scorrimento si è impostata sulla faglia K9 e sono stati mobilitati sia i gessi che i calcari. Anche in presenza d'acqua la superficie di scorrimento si è impostata su K9, ma in tal caso le condizioni di rottura si sono raggiunte per un fattore di riduzione pari ad 1.1. L'analisi ha evidenziato come le bancate di calcari non siano state coinvolte nelle prime fasi del collasso, probabilmente per la loro stratificazione a reggipoggio.

In conclusione si osserva che la stabilità del pendio è stata determinata dalla resistenza a taglio della faglia, il collasso è avvenuto per rottura delle Carniole, e poi ha coinvolto anche i calcari sovrastanti. Non vi sono prove di un concreto coinvolgimento delle attività estrattive sul franamento occorso. Tuttavia si può osservare che il piano di scivolamento presenta inclinazioni generalmente maggiori o uguali a quella del versante: per questa ragione le attività di scavo al piede, facilitando l'uscita di una superficie di rottura potrebbero aver creato condizioni favorevoli allo scivolamento.

Le analisi hanno dimostrato l'importanza della circolazione idrica sulla stabilità del versante ( $F_s$  da 1.5 a 1.1 da condizioni in assenza di falda a condizioni di falda a profondità media di 5-10 m). Anche saturazioni parziali possono determinare rilevanti abbattimenti della resistenza disponibile.

#### **Analisi scenari di rischio:**

##### ***Scenario 1: franamenti di grandi dimensioni***

Il presente paragrafo è volto alla determinazione dei possibili scenari di rischio conseguenti a mobilitazioni di grandi volumi di roccia (paragonabili a quelli del franamento già occorso).

Le possibilità di effettuare considerazioni fondate su un approccio quantitativo ha risentito certamente di molte fonti di incertezza. Si pensi ad esempio a come la fitta copertura boschiva del versante occulti la visione di fratture e deformazioni incipienti, ma si pensi anche alle difficoltà connesse alla ricostruzione dell'assetto strutturale di ammassi rocciosi così fratturati.

Tuttavia, pur in possesso di limitate informazioni, l'eventualità di franamenti di grandi dimensioni è sembrata di difficile verosimiglianza, anche sulla base delle numerose osservazioni effettuate in campagna.

Si ricorda innanzi tutto che condizione assolutamente indispensabile ad un franamento come quello già occorso è la presenza di un piano di scivolamento (quale la faglia 043°/45°) di inclinazione tale da consentire l'uscita della superficie di rottura.

Parallelamente, superfici di discontinuità ad elevata inclinazione possono sì creare condizioni di svincolo sui fianchi ed a monte, senza che tuttavia si possa sviluppare un cinematismo di collasso.

Dalle numerose osservazioni di campagna sulla geometria delle discontinuità (già riportate in altra sede) risulta con estrema chiarezza che l'unica famiglia che potesse consentire il supporto ad un franamento fosse proprio quella della faglia in esame.

D'altro canto tale discontinuità non è più presente, dato che emerge sui settori sud-occidentali (rispettivamente, a monte e sul fianco in sinistra). In tali aree pertanto si è rilevata, a grande scala, la sola presenza di sistemi ad andamento sub-verticale (inclinazioni da medie da 60° ad 80°), oppure di elementi che immergono a reggipoggio (stratificazione).

Nessuna di queste famiglie è risultata quindi possedere le caratteristiche geometriche tali da consentire movimenti di grandi dimensioni. In mancanza di tali condizioni sarebbe necessario ipotizzare improbabili superfici di rottura che, non coincidendo con giunti o discontinuità già esistenti, dovrebbero essere governate dalla legge di rottura dell'ammasso e non del giunto.

Per quanto riguarda il margine orientale, nonostante l'esecuzione delle attività di rilevamento in campagna, non si sono ravvisate evidenze circa la continuità della faglia, che anzi, sulla base della sua giacitura, sembra approfondirsi verso la parte alta del bacino.

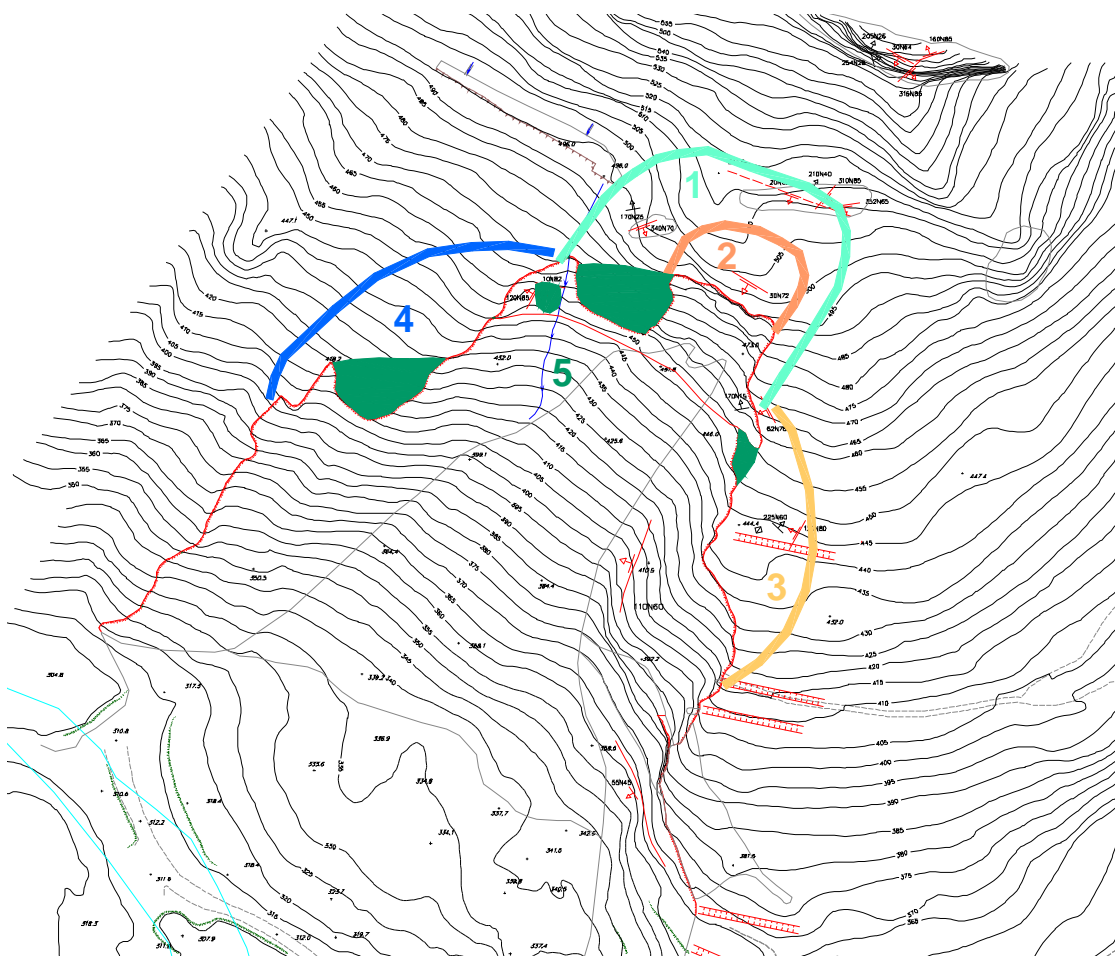
Per questa ragione, in mancanza di dati ulteriori non è ritenuto plausibile il verificarsi di movimenti di grandi dimensioni.

Tuttavia, a causa anche delle incertezze alle quali si è già accennato, si è disposto per la realizzazione di un piano di monitoraggio (mire ottiche ed estensimetri) in grado di rilevare l'eventuale sviluppo di movimenti e deformazioni su tutta l'area circostante la nicchia di distacco.

### ***Scenario 2: caduta di masse rocciose di medie dimensioni***

Come già accennato in precedenza, l'elevato livello di fratturazione degli ammassi rocciosi che costituiscono il versante crea le condizioni favorevoli per distacchi di masse di piccole e medie dimensioni piuttosto che per franamenti generalizzati.

Le verifiche effettuate hanno interessato l'intero perimetro della nicchia per tutto il suo sviluppo al di sopra di quota 400 m s.l.m (vd. Fig. 10) e si riferiscono alle possibilità di cinatismi 2D e 3D governati dalle combinazioni di più famiglie di discontinuità



**Figura 10 Casi di interesse per scenario di franamenti di medie dimensioni (indicativamente oltre 1000 m<sup>3</sup>)**

*a) arretramento della nicchia di distacco lungo la superficie di faglia*

Le verifiche di stabilità sono state eseguite con il programma di calcolo (RocPlane) elaborato per lo studio di fenomeni di scivolamento planare di ammassi rocciosi in condizioni plane strain, nell'area a monte della nicchia, nel settore di affioramento dei calcari di Angolo.

Come modello di resistenza è stato assunto quello proposto da Barton-Bandis che considera la resistenza al taglio lungo giunti scabri non cementati. Utilizzando un cinemismo plane strain sono stati trascurati i contributi di resistenza laterale, in modo da simulare l'effetto di svincolo laterale offerto da sistemi quali 120/80 e 310/68. Lungo tali discontinuità tuttavia nella realtà agiscono pur sempre forze resistenti di entità non trascurabile, per questo l'analisi è stata condotta sotto condizioni estremamente punitive. Il meccanismo ipotizzato deriva dalla combinazione del piano K9, con i relativi parametri geomeccanici calcolati tramite la relazione empirica di Barton, e le fratture di trazione ubicate a monte della nicchia di distacco. Il programma ha calcolato la distanza dalla nicchia che minimizza  $F_s$ , in questo caso di 10.5 m dalla linea di cresta, per un  $F_s$  di 1.26. Le analisi eseguite considerando gli altri sistemi di tension crack osservati in campagna non hanno fornito significative variazioni di  $F_s$ , che ha assunto valori compresi tra 1.26 ed 1.28.

Dato il margine di incertezza di questo tipo di analisi e l'azione instabilizzante derivante da eventi meteorici intensi è d'obbligo considerare la possibilità di questo evento con la dovuta attenzione.

**Tabella 7 Risultati dell'analisi: Caso 1**

$F_s$	1.26	
Forze instabilizzanti	650.06	t/m
Forze resistenti	817.77	t/m
Peso cuneo	1011.31	t/m
Volume cuneo	439.7	m <sup>3</sup> /m
Sforzi di taglio	749.99	t/m <sup>2</sup>
Azione normale	774.71	t/m

*b) scivolamento di cunei nella zona di nicchia di distacco*

In questo caso è stata effettuata l'analisi di stabilità di cunei in corrispondenza della nicchia di distacco nell'area di affioramento dei Calcari di Angolo. L'analisi è stata eseguita servendosi di un programma (Swedge) che consente lo studio delle condizioni di stabilità di un cuneo di roccia individuato dall'intersezione tra due piani di discontinuità e da un'eventuale frattura di trazione.

L'esecuzione del test di Markland ha dimostrato che, per elevati valori di inclinazione del versante, è possibile evidenziare condizioni di movimento fra le famiglie K1 e K2, K1 e K3 K1 e K4.

I valori più bassi di  $F_s$  sono determinati dalla combinazione della coppia K1-K3, di seguito sono riportati i parametri geometrici e geomeccanici utilizzati:

famiglia	JRC	JCS [MPa]	$\phi_b$ [°]	$\phi'$ [°]	$c'$ [MPa]
<b>K1(090/70)</b>	6	28	30	42	0
<b>K3(310/68)</b>	6	28	30	42	0

La geometria del pendio e dei due sistemi di discontinuità individuano un cuneo avente volume  $V \cong 238.97 \text{ m}^3$  e peso  $P \cong 597.42 \text{ t}$ , che andrebbe compreso negli scenari  $<1000 \text{ m}^3$ , ma è stato qui compreso per la similitudine con il caso precedentemente analizzato. Il  $F_s$  corrispondente è di 2.1.

*c) scivolamento di cunei nella zona di fianco occidentale*

In questo caso lo STUDIO MAIONE ha verificato la stabilità dei cunei che si possono generare sul fianco occidentale, all'interno degli affioramenti di Carniola di Bovegno. Sono stati utilizzati nell'analisi sia i dati acquisiti dagli autori e dalla soc. ARETHUSA. Oggetto d'indagine sono stati i cunei originati dall'intersezione delle famiglie K2 (090°/70°) e K6 (310°/68°), considerando, eventualmente, la presenza di tension cracks (30°/70°). Data la dispersione dei valori dell'inclinazione delle discontinuità è stato scelto un approccio probabilistico, valutando, con il metodo Monte Carlo, 1000 condizioni,

ottenute generando casualmente i valori dell'inclinazione di K2 e K6 secondo due distribuzioni normali. Le analisi sono state condotte in presenza o assenza di Tension Crack, ma sempre in assenza d'acqua, ritenuta condizione verosimile data l'intensa fratturazione dell'ammasso in quest'area.

I valori di  $F_s$  ottenuti variano tra 2.05 e 2.5, e l'approccio probabilistico ha dimostrato che i cunei collegati ai cinematismi più probabili sono di volume inferiore ai 3000 m<sup>3</sup>. Tuttavia i valori di  $F_s$  ottenuti consentono un buon margine di sicurezza anche per le combinazioni più sfavorevoli, e anche in presenza (ritenuta poco probabile) di modesti quantitativi d'acqua nelle fratture.

Allo scopo di approfondire lo studio del caso 3, è stata eseguita un'analisi deterministica, basata su condizioni geometriche comprese all'interno del range della precedente analisi probabilistica.

Si è ottenuto un valore di  $F_s = 2.57$ , su un fronte alto 55 m, in presenza di un tension crack (30°/70°) a 15 m di distanza dal ciglio, con un cuneo di volume  $V \cong 4649.09$  m<sup>3</sup> e peso  $P \cong 10228$  t.

#### *d) scivolamenti di cunei nella zona di fianco orientale*

Lo scivolamento di cunei dal fianco orientale della nicchia è stata considerato anche a causa del fatto che la stratificazione delle Carniole poteva suggerirne la possibilità.

A tale scopo si ricorda che, la stratificazione presenta caratteri geometrici di estrema variabilità (228÷310°/08÷68°).

Sono state pertanto effettuate diverse analisi, considerando un pendio schematizzabile come 05÷15°/45°, attraverso le quali è stato possibile riconoscere che, sotto tali ipotesi, non sono possibili cinematismi di distacco.

#### *e) stabilità di speroni isolati*

Le osservazioni di campagna hanno consentito di riconoscere la presenza di alcuni elementi, morfologicamente peculiari, in precarie condizioni di equilibrio (vedi aree a retino pieno in fig. 9).

Tali aree, definibili come "speroni isolati", sono caratterizzate dalla morfologia di elementi meccanicamente svincolati su più lati.

La complessità numerica di un'analisi 3D vera e propria ne ha reso impossibile la quantificazione delle condizioni di stabilità.

Gli autori dell'analisi hanno pertanto suggerito operazioni di demolizione e disaggio, e ove non possibile date le dimensioni, campagne di monitoraggio. Tuttavia in alcuni casi né l'una né l'altra operazione sono state possibili come nel caso del torrione in roccia ritratto a lato, che allo stato attuale si presenta nelle stesse condizioni di quando è stata effettuata l'analisi.



### **Scenario 3: crolli di singoli massi o inferiori a 1000 m<sup>3</sup>**

Lo STUDIO MAIONE ha effettuato un'analisi traiettografica, opportunamente tarata in base alle evidenze osservate sul terreno, secondo un procedimento di tipo Back-analysis, variando i parametri di input fino ad ottenere un risultato concordante con quanto osservato in realtà. In questo modo, anche se con un certo grado di incertezza, si ottiene una definizione realistica dei parametri che regolano il moto dei blocchi. Il modello impiegato permette un approccio statistico al problema della simulazione della caduta massi, che supplisce almeno in parte all'incertezza insita nella determinazione dei parametri.

#### *Metodologia:*

La simulazione ha previsto diversi scenari, considerando anche le potenziali opere di difesa passive allora previste.

I dati di input necessari si riferiscono a volume, forma e distribuzione dei blocchi presenti in sito, a tracce di impatto su alberi, strade, manufatti.

Si procede poi con un rilevamento geomorfologico volto ad individuare le zone di distacco, le caratteristiche (volume, forma, ecc) dei blocchi potenzialmente soggetti a caduta, e quelle del pendio interessato (presenza e tipo di copertura superficiale o roccia, presenza di vegetazione, rugosità..), quest'ultime permettono di determinare i parametri di moto (coefficienti di restituzione normale e tangenziale, angolo di attrito). Ovviamente le dimensioni dei blocchi influenzano il tipo di moto, in particolare in rapporto alla tipologia del terreno lungo cui avviene la caduta. Ad esempio, per un blocco di determinate dimensioni si hanno coefficienti di restituzione energetica elevati (urto elastico) se la caduta avviene su un pendio coperto da detrito di dimensioni maggiori del blocco stesso, e coefficienti minori se l'urto avviene su detrito di piccole dimensioni. Da ogni punto i blocchi partono con velocità e direzioni diverse. In questo caso, considerato che la caduta di blocchi avviene da pareti abbastanza ampie ed articolate, le linee di distacco sono state posizionate alla base delle stesse e nei punti individuati come zone di alimentazione preferenziali, utilizzando un ampio range di velocità iniziali (da 8 a 20 m/s) per tenere conto delle diverse altezze di caduta libera dalle pareti rocciose. L'ultimo ingrediente indispensabile per questo tipo di analisi è una ricostruzione dettagliata della superficie topografica nel modello tramite l'utilizzo del DTM. Una volta inseriti tutti i dati di input, si procede alla simulazione:

In questa fase vengono stimate le energie raggiunte dai blocchi in caduta, il tipo di moto (rimbalzo/rotolamento), le altezze dal suolo raggiunte. Tali parametri sono importanti per definire dimensioni e posizionamento delle opere, che sono implementate nel modello con una determinata resistenza, posizionate, compatibilmente con le caratteristiche topografiche ed esigenze logistiche, nei punti di minore energia e minore altezza di rimbalzo dei blocchi. Quest'ultimi vengono trattati come punti materiali, ottenendo quindi una determinazione dell'energia cinetica in termini di energia per unità di massa ( $v^2/2$ ). L'energia effettiva, necessaria per la determinazione della resistenza delle opere di protezione, viene considerata con l'introduzione della massa degli stessi.

L'efficacia delle opere (in termini di percentuale dei blocchi arrestati) viene verificata simulando lo scendimento di blocchi di diversa volumetria.



### Descrizione dell'analisi:

Le zone di alimentazione sono state localizzate lungo tutta la nicchia di distacco, con maggiore frequenza per il distacco di blocchi di volume di circa  $1 \text{ m}^3$  sul lato sinistro (orografico) della stessa (instabilità 4). Una zona di alimentazione è stata individuata anche in corrispondenza dello sperone disarticolato al margine destro (orografico) della nicchia.

Sulla base di quanto individuato con il rilievo geomeccanico sono state individuate in parete le singole instabilità, ossia i blocchi o le porzioni di ammasso roccioso potenzialmente mobilizzabili.

Le instabilità individuate sono di tipo puntuale (singoli blocchi o porzioni di ammasso roccioso delimitati da discontinuità e potenzialmente mobilizzabili; blocchi in detrito mobilizzabili), e sono già state descritte, così come i cinematismi di distacco, nella relazione di sintesi delle attività di rilevamento geomorfologico, geomeccanico e geostrutturale.

La ricostruzione della superficie topografica è stata eseguita con un procedimento di interpolazione (kriging) applicato ad un set di punti quotati ricavati dal rilievo aerofotogrammetrico della zona di interesse. Quest'ultima è stata distinta in zone differenziate in relazione alle caratteristiche del terreno di copertura. Per ciascuna zona devono essere definiti i seguenti parametri:

- Coefficiente di restituzione normale;
- Coefficiente di restituzione tangenziale;
- Angolo limite.

I primi due parametri definiscono la quantità di energia restituita nell'urto normalmente e parallelamente al pendio; il terzo l'angolo di attrito al rotolamento.

Le tipologie principali di terreni individuate sono:

	Rn	Rt	$\alpha$
<b>Roccia affiorante</b>	0.8	0.8	0.5
<b>Detrito di falda a blocchi medio-piccoli con matrice sabbioso-limosa (nicchia di frana)</b>	0.7 2	0.7 4	0.5
<b>Detrito a blocchi (accumulo)</b>	0.7 6	0.7 2	1.3

All'interno della nicchia è presente detrito eterometrico, ma con dimensioni per lo più inferiori a quelle dei blocchi mobilizzabili, e con una certa frazione di matrice fine limosa o sabbiosa; la presenza di tale materiale comporta un certo assorbimento dell'energia d'urto determinando una riduzione dei coefficienti di restituzione, in particolare di quello normale. Le dimensioni minute del materiale rispetto a quelle dei blocchi in caduta si traducono in un basso angolo di attrito al rotolamento.

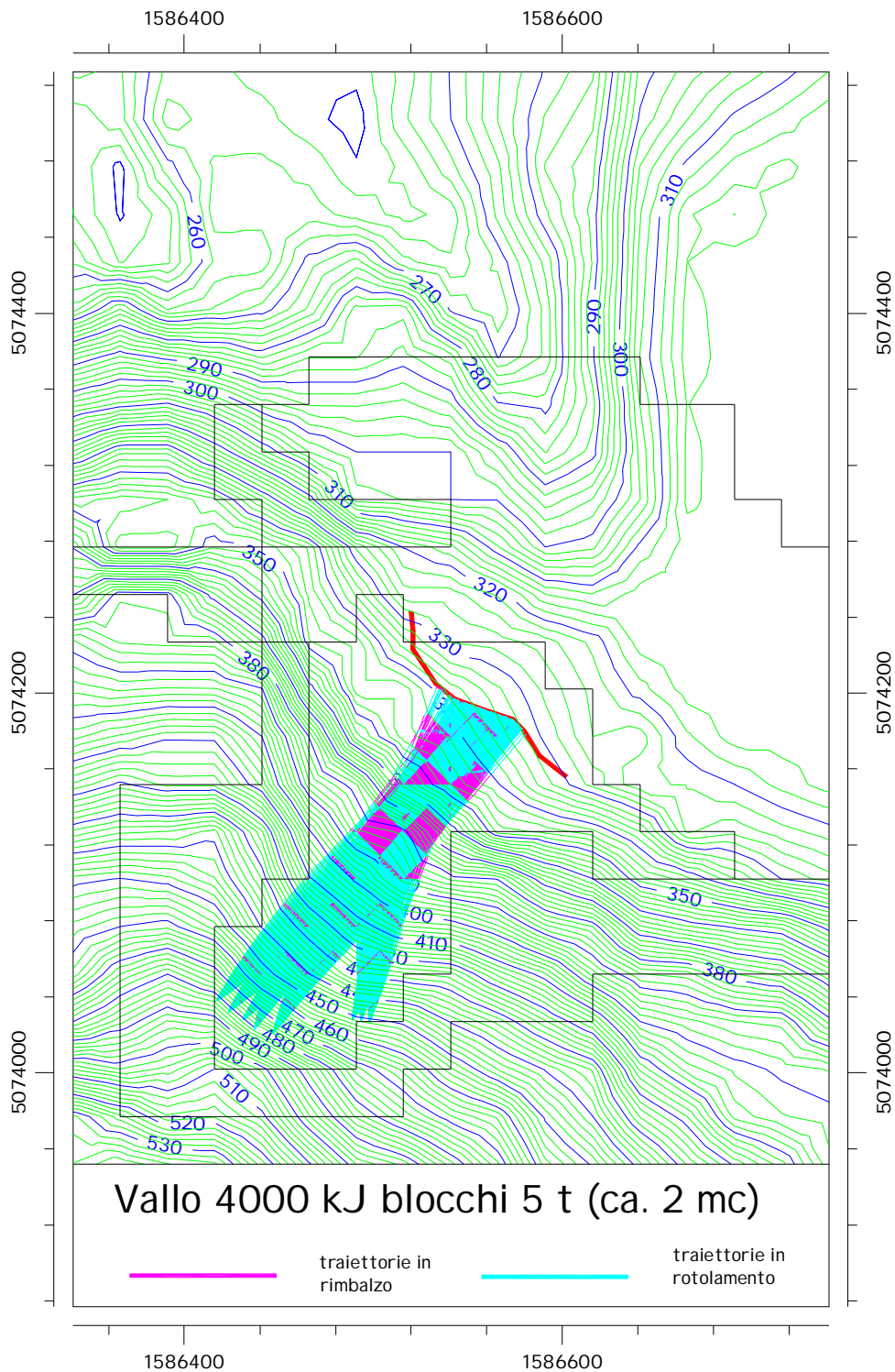
Nella zona di accumulo sono invece presenti blocchi di dimensioni paragonabili a quelle dei massi in caduta o superiori, che determinano un coefficiente di restituzione normale più elevato e una maggiore resistenza al rotolamento.



I parametri sopra descritti sono stati ottenuti supponendo dei parametri iniziali, in base a valori riportati nella letteratura tecnica, e successivamente variandoli fino ad ottenere una distribuzione dei punti di arresto congruente con quanto rilevato sul terreno e osservato durante la caduta di blocchi. In particolare, gli autori riportano che i blocchi (di dimensioni generalmente di  $0.5 \text{ m}^3$  o inferiori) tendono ad arrestarsi alla base della nicchia, sia per la forte diminuzione di pendenza, sia per una diversa risposta all'impatto. Le traiettorie vengono percorse con rimbalzi di altezza limitata e tratti in rotolamento, soprattutto ove è presente una maggiore percentuale di matrice fine.

Vengono nel seguito riportati in forma grafica i risultati delle analisi traiettografiche eseguite simulando la presenza del rilevato e vallo paramassi e omettendo le simulazioni con le altre opere di difesa, dato che la scelta è ricaduta sul primo e questo è già stato realizzato. L'analisi si riferisce a blocchi di 5 tonnellate e la simulazione ha comportato l'analisi di 1000 traiettorie.

E' stata considerata l'ipotesi di difesa con un rilevato rinforzato di altezza pari a 4 m abbinato ad un vallo di profondità pari a 2 m (fronte di altezza totale pari a 6 m), ottenendosi un'opera in grado di resistere ad energie di impatto ampiamente superiori a 4000-5000 kJ. La simulazione ha trascurato, a favore di sicurezza, la presenza della parte in scavo (vallo vero e proprio), modellando l'opera per la sola porzione in rilevato. Vengono riportati i soli risultati relativi alle traiettorie di massi con VRU pari a  $2 \text{ m}^3$  (5 ton di peso), che dimostrano l'ottimo funzionamento dell'opera sotto tutte le condizioni di funzionamento ipotizzate.



## Conclusioni:

**Scenario 1:** *pericolosità molto bassa [incerta]*

### Scenario 2:

Zona a monte della nicchia: *pericolosità media*  
Zona fianco occidentale: *pericolosità bassa*  
Zona fianco orientale: *pericolosità molto bassa[incerta]*  
Speroni isolati: *pericolosità da media a bassa[incerta]*

**Scenario 3:** *pericolosità da media ad elevata*

## Mitigazione del rischio:

Lo STUDIO MAIONE, a seguito delle analisi effettuate, ha proposto, ed in parte realizzato, una serie di interventi di difesa attivi e passivi.

### *Interventi attivi:*

Una prima serie di disgaggi “leggeri” (su volumi tipicamente inferiori al metro cubo), in modo da ottenere lo scoronamento della nicchia di distacco per una lunghezza di circa 400-450 m e per un'altezza di 4-5 m. Analoghe operazioni sono servite ad allontanare (per circa ulteriori 500 m<sup>2</sup> di parete) i blocchi che, oramai completamente svincolati, si erano accumulati sulle cenge, o sulle discontinuità morfologiche in parete.

Disgaggi di volumi sensibilmente maggiori (che coinvolgono cioè spessori di oltre 1 m) sono stati realizzati in parete, allo scopo di eliminare elementi instabili di medie dimensioni.

Tali operazioni, da eseguirsi con martinetti o con microcariche, erano volti all'asportazione degli elementi di maggiore instabilità (soprattutto instabilità 1, 2-4, 3, ecc.). Non sono tuttavia stati realizzati tutti gli interventi previsti (è il caso ad esempio del torrione in roccia sul fianco orientale).

### *Interventi passivi:*

Dati gli esiti delle analisi traiettografiche, la scelta dell'opera di difesa passiva è ricaduta su un sistema composto da un vallo, associato ad un rilevato in terre rinforzate, per un fronte di altezza complessiva pari a 6 m. La resistenza offerta da questo tipo di manufatto è molto più elevata di quella ottenibile con le barriere; nella simulazione è stato ipotizzato un valore di resistenza pari a 4000 kJ che è comunque considerato prudenziale. Come si nota dall'allegata traiettografia il manufatto permette l'arresto nella totalità delle simulazioni effettuate anche con blocchi di massa pari a 5 ton. Il vallo inoltre è stato facilmente realizzato con materiale reperito in loco e proveniente dall'intervento di sistemazione dell'alveo del torrente Trobiolo, che altrimenti avrebbe dovuto essere smaltito in discarica

Il vallo è stato realizzato con paramento a monte inclinato di 60° per evitare l'eventuale superamento del rilevato dovuto al momento rotazionale posseduto dai blocchi. Il paramento di monte potrà quindi essere realizzato in terra rinforzata con geogriglie, sistema che permette anche elevati coefficienti di assorbimento dell'energia.

Il rilevato ha uno sviluppo complessivo di circa 88 m, interessando prevalentemente il settore centrale dell'area in frana. Come già accennato, infatti, a causa della morfologia evidentemente convessa della parte medio alta della nicchia, è possibile ritenere che tutte le traiettorie di caduta, indipendentemente dal punto di distacco, si trovino a convergere entro una fascia di circa 50-60 m di larghezza.

Nella realizzazione, è stata prescritta la compattazione per strati di spessore non superiore a 30 cm, avendo cura di verificare un livello di compattazione pari al 90% dell'ottimo di Proctor mod.

A questo scopo si è ritenuto necessario, per la parte di rilevato rinforzata, procedere ad una preventiva vagliatura del materiale da utilizzare per la terra rinforzata, eliminando i blocchi di dimensioni superiori ai 10 cm.

#### **Piano di monitoraggio:**

Sono stati previsti sistemi di misura delle distanze fra due punti localizzati a cavallo di fratture significative (misure estensimetriche) e sistemi di misura degli spostamenti assoluti di elementi a rischio (misure topografiche).

Come evidenziato dalle analisi di stabilità, di particolare interesse risulta il controllo delle ampiezze di fessurazione dei numerosi sistemi ubicati a monte della nicchia, fino all'innesto del cambio di pendenza che coincide con la rupe di Gasso Alto. Inoltre, sulla porzione sommitale della nicchia di distacco, si è ritenuto opportuno un controllo incrociato da ottenersi con attività di monitoraggio topografico (controllo di mire ottiche).

Analogamente, le trincee morfologiche ed i sistemi di fratturazione ubicati sul fianco occidentale necessitano di controllo in funzione del possibile scivolamento di cunei verso la scarpata di frana. Anche in questo caso, almeno fino a circa quota 400 m s.l.m., le letture estensimetriche sono state integrate e verificate da letture topografiche.

Infine, pur in assenza di fratture e lineazioni, si è ritenuto che sul fianco orientale, fino a circa quota 400 m s.l.m., fosse indispensabile un controllo da effettuarsi con mire ottiche.

Si è ritenuto necessario un periodo di lettura delle condizioni di stabilità del versante per un periodo iniziale di circa 12 mesi, tuttavia le misure estensimetriche nella zona a monte della nicchia sono tutt'ora in atto.

#### **Considerazioni sulle condizioni di rischio residuo:**

A seguito della realizzazione di interventi attivi (demolizioni e disaggi) è possibile riconoscere una diminuzione del rischio attraverso una diretta diminuzione della pericolosità da episodi di franamento di piccola e, occasionalmente, media entità (speroni, torrione di roccia, ecc.).

Inoltre la difesa mediante realizzazione di rilevato e vallo paramassi (per energie di impatto stimabili in 4000÷5000 kJ) ha dimostrato di offrire ottime garanzie di protezione anche nei riguardi della caduta di uno sciame di massi proveniente dalla fratturazione di un volume ipotizzabile fino a diverse migliaia di metri cubi, diminuendo il rischio.

Infine, l'effettuazione del programma di letture topografiche ed estensimetriche potrà consentire di evidenziare livelli di movimento (generalmente stimabili in 0.5÷1 cm/giorno) tali da portare

all'allontanamento ed all'evacuazione di uomini e mezzi, fino al completamento dei necessari accertamenti.

Si ricorda infine che ulteriori valutazioni sulle reali condizioni di pericolosità da franamenti di grandi e medie dimensioni siano più realisticamente effettuabili solo a conclusione del primo ciclo di letture del sistema di monitoraggio.

### **1.1.3 INTERPRETAZIONE GEOLOGICA DEI DATI OTTENUTI DALLA INTERFEROMETRIA DIFFERENZIALE SAR**

L'area interessata dalla presente, è compresa tra quelle analizzate dallo Studio "Interpretazione geologica dei dati ottenuti dall'Interferometria differenziale SAR con la tecnica dei PS (Permanent Scatterers technique) relativamente a fenomeni franosi e di subsidenza". Tale studio, commissionato dalla Provincia di Brescia, Settore Protezione Civile all'università di Pavia, riguarda la zona compresa tra il Lago d'Iseo e il Lago di Garda, compresa la valle Canonica tra Pisogne ed Edolo.

La tecnica d'elaborazione interferometrica dei Permanent Scatterers, da cui sono derivati i dataset PS analizzati, è un recente sviluppo del campo dell'InSAR (Interferometric Sar).

I PS sono diffusori permanenti, corrispondenti ad oggetti già presenti sul terreno, identificati dal satellite grazie a determinate proprietà elettromagnetiche. Il loro monitoraggio fornisce indicazioni circa il moto del punto osservato. Normalmente i PS sono costituiti da edifici, manufatti, massi e blocchi di detrito, per cui la loro densità è funzione dell'uso del suolo e della morfologia del terreno. I PS vengono bersagliati con un'onda elettromagnetica dal satellite, si tratta quindi di un dispositivo attivo, che non necessita di illuminazione solare, e la radiazione emessa è in grado di oltrepassare la copertura nuvolosa, evitando così gli inconvenienti dei sistemi ottici. La stessa orbita nominale viene ripercorsa ogni 35 giorni, garantendo una frequenza d'aggiornamento mensile del dato.

Combinando opportunamente i parametri di fase dei dati acquisiti in istanti diversi, il sistema, utilizzando una lunghezza d'onda di 5.66 cm, è in grado di apprezzare valori di spostamento molto dettagliati, millimetrici. Il termine di fase è dato dalla riflettività del bersaglio, da un contributo dovuto all'atmosfera, dalla distanza sorgente – bersaglio e da un fattore che implementa il rumore proprio del sistema d'acquisizione. L'obiettivo della tecnica è isolare le variazioni di fase dovute all'effettivo spostamento del bersaglio.

Il problema del disturbo atmosferico, è superato esaminando una lunga serie d'osservazioni multi temporali, stimandone l'entità e rimuovendolo, mentre, a meno di variazioni, i contributi dovuti alla riflettività ed al rumore si elidono.

La tecnica presenta limitazioni dovute a fattori geometrici del sistema d'acquisizione, risulta impossibile disporre di dati su versanti che risultano nascosti alla vista del satellite, oppure una pendenza tale da determinare la sovrapposizione dei segnali di risposta a terra e quindi una non corretta interpretazione del segnale. A queste problematiche si ovvia almeno in parte combinando i dati acquisiti con orbita ascendente a quelli con orbita discendente, in quanto con due geometrie d'acquisizione è possibile illuminare anche i bersagli non visibili da una prospettiva. Con questo espediente si è inoltre in grado di definire l'orientazione del valore di velocità.

Bisogna infatti ricordare che tutte le misure di spostamento sono effettuate sulla congiungente bersaglio-sensore, si tratta quindi, a meno di casi fortunati, di componenti dei vettori di spostamento.

Altri limiti sono dovuti a variazioni delle proprietà elettromagnetiche del bersaglio (ad esempio in aree soggette ad innevamento), oppure ad entità di spostamento troppo elevate (maggiori di 20 cm/a).

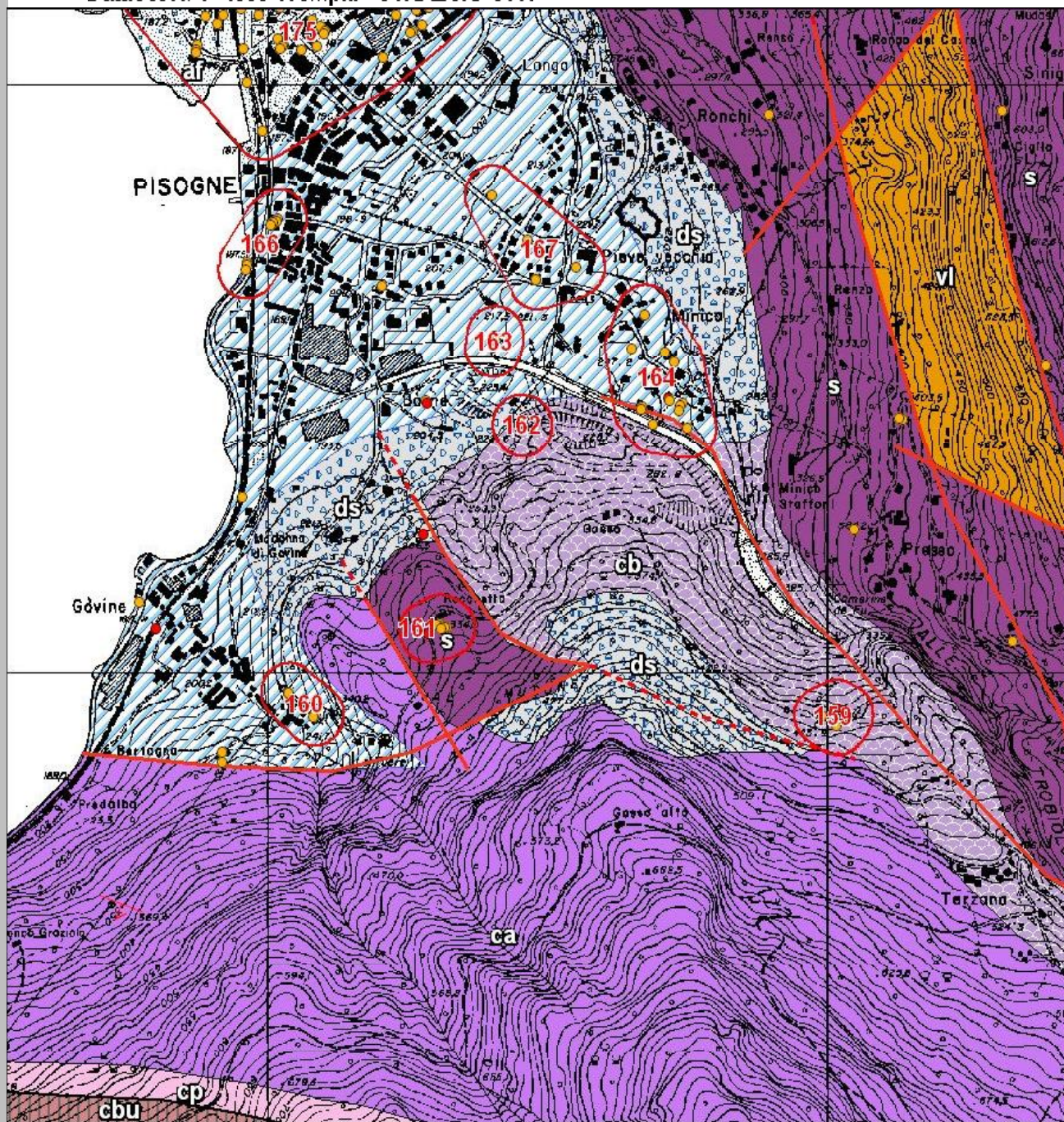
Dalla combinazione di tutti i PS riconosciuti, ci si trova a disporre di una sorta di rete geodetica di punti, simile ad una rete GPS, per i quali esiste già una banca dati, nel caso dei satelliti ESA, dal 1992 al 2001. Si tratta quindi di dati già disponibili, nel caso nell'area di interesse siano ovviamente presenti un numero sufficiente di PS.

Nella presente analisi è stato utilizzato il DataSet1 dello studio sopra citato, in particolare i dati relativi all'area critica n°159, ubicata sul fianco orientale, al margine della zona in frana. I PS sono materializzati su massi o affioramenti rocciosi di carniola di Bovegno, e le misurazioni afferiscono al decennio precedente il collasso del versante. I 4.56 mm/a rilevati rappresentano dunque movimenti precursori precedenti all'evento principale, e confermano inoltre l'attività del dissesto anche all'esterno della nicchia attuale.

Di seguito si riportano i dati relativi all'area critica n.159 della Frana del Gasso.



**DataSet N. 1 - Iseo Trompia - STRALCIO CTR**



**DATI IDENTIFICATIVI AREE CRITICHE**

Cod.	Comune	Località	Posizione Topograf.-Geomorfologica
159	Pisogne	/	Versante
160	Pisogne	Gov ne (ovest)	Versante
161	Pisogne	Rocchetta	Spalla / terrazzo glaciale
162	Pisogne	Barne	Conoide / Versante
163	Pisogne	Barne (est)	Conoide
164	Pisogne	Minico	Conoide
166	Pisogne	Pisogne lago	Conoide / Sponda lacustre
167	Pisogne	Pieve Vecchia	Conoide



**DataSet N. 1 - Iseo Trompia - VERIFICA TERRENO / FOTO AEREA**

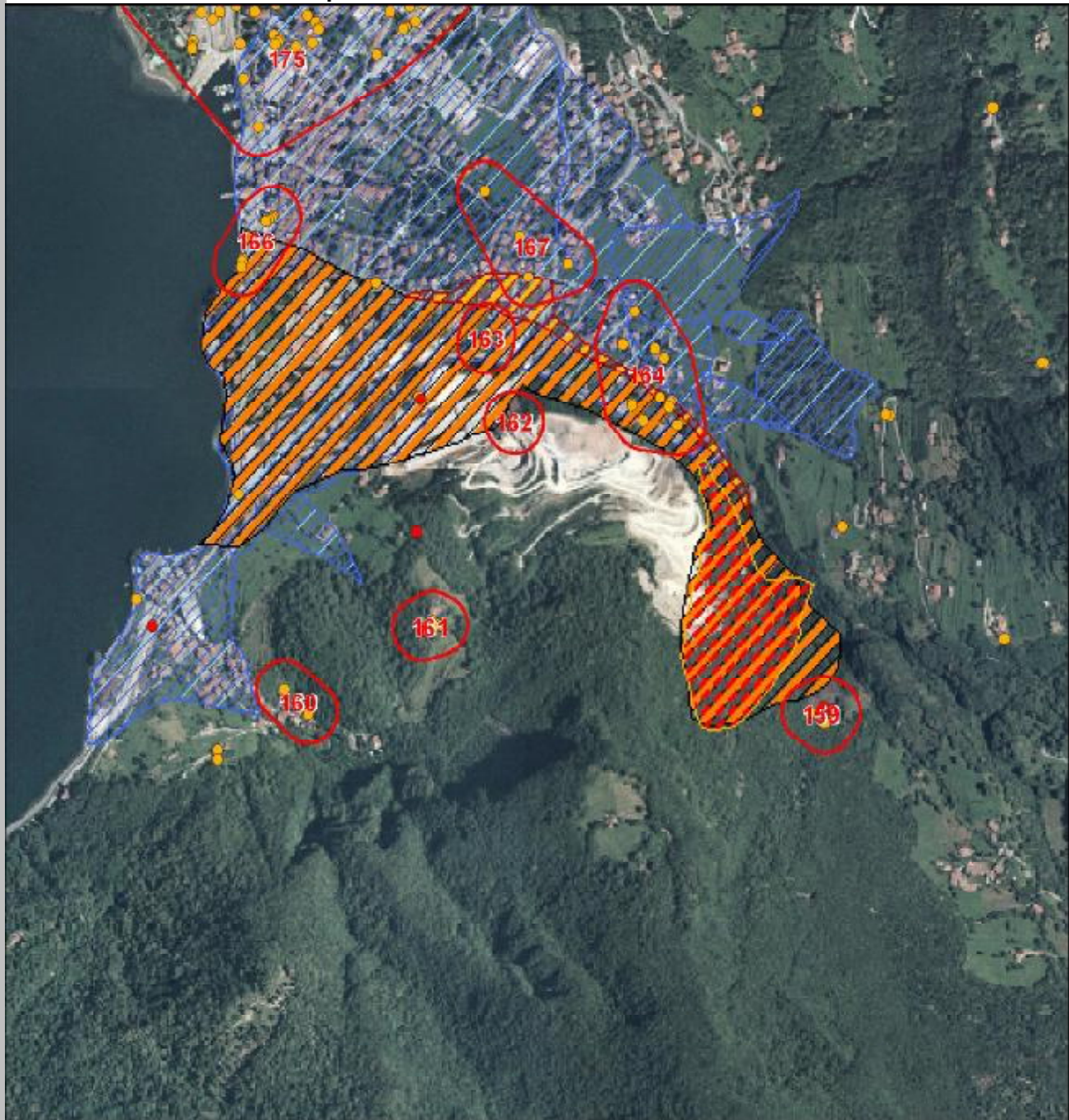
<b>Cod. A.</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Verifica</b>	
159	N. 5 PS critici situati su affioramenti rocciosi, situati al margine del fianco destro di una frana attivatasi nel 2001 - 2002 (al termine del periodo di rilevamento satellitare). Velocità di abbassamento media pari a -4,56 mm/anno.	T	
160	N. 3 PS critici situati su edifici rurali - residenziali. Velocità di abbassamento media pari a -2,55 mm/anno.		F
161	N. 8 PS critici situati su edificio rurale. Velocità di abbassamento media pari a -3,60 mm/anno.		F
162	N. 3 PS critici situati su edifici annessi a capannoni industriali. Velocità di abbassamento media pari a -5,10 mm/anno.	T	
163	N. 4 PS critici situati di dubbia localizzazione (probabili muri di cinta). Velocità di abbassamento media pari a -3,60 mm/anno (minimi di -4,50).	T	
164	N. 13 PS critici situati su edifici residenziali e uno su opera di difesa spondale. Velocità di abbassamento media pari a -3,61 mm/anno (minimi di -6,30).	T	
166	N. 7 PS critici di cui 4 situati su edificio residenziale e 3 sulla sede stradale costeggiante la sponda del lago. Velocità di abbassamento media pari a -2,21 mm/anno.	T	
167	N. 4 PS critici situati su edifici residenziali. Velocità di abbassamento media pari a -2,60 mm/anno.		F

T = verifica di terreno; F = verifica da fotografia aerea

**OSSERVAZIONI E COMMENTI**

Le aree critiche 162, 163, e 164 sono situate nella zona di transizione tra il versante ed i depositi fluvio-torrentizi (conoide) aventi come substrato la formazione della Carniola di Bovegno, con gessi, affiorante nei dintorni dell'area critica stessa. Litotipi gessosi sono stati intercettati anche durante i lavori di scavo della galleria della nuova strada di collegamento, poco a sud di Pisogne. L'area critica 159 è situata al margine di una frana attivata nel 2001 - 2002. E' significativo rilevare come i PS di queste aree critiche abbiano velocità di movimento relativamente elevata.

**DataSet N. 1 - Iseo Trompia - STRALCIO ORTOFOTO REGIONE LOMBARDIA**



**LEGENDA**

● PS con velocità minori di -5 mm/anno	<b>Frane attive</b>	Frana Quiescente
● PS con velocità comprese tra -5 e -2 mm/anno	Crollo - Ribaltamento	Frana Inattiva
□ Area critica con relativo numero identificativo	Sviluppo Rotazionale - Traslativo	□ Deformazione gravitativa profonda di versante
● Pozzo Idrico	Colamento lento	Conoide
● Dolina	Colamento rapido	Aree con materiali di riporto eterogenei
Discarica di materiali inerti	Complesso	Terreno con caratteristiche geotecniche scadenti
Discarica di prodotti speciali	Non classificato	<b>Zone a pericolosità idrogeologica molto elevata</b>
Cava inattiva o abbandonata	Frana attiva con estensione limitata	H4 - H3
Discarica	Crollo di scarpata di degradazione e/o di frana attiva	H2 - H1
Area soggetta ad intensa circolazione idrica superficiale	Area soggetta a crolli di massi	
Area di ristagno idrico	Area interessata dalla presenza di grotte carsiche	





Foto 49 - AREA CRITICA N. 159. Il cerchio in colore evidenzia l'ubicazione dei PS. La loro localizzazione puntuale è incerta; tuttavia, essendo localmente presenti affioramenti rocciosi (Carniola di Bovegno), è presumibile che i PS si fossero materializzati su massi o affioramenti rocciosi. Il periodo di rilevamento satellitare corrisponde al decennio precedente l'innescò della frana. Pertanto, è probabile che i movimenti segnalati dai PS fossero, in questo caso (unico nell'ambito della ricerca effettuata), "precursori" del movimento di versante che portò al collasso della frana nel 2001 - 2002.



Foto 50 - AREA CRITICA N. 159. La zona immediatamente a monte del coronamento della frana presenta chiare ondulazioni che generano avvallamenti paralleli al versante, interpretabili come strutture di allentamento del versante ancora in posto. La linea tratteggiata in colore evidenzia la possibile zona di allentamento.

CODICE AREA CRITICA: 159

**CAUSA DEL MOVIMENTO:**

- Strutturale**
- Problema di interazione puntuale "terreno di fondazione - struttura"**
- Geologia I.s.**
- Indeterminata**

**Geologia I.s.**

- Subsidenza naturale per addensamento o consolidazione di terreni recenti sottoconsolidati**
- Subsidenza indotta da grandi insediamenti residenziali o industriali su terreni recenti sottoconsolidati**
- Subsidenza naturale connessa a probabili cavità sotterranee**
- Subsidenza indotta da estrazione di fluidi dal sottosuolo**
- Movimenti di versante "superficiali" ( $\leq 2$  m)**
- Movimenti di versante "profondi"**

**ATTENDIBILITA':**

- Certa**
- Probabile**
- Presunta**

**OSSERVAZIONI E COMMENTI**

In questa zona, tenuto conto della presenza dell'abitato all'apice del conoide, sarebbero utili i degli approfondimenti conoscitivi in grado di delineare la possibile dinamica evolutiva, eventualmente integrati con una campagna di monitoraggio.

## 1.1.4 ANALISI STORICA EVENTI IN DISSESTO

Vengono di seguito elencate le notizie storiche di dissesti avvenuti nella valle del Trobiolo.

### Gennaio 1618:

*“Nel principio di quest’anno s’apre una montagna a Pisogne in Val Camonica, con grandissima rovina d’acque che alterano molti edifici e fucine, con danno notabilissimo”*

Fonte: Bianchi, in Guerrini 1930.

Nel libro “Levandosi i fiumi sopra le rive”, di Giuseppe Berruti la notizia è riportata con dei dubbi circa l’esatta ubicazione spaziale.

### 14-15 Agosto 1850:

*“In valle Camonica il torrente Trobiolo e le “valli della Rovina” nonché la valle di Gratacasolo registrano una piena determinata da violente piogge. A Gratacasolo, in particolare, risultano lesionate alcune abitazioni. A Pisogne danni a case e coltivi.”*

Fonti: Rizzi 1870: 119 e 203; “Il camuno”: 1.10.1882; Cozzaglio 1895: 32.

### 26-27-28 Novembre 1850:

*“Vengono contemporaneamente interessati da esondazioni di corsi d’acqua locali ed inondazioni gli abitati di Pisogne (n’è responsabile il torrente Trobiolo) e Gratacasolo”*

Fonti: Rizzi 1870: 119; “Il Camuno”, 1.10.1882, Cozzaglio 1895.



### 9 Luglio 1953:

*“Il 9 Luglio 1953 si abbatteva su Pisogne un furioso nubifragio. Il torrente Trobiolo gonfiatosi paurosamente usciva dagli argini travolgendo i baraccamenti della miniera di Fusio ed alcune abitazioni in località Borne, inondando poi gran parte del paese. Il triste bilancio dell’alluvione fu di undici vittime non più ritrovate.”*

*“Il piccolo ed inadatto vaso del torrente Trobiolo non riuscì a contenere l’eccezionale piena che travolse e seppellì di fango e detriti le località Borne e Capovilla. I ponti della strada e della ferrovia furono travolti dalla furia delle acque.”*

Fonte: Pisogne, un secolo di immagini, un secolo di storia. Aldo Deruti.

**Figura 11 Foto aerea dell'evento alluvionale del 1953**

### 21 Settembre 1960:

*“Nelle prime ore del giorno è crollata in località Borne, una parte della vecchia arginatura del Trobiolo che scende dall’omonima valle a monte del paese. Volontari locali sono riusciti a tamponare la falla con gabbioni e sacchi.”*

Fonte: La lunga alluvione (1960) cronaca e storia dopo trent’anni. Giacomo Sebastiano Pedersoli.

## **1.1.5 BACINO TROBIOLO**

L’area indagata è caratterizzato dalla presenza di un discreto reticolo idrografico superficiale costituito dal Torrente Trobiolo e dai suoi affluenti. Il Torrente Trobiolo nasce in prossimità del Dosso Scodellaro e termina nel Lago di Iseo, in corrispondenza del centro abitato di Pisogne. Il corso d’acqua ha uno sviluppo complessivo di circa 6 km in direzione nord-ovest.

Il primo tratto, in cui si hanno le principali immissioni, prende il nome di Torrente Muraccone. In particolare, in sinistra idrografica si sviluppano la Valle di Novaione e la Valle di Nisdre, mentre in destra idrografica si immette nel corso il Vallone dell’Insero e la valle delle Campane.

Il bacino del torrente ha un’estensione complessiva pari a circa 10 km<sup>2</sup>; la sua quota massima è pari a 1800 m s.l.m. (Punta Caravina, mentre alla confluenza nel lago la quota è pari a 190 m s.l.m.

Nel tratto montano il reticolo idrografico del bacino è caratterizzato da forti pendenze (dell’ordine del 20%, mentre nella zona terminale la pendenza media è prossima all’11%.

Di seguito si riportano le descrizioni degli studi del Bacino del Torrente Trobiolo eseguiti dal Comune di Pisogne per la definizione del Reticolo Idrico Minore e dalla Regione Lombardia nell’ambito del Sistema Informativo dei Bacini e dei Corsi d’Acqua.

Lo **Studio di Caratterizzazione Idrologica** a supporto dell’Elaborato Tecnico relativo al Reticolo Idrico Minore e relative Fasce di rispetto (ai sensi D.G.R. n.7/7868 del 25-01-2002 e n.7/13950 del 01-08-2003), a firma del Dott. Ing. Pier Giuseppe Fenaroli, contiene un’analisi idrologica relativa al Bacino del Torrente Trobiolo.

Il primo punto analizzato dallo studio sopracitato riguarda la Caratterizzazione Pluviografica del territorio Comunale di Pisogne. Tale caratterizzazione è stata eseguita a partire dall’elaborazione diretta dei dati storici relativi alle stazioni di Memmo, Dezzo-Vilminore, Breno e Bessimo e a partire dall’analisi di alcuni studi “Regionali” allora disponibili.

Andando a considerare la sostanziale concordanza tra i vari risultati forniti dalle varie metodologie appena descritte si è proceduto alla scelta delle curve di possibilità pluviometrica di progetto, scegliendo le curve di progetto derivanti dalle analisi dirette e considerando la media tra Memmo, Breno, Dezzo/Vilminore. Inoltre si è introdotto un fattore correttivo del coefficiente n per durate di pioggia inferiori all’ora.

Le curve di progetto utilizzate per il calcolo della portata, suddivise per diversi tempi di ritorno T, sono così riassunte:

**Curve probabilità pluviometriche di progetto:**

		<b><u>Per durate &lt; 1h</u></b>	<b><u>Per durate &gt; 1h</u></b>
T=	2 anni	$h = 21.764 \text{ t}^{0.500}$	$h = 21.764 \text{ t}^{0.4254}$
T=	20 anni	$h = 37.436 \text{ t}^{0.500}$	$h = 37.436 \text{ t}^{0.4211}$
T=	50 anni	$h = 43.042 \text{ t}^{0.500}$	$h = 43.042 \text{ t}^{0.4203}$
T=	100 anni	$h = 47.243 \text{ t}^{0.500}$	$h = 47.243 \text{ t}^{0.4199}$
T=	200 anni	$h = 56.949 \text{ t}^{0.500}$	$h = 56.949 \text{ t}^{0.4191}$
T=	500 anni	$h = 61.121 \text{ t}^{0.500}$	$h = 61.121 \text{ t}^{0.4188}$

Il passo successivo è stato quello di valutare l'Analisi Morfologica e il Calcolo del Tempo di Corrivazione del Bacino del Trobiolo, inteso come il tempo impiegato dall'acqua per giungere alla sezione di chiusura secondo il percorso idraulicamente più lungo. Una volta noti i parametri caratteristici del Bacino quali superficie in Km<sup>2</sup>, lunghezza dell'asta principale in Km e altitudine media rispetto alla sezione di chiusura si è proceduto al calcolo del Tempo di Corrivazione impiegando la Formula di Giandotti:

$$t_c = (4 S^{0.5} + 1.5 L) / 0.8 H^{0.5} \text{ ore}$$

dove :

- S = superficie del bacino in Km<sup>2</sup>,
- L = lunghezza dell'asta principale in km,
- H = altitudine media del bacino rispetto alla sezione di chiusura in metri.

Lo Studio di Caratterizzazione Idrologica si concretizza così nella Stima delle Portate di Piena del Torrente del Trobiolo, stima condotta considerando un confronto tra i valori risultanti dall'utilizzo di:

- Metodi empirici (formule di Gherardelli-Marchetti, Mongiardini e Forti);
- Formule che tengono conto della pluviometria (formula "razionale");
- Ricostruzione di idrogrammi di piena mediante il modello di corrivazione.

I risultati di portata ottenuti dal presente studio per la sezione di chiusura Q2 posta alla quota di 270 m s.l.m. sono così riassunti:

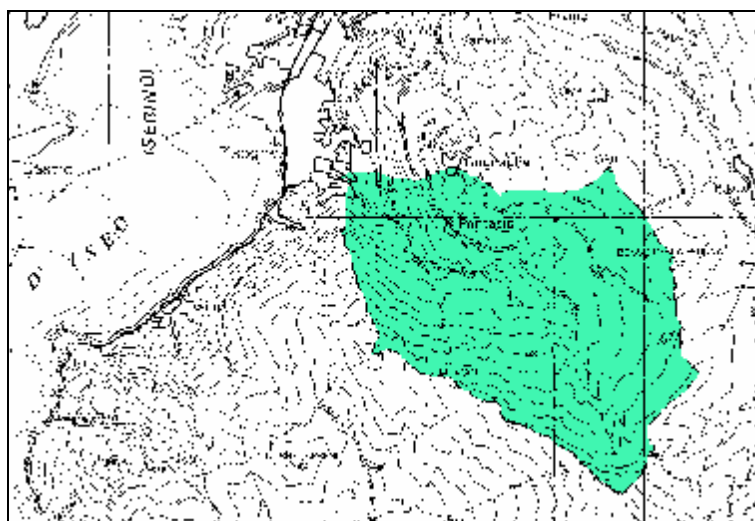
<b>TEMPO DI RITORNO</b>	<b>VALORE DI PORTATA</b>
2	31.40
20	54.01
50	62.10
100	68.16
200	82.17
500	88.19



Altri dati di carattere idrologico sul torrente Trobiolo sono stati reperiti dal **Sistema Informativo dei Bacini e dei Corsi d'acqua** (SIBCA) della Regione Lombardia. Il Sistema Informativo si prefigge di creare un approccio per la definizione di scenari di rischio idrogeologico all'interno di bacini idrografici alpini e allo sbocco dei corsi d'acqua sui conoidi. Lo scopo finale è quello di calcolare in modo semi-automatico la massima portata liquida e la magnitudo di un bacino idrografico costruito partendo da un punto qualunque del reticolo idrografico, scelto dall'utente.

Di seguito si riportano in forma tabellare i dati messi a disposizione dalla Regione Lombardia per il Bacino del Torrente Trobiolo.

<b>Elaborazioni SIBCA</b>	
<b>NOME BACINO</b>	Torrente Trobiolo
<b>Qc (Tr 50 anni) (mc/s)</b>	26.25
<b>Qc (Tr 100 anni) (mc/s)</b>	28.71
<b>MAGNITUDO (Metodo Bottino) (mc)</b>	39469
<b>MAGNITUDO (Metodo Ceriani) (mc)</b>	74555
<b>MAGNITUDO (Metodo Bianco) (mc)</b>	122874
<b>COEFFICIENTE DI DEFLUSSO</b>	0.36
<b>TEMPO DI CORRIVAZIONE (ore)</b>	0.91
<b>PENDENZA MEDIA ASTA (m/m)</b>	0.26
<b>PENDENZA MEDIA DEL BACINO (m/m)</b>	0.59
<b>AREA PLANIMETRICA (Kmq)</b>	9.14
<b>INDICE DI MELTON</b>	0.53
<b>QUOTA MEDIA DEL BACINO (m s.l.m.)</b>	1007.72

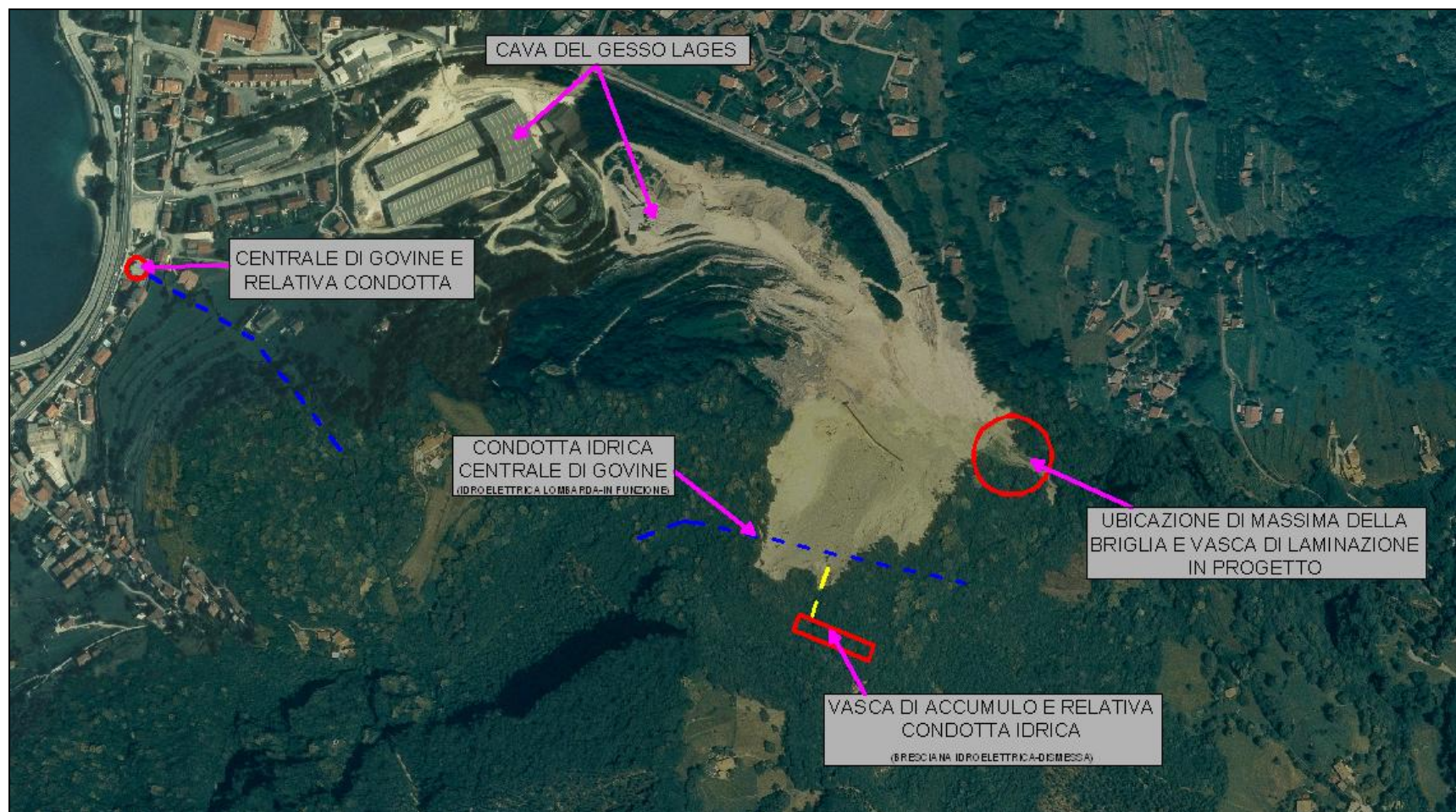


**Figura 12 Definizione del Bacino del Torrente Trobiolo (SIBCA)**

## 1.2 ATTIVITA' ANTROPICHE

Per quel che riguarda le attività antropiche sviluppatasi nell'ambito della Val Trobiolo, ed in particolare dell'area in frana, possiamo ricordare:

- Le attività legate alle coltivazioni minerarie: nella formazione litostratigrafica del Servino sono presenti livelli e banchi mineralizzati a siderite che sono stati coltivati fino ad una trentina d'anni fa. Nei pressi del franamento era attivo il cantiere Fusio e nell'area circostante a questo erano stati eseguiti diversi saggi di escavazione per rinvenire altri livelli mineralizzati.
- La cava del gesso LAGES: in questa cava di gesso viene coltivata una lente evaporitica della Carniola di Bovegno situata nei pressi della località Gasso Basso. Da segnalare che parte dei fronti di cava sono stati coinvolti dal franamento (versante destro della frana).
- Condotta idrica Centrale di Govine: nei pressi del vecchio cantiere di Fusio l'acqua del Trobiolo è raccolta in una condotta che si dirige verso ovest alle spalle del pendio di frana. Le acque canalizzate vengono poi accumulate in una vasca di raccolta presente all'interno del versante alle spalle dell'abitato di Govine. Le acque, tramite una condotta forzata, alimentano la centrale idroelettrica Elettra GLL (Gruppo Lucchini). Il canale di derivazione del torrente Trobiolo è lungo 1050 metri. Il tracciato della condotta attraversa in profondità (non è stato possibile raccogliere informazioni precise circa la sua collocazione) il versante in frana;
- Vasca d'accumulo: nei pressi del coronamento della frana è presente il rudere di un camerone d'accumulo per l'acqua. L'acqua era raccolta nell'alveo del Trobiolo nei pressi di Terzana e giungeva alla vasca tramite una condotta. Oltre all'acqua del Trobiolo sembrerebbe che nella vasca d'accumulo fosse captata anche l'acqua del versante. Da questa vasca l'acqua accumulata scendeva il versante all'interno di una condotta (attualmente smantellata) che passando per l'area del pendio di frana giungeva ad una centralina della Bresciana (ente fornitore dell'energia elettrica prima della nascita dell'ENEL) posta alle spalle dell'abitato di Pisogne. La quantità d'acqua convogliata nel corpo della frana è difficilmente stimabile; di fatto il rilevamento ha evidenziato la presenza di un'asta torrentizia incisa recentemente, che si origina dal rudere della vasca (495 m s.l.m.), percorre un tratto di 70-80 m e che raggiunge la nicchia a circa 450 m s.l.m. bordando il pinnacolo isolato (463.7 m s.l.m.).
- Briglia e Vasca di laminazione: progetto in fase di realizzazione di una nuova briglia e relativa vasca di laminazione.



**Figura 13 Schema riassuntivo delle attività antropiche nella zona della frana del Gasso**



### **1.3 RILIEVI E SOPRALLUOGHI**

Al fine di acquisire nuovi elementi di valutazione, indispensabili per prevedere l'evoluzione spaziale del dissesto, e allo scopo di approfondire gli aspetti geomeccanici, determinanti per la comprensione del fenomeno, si sono effettuati numerosi sopralluoghi.

I rilievi si sono concentrati sul fianco orientale della frana, nella zona a monte della nicchia e in corrispondenza della parete di Gasso Alto, dove risultano meglio visibili le diverse famiglie di discontinuità presenti.

Un primo aspetto emerso già dai primi rilievi è stata la presenza di fessurazioni recenti (non riscontrate durante i sopralluoghi effettuati per gli studi precedenti) che delimitano un'ampia area instabile collocata sul fianco orientale.

Analogamente, già le prime misurazioni effettuate sulle discontinuità hanno evidenziato una buona rispondenza con i dati geomeccanici disponibili, mentre i sopralluoghi effettuati presso la rupe di Gasso Alto hanno permesso di estendere l'area per la quale sono disponibili i dati fino alla quota di 550 m, rilevando una buona costanza nell'orientazione e nella persistenza delle discontinuità, nonché piccoli dissesti posti in corrispondenza degli impluvi che si sviluppano a monte della nicchia principale. Le ispezioni sul corpo frana hanno messo in luce sia il continuo verificarsi di piccoli fenomeni di crollo dalla zona di nicchia, sia aspetti più preoccupanti, come un notevole ristagno d'acqua nel vallo posto a monte del rilevato paramassi realizzato a protezione dell'area sottostante, o il progressivo diminuire dell'altezza di quest'ultimo, dato il notevole accumulo di detrito sviluppatosi in poco tempo a monte dello stesso.

L'osservazione delle dinamiche erosive nella porzione orientale dell'accumulo di frana, marcatamente presenti limitatamente al di sotto di una determinata quota, ha sollevato l'ipotesi di un ruolo determinante della condotta presente nel versante nell'innescò del fenomeno franoso.

### **1.4 ASPETTI GEOLOGICI**

Il territorio della provincia di Brescia può essere schematicamente suddiviso in due fasce distinte sia geograficamente che geologicamente e separate dalla Linea Insubrica che decorre approssimativamente con direzione E-W:

Il Dominio Austroalpino a nord ed Il Dominio Alpi Meridionali a sud.

L'area indagata, ricade completamente nel secondo settore, nel quale rientrano la maggior parte delle Prealpi Bresciane. Questa zona presenta i caratteri salienti del Sudalpino, sia per quanto riguarda la successione stratigrafica che, per l'assetto strutturale.

In questa fascia le rocce sedimentarie prevalgono su quelle cristalline e permettono di comprendere l'evoluzione dei bacini di sedimentazione dal Permiano, rappresentato dalla facies del Verrucano Lombardo (localmente definito come Formazione di M. Mignolo), fino ai depositi morenici quaternari. La fine del Permiano e l'inizio del Trias è oggi testimoniato dai depositi arenaceo marnosi del Servino; solo più tardi, si sviluppò un ciclo sedimentario marino in cui i depositi terrigeni - carbonatici sostituirono quelli continentali.

In particolar modo nel comprensorio studiato sono presenti diverse litofacies che ben testimoniano l'esistenza di una piattaforma carbonatica di età Triassica che caratterizza il versante nord-orientale del lago d'Iseo. La trasgressione marina non fu repentina, ciò è evidenziato dalla presenza di depositi tipici di ambienti di transizione come quelli appartenenti alla formazione nota con il nome di Carniola di Bovegno. Questa formazione è costituita da brecce e rocce carbonatiche cariate di colore ocraceo inglobanti lenti, di discrete dimensioni, di gesso e anidriti. Il comprensorio estrattivo e i limiti del dissesto ricadono in prevalenza nell'area occupata dalla Carniola di Bovegno. Spostandosi verso sud si sale verso il tetto della successione, in cui i sedimenti carbonatici diventano dominanti e originano imponenti scogliere calcaree costituite dalle seguenti formazioni: Calcarea di Angolo, Calcarea di Prezzo e Calcarea di Esino.

Nell'area in questione non affiorano depositi Giurassici, né Cretacei.

Durante il Quaternario buona parte dell'area Sebina è stata interessata da processi glaciali testimoniati oggi dagli abbondanti depositi morenici presenti. Depositati ben visibili sull'orlo superiore della frana e nei detriti dell'accumulo creatosi a fondovalle.

Proprio i depositi glaciali, insieme ai depositi alluvionali, colluviali ed eluviali, hanno contribuito in modo rilevante a caratterizzare la morfologia camuna.

Limitatamente all'area studiata i depositi morenici sono presenti costantemente lungo le sponde del t. Trobiolo oltre ad occupare sparse aree di modeste dimensioni. Questi depositi sono costituiti da elementi lapidei di natura poligenica, di dimensioni eterogenee e di aspetto generalmente caotico tipico dei depositi glaciali.

I depositi alluvionali occupano l'area antropizzata del Comune di Pisogne in corrispondenza dello sbocco del Fiume Oglio nel lago, sono costituiti da lenti di materiale a granulometria variabile, da ghiaiosa fino a limosa.

I depositi eluviali, di falda, si rinvengono presso le fasce basali dei pendii e si presentano come clasti eterometrici e spigolosi.

Inquadramento strutturale.

L'assetto strutturale è piuttosto complesso ed è dovuto alla sovrapposizione di due distinte fasi orogenetiche, quella ercinica e quella alpina. L'assetto strutturale generale delle successioni pre-quaternarie è caratterizzato da diverse superfici tettoniche con vergenza S e SE. Oltre a tali principali strutture ne esistono diverse di limitata estensione che suddividono ulteriormente gli ammassi rocciosi. Il territorio studiato è caratterizzato strutturalmente da una serie di faglie chilometriche subverticali ad andamento NW-SE, in particolare, l'area occupata dai gessi è delimitata a nord dalle alluvioni del t. Trobiolo; sia ad est che ad ovest da due faglie parallele subverticali con direzione NW-SE; a sud il limite con la Formazione del calcarea di Angolo è coperto da abbondanti depositi detritici.

## **Rilevamento di dettaglio dell'area in frana:**

### *Substrato roccioso:*

Le unità litostratigrafiche presenti appartengono alla Formazione di Angolo (Anisico medio-inferiore) e alla Carniola di Bovegno (Scitico superiore).

La prima costituisce le pareti subverticali e parte della nicchia di frana, fino alla quota di circa 450 m s.l.m. Si tratta di calcari nodulari nerastri con giunti pelitici, ben stratificati con spessore medio di qualche decimetro fino a metrico. La geometria degli strati mostra mediamente un'immersione  $220^{\circ}\text{N}$  inclinati di  $20^{\circ}$  ("a reggipoggio") dando luogo alla morfologia rupestre prima descritta.

La seconda costituisce invece il resto del versante fino al fondovalle, si tratta di Calcari dolomitici vacuolari, brecciati con lenti di anidriti e gessi; questi rappresentano la facies maggiormente presente nell'area della frana. La geometria degli strati è in questo caso un po' più complessa, data la natura litologica dell'unità e il conseguente comportamento reologico, di tipo plastico; comunque le giaciture misurate all'esterno dell'area in frana risultano mediamente intorno a circa  $270^{\circ}\text{N}$  con inclinazione di  $30^{\circ}$ .

Le due unità sono in continuità stratigrafica, anche se non è esclusa una successiva deformazione tettonica del contatto stratigrafico (q. 450 m s.l.m.).

### *Depositi superficiali:*

Tali unità comprendono depositi di versante e depositi glaciali.

I primi occupano una fascia in gran parte colonizzata dalla vegetazione (bosco), compresa tra quota 550-500 m s.l.m., e sono in relazione con la degradazione di versante.

I secondi s'individuano all'esterno dell'area in frana, in particolare occupano l'area, in sinistra idrografica compresa da quota 440-360 m s.l.m. Non era da escludere la loro continuità laterale anche nella zona interessata da frana. Essi presentano la classica eterogeneità granulometrica e tessiturale, con ciottoli arrotondati o sub-angolari.

### *Lineamenti strutturali dell'area in frana:*

Come già anticipato, i motivi strutturali principali sono dati da faglie, che disarticolano le unità litostratigrafiche triassiche precedentemente descritte, lungo direzioni orientate circa WNW/ESE. In particolare la contropendenza individuata tra la parete subverticale e la nicchia di frana, a quota 530 m s.l.m., è controllata in parte da una faglia, che in una prima analisi mostra una cinematica trascorrente destra ( $20^{\circ}\text{N}62^{\circ}$ ). Inoltre nell'area di frana, sono presenti, in sinistra idrografica a quota 360 m s.l.m. superfici di movimento (specchi di faglia) con indicatori cinematici (strie di movimento) orientati  $55^{\circ}\text{N}45^{\circ}$  ("a franapoggio").

Al di fuori dell'area di frana in senso stretto sono presenti altre strutture fragili, si tratta di fratture con apertura fino a 10 cm, con direzioni medie N-NE/S-SW, ad alto angolo di inclinazione tra  $70-85^{\circ}$ . L'orientazione di queste fratture risulta pertanto sub-parallela alla direzione di movimento della frana.

Si accenna infine alla presenza di "torrioni di roccia", ubicati sulla parete subverticale che prosegue in direzione NW-SE (quota 550 m s.l.m.), isolati da lineamenti fragili che hanno la medesima orientazione.



### **Dinamica dei versanti e tipologia dei dissesti:**

Il bacino del Torrente Trobiolo è stato in passato interessato da eventi alluvionali, oltre che da franamenti sviluppatisi lungo le vallette secondarie presenti nel bacino.

Particolare importanza ha la dinamica del versante di Gasso Alto. In quest'area, che si sviluppa a W di un lineamento Malga Aguina – Terzana, affiorano litotipi riferibili alla formazione del Servino, della Carniola di Bovegno e del Calcare di Angolo; la stratificazione presenta una giacitura con immersione preferenziale verso W-SW e con un'inclinazione di circa 30°.

I lineamenti strutturali principali possono essere riferiti alla faglia del Vallone Inse, diretta NNW-SSE, a componente destra e al sistema di Gasso Alto, con direzione circa N-S, a causa del quale gli strati, da una giacitura come sopra ricordato, tendono ad assumere una giacitura suborizzontale. Inoltre questa faglia sembra essere all'origine del pianoro di Gasso Alto, che da alcuni è interpretato come un rilascio di versante, classificabile come DGPV ("Deformazione Gravitativa Profonda di Versante").

L'innesco di questo fenomeno è di origine tettonica, dato che la faglia determina l'abbassamento del versante verso valle e il torrente potrebbe aver contribuito a questo operando un lento, ma continuo scalzamento al piede del versante stesso. La sua datazione si potrebbe postglaciale, quando in seguito al ritiro dei ghiacciai e per il loro mancato sostegno, la parete già indebolita dalla presenza della faglia cominciò a rilassarsi verso valle.

Inoltre questo pianoro è delimitato da pareti rocciose lungo le quali si verificano fenomeni di crollo, anche se non esiste una nicchia vera e propria, visto che i distacchi sono generalizzati e localizzati in piccoli punti su tutta la parete rocciosa. Questi fenomeni di crollo possono essere datati come attuali, visto che si sono verificati in tempi recenti e che si verificano tuttora.

## **1.5 ASPETTI GEOMORFOLOGICI**

Dal punto di vista geomorfologico la valle del t. Trobiolo presenta un'asimmetria dei versanti: il versante sinistro mostra una pendenza piuttosto elevata, mentre il versante destro è meno acclive e termina verso l'alto con alcuni terrazzi morfologici.

Il versante interessato dalla frana può essere schematizzato nel seguente modo.

A quota circa 650 m s.l.m., in località Gasso Alto, è presente un'area pianeggiante, di probabile modellamento glaciale; verso valle si origina una parete rocciosa, pressoché verticale, che copre un dislivello di circa 100 m (fino alla quota 550 m s.l.m.). La parete con direzione NW-SE, immediatamente a nord di Gasso Alto, risulta altresì interessata da "torrioni di roccia" con disarticolazione a tergo, interessati da numerose frane per crollo, verificatesi in tempi recenti.

A quote ancora inferiori e fino alla nicchia di frana (495 m s.l.m.), il versante risulta articolato in contropendenze, limitate lateralmente.

L'area di frana in senso stretto è costituita dalla nicchia, fino a 450 m s.l.m., seguita da un pendio regolare fino a 340 m s.l.m. e inclinato mediamente di 38°. Il fondovalle prima degli interventi di rimozione del materiale si trovava a quota 310 m s.l.m. e non ospitava l'alveo del Torrente Trobiolo.

All'esterno dell'area in frana, la morfologia rimane sostanzialmente la stessa, in particolare la parete sub-verticale prosegue, sia in direzione NW-SE che in direzione NE-SW, formando un angolo ortogonale proprio in corrispondenza della loc. Gasso Alto.

In sinistra idrografica dell'area in frana, dalla quota 450 m s.l.m. fino a quota circa di 350 m s.l.m., sono presenti contropendenze subparallele con direzione circa E-W.

La dinamica geomorfologica del versante mostra forme evidenti di deformazioni gravitative in atto: le contropendenze sopracitate, risultano essere controllate da depressioni profonde alcuni metri (trincee morfologiche), riempite dai depositi glaciali. Particolarmente evidenti sono quelle a q. 410 e 415 m s.l.m., in corrispondenza della mulattiera tranciata dalla frana.

L'area compresa tra 495 m s.l.m. e 395 m s.l.m. risulta in arretramento sia per successive frane per crollo (blocchi metrici) che per l'evoluzione di fratture beanti questa evoluzione può coinvolgere il versante fino a quota 540 m s.l.m.

## **1.6 ASPETTI IDROGEOLOGICI**

Il bacino del Trobiolo, da un punto di vista idrogeologico può essere diviso in 3 settori, aventi caratteristiche diverse fra loro e che possono essere considerati omogenei all'interno.

Questi settori sono:

- Versante sinistro: zona caratterizzata prevalentemente dalla presenza di rocce carbonatiche aventi permeabilità elevata per fratturazione e soggette a carsismo. La giacitura degli strati rocciosi, a parte variazioni locali, ha un'immersione verso SW generando una struttura a reggipoggio. Si verifica una condizione di circolazione di acque con tendenza verso l'esterno del bacino.
- Parte alta del versante destro: zona caratterizzata dall'affioramento di rocce a permeabilità ridotta. Su queste rocce si ha un'abbondante e ben distribuito ruscellamento delle acque meteoriche, mentre in esse non si instaura una circolazione profonda.
- Parte media e bassa del versante destro: zona caratterizzata dalla presenza di rocce a permeabilità alta e con giacitura a franapoggio (inclinazione minore del pendio), che favorisce l'emergere delle acque in esse contenute.

Nell'area interessata dal dissesto la circolazione idrica profonda è controllata dalla presenza di faglie subverticali che delimitano buona parte dei limiti del giacimento. I gessi, le dolomie cariate e i calcari presenti in questo blocco sono caratterizzati da permeabilità per fratturazione, mentre nelle coperture detritiche prevale un'elevata permeabilità per porosità, abbassata da livelli impermeabili presenti nei depositi glaciali. La parte sommitale (intorno alla quota 600 m s.l.m.) costituisce un'importante area d'infiltrazione, in quanto oltre ad avere una morfologia pianeggiante, è costituita da rocce carbonatiche aventi elevata permeabilità per fratturazione e soggette a fenomeni carsici. La giacitura a reggipoggio ha però dettato una condizione favorevole di circolazione delle acque, con tendenza a disperderle verso l'esterno del bacino.

Inoltre la morfologia del versante in questo tratto è articolata in contropendenze e trincee morfologiche, la cui origine è sia gravitativa che tettonica; questa morfologia favorisce l'infiltrazione preferenziale, con una distribuzione quasi areale. L'acqua meteorica una volta infiltratasi nel sottosuolo raggiunge e percorre le fratture andando ad alimentare le falde profonde. Oltre a siffatte fratture, le evidenze di terreno fanno presupporre la presenza di condotti di origine carsica che contribuiscono a disperdere le acque del torrente Trobiolo, le quali si infiltrano nell'accumulo formato dal piede di frana.

L'assenza di grossi livelli impermeabili ha impedito l'originarsi di sorgenti nell'area estrattiva, mentre alcune sorgenti, peraltro già captate, sono presenti nei pressi del Torrente Trobiolo all'interno dei depositi glaciali.

## **1.7 ASPETTI GEOMECCANICI**

Come già anticipato, i motivi strutturali principali sono dati da faglie, che disarticolano le unità litostratigrafiche triassiche precedentemente descritte, lungo direzioni orientate circa WNW/ESE.

I lineamenti strutturali principali possono essere riferiti alla faglia del Vallone Inse, diretta NNW-SSE, a componente destra e al sistema di Gasso Alto, con direzione circa N-S, a causa del quale gli strati, da una giacitura come sopra ricordato, tendono ad assumere una giacitura suborizzontale.

In particolare la contropendenza individuata tra la parete subverticale e la nicchia di frana, a quota 530 m s.l.m., è controllata in parte da una faglia, che in una prima analisi mostra una cinematica normale trascorrente destra ( $20^{\circ}N62^{\circ}$ ). Inoltre nell'area di frana, sono presenti, in sinistra orografica a quota 360 m s.l.m. superfici di movimento ( $55^{\circ}N65^{\circ}\div 45^{\circ}$ ) (specchi di faglia) con indicatori cinematici (strie di movimento) orientati  $55^{\circ}N45^{\circ}$  ("a franapoggio"). (Dati tratti dal Progetto esecutivo di messa in sicurezza del versante e del torrente Trobiolo in comune di Pisogne, interventi di 1° fase, relazione di sintesi delle attività di rilevamento geomorfologico, geomeccanico e geostrutturale, STUDIO MAIONE).

I rilievi geomeccanici eseguiti sono stati effettuati nell'area in frana, nel settore orientale, nelle aree a monte della nicchia e, per osservare affioramenti più estesi, alla base della parete di Gasso. Data l'accidentata morfologia dell'area, il pericolo derivante dai crolli e, nella parte inferiore del pendio, la limitata presenza di affioramenti non è stato possibile eseguire i rilievi in maniera sistematica ed oggettiva, ma si è proceduto a rilievi soggettivi e di tipo speditivo. Sono state rilevate la giacitura delle discontinuità, e ove quest'ultime erano raggiungibili, anche i valori di apertura e spaziatura. Tuttavia i rilievi geomeccanici precedenti, nei quali sono state eseguite anche misure sulle pareti con corde di sicurezza, forniscono un cospicuo numero di dati, disponibili anche per le zone altrimenti difficilmente raggiungibili.

Nel settore considerato i Calcari di Angolo si presentano intensamente fratturati, con flessure e pieghe blande aventi asse  $30^{\circ}N70^{\circ}$ , mentre la Carniola di Bovegno è intensamente piegata e fratturata.

Per i dati delle stazioni effettuate si veda l'Allegato 07 Rilievi Geomeccanici.

Sono state individuate quattro famiglie di discontinuità principali, di cui si riporta l'assetto medio. Dati gli elevati valori di inclinazione, l'immersione dei piani può variare alternativamente di 180°.

- K1: 90°N60°
- K2: 30°N70°
- K3: 300°N70°
- K4: 350°N80°

Tali sistemi sono evidenziati in maniera apprezzabile dall'orientazione delle pareti, scarpate e gradini morfologici visibili sul rilievo 1:1000 disponibile per l'area. L'orientazione degli stessi in carta confermano la direzione delle discontinuità misurate sul campo.

Per apprezzare le variazioni geometriche dei sistemi nel dettaglio, si rimanda all'Allegato 07 Rilievi Geomeccanici.

La tabella seguente riporta un confronto tra i dati geomeccanici rilevati nel corso dei precedenti studi. Si può constatare una buona concordanza tra i sistemi di discontinuità presenti in parete, nelle aree limitrofe ed all'interno della nicchia di distacco, anche al passaggio fra litotipi e formazioni differenti (calcari/carniole/gessi). Tale corrispondenza è stata ulteriormente confermata dai rilievi effettuati nel presente studio, sia ai piedi della parete di Gasso Alto, che sugli affioramenti di Carniola individuati sul fianco orientale. Le giaciture rilevate in corrispondenza di quest'ultimi e nella zona in frana hanno inoltre permesso di delineare con maggior precisione l'andamento della Carniola nel settore.

Rilievo STUDIO MAIONE Nicchia principale (unità: Calcare di Angolo)	Rilievo STUDIO MAIONE Settori esterni Entrambe le unità	Rilievo ARETHUSA (unità: Carniola) *
225 ( 120)/20 <b>St</b>	230-290/30-50 <b>St</b>	228-310/08-68 <b>St = K1</b>
090-270/72 <b>K1</b>		084/78 <b>K2</b>
022/70 <b>K2</b>	020-040/72-80	200/90 <b>K5</b>
310/68 <b>K3</b>	320/70	310/75 <b>K6</b>
340/72 <b>K4</b>		170/75 <b>K4</b>
325/80 faglia		
	120/80 110/60 faglia	117/78 <b>K3</b>
		260/45 <b>St = K7</b>
		043/45 faglia <b>K9</b>
		043/65 faglia <b>K8</b>

**Tabella 8: Confronto dati geomeccanici delle diverse campagne di rilievo**

I sistemi di discontinuità rilevati sono tutti caratterizzati da valori d'inclinazione elevati, eccetto il sistema K2 che assume valori minimi pari a 60°. Essi rivestono dunque il ruolo cinematico di svincolo, laterale e a tergo, nei settori esterni alla frana, teatro degli scenari individuati. In particolare la possibilità di svincolo laterale è offerta dai sistemi K1 e K3 rilevati nella zona a monte della nicchia e sul fianco occidentale. L'isolamento delle porzioni instabili a tergo, è offerto dal sistema K2, il quale presenta un'immersione variabile tra i 10°N ed i 30°N. Tale sistema è diffuso sia nel settore a monte della nicchia (fino alla parete di Gasso), dove l'immersione assume valori di 30°N e assetto subverticale, ove si riscontrano fratture disgiuntive orientate parallelamente ad esso, sia nel fianco orientale, dove l'immersione tende ad assumere il valore di 10°N ed un'inclinazione minore, pari a 60°. Su tale sistema si impostano gli scivolamenti dei blocchi e dei cunei che provocano l'arretramento della nicchia. Si tratta peraltro di una famiglia rilevata in tutte le stazioni di misura effettuate, molto pervasiva e con un'apertura maggiore di 10 cm. Si può pertanto identificarla come uno dei fattori principalmente responsabili dell'allentamento dell'intero versante.

La stratificazione presenta in genere valori decimetrici, è abbastanza costante per i calcari e molto variabile nella carniola, mentre i restanti sistemi di discontinuità hanno valori di spaziatura intorno a 1–1,5 m. Le aperture sono generalmente elevate, denotando uno stato di avanzato rilascio dell'ammasso roccioso. Le fratture esposte presentano un'alterazione superficiale da bassa a media (W2 – W3).

Per quanto riguarda la circolazione idrica, anche se all'atto del rilievo non si sono evidenziati stillicidi in atto, sono state segnalate dai rilievi precedenti concrezioni solfato-calciche sulle pareti delle fratture denotanti l'esistenza di una circolazione di una certa entità proveniente dagli ammassi rocciosi sovrastanti.

In base alle caratteristiche rilevate ed alla combinazione dei sistemi di fratture con l'orientazione della parete è stato possibile classificare l'ammasso roccioso nella classe IV ("scadente") della classificazione RMR. (Dati tratti dal Progetto esecutivo di messa in sicurezza del versante e del torrente Trobiolo in comune di Pisogne, interventi di 1° fase, relazione di sintesi delle attività di rilevamento geomorfologico, geomeccanico e geostrutturale, STUDIO MAIONE).

I cinematismi possibili sono così riassumibili:

- Ribaltamento/Scivolamento superficiale su k2+taglio su k1+piano di debolezza al piede lungo St;
- Ribaltamento/Scivolamento superficiale su k3+taglio su k1+piano di debolezza al piede lungo St;
- Scivolamento a cuneo su k3+k2;
- Scivolamento a cuneo su k3+k1.

Di seguito vengono riportati i dati geomeccanici rilevati dallo STUDIO MAIONE, relativi al settore di nicchia, raggiungibile esclusivamente calandosi con corde di sicurezza. Per le aree instabili puntuali individuate si veda il paragrafo “Sintesi delle attività di rilevamento geomorfologico e geomeccanico e geostrutturale”.

Sistema	Imm.	Incl	Spaz(cm)	Apert(mm)	JRC	Riempimento	JCS (MPa)	Note
St	225(120)	20	10-50	1-5	4.6			
K1	090-270	72	100-150	100-150	8-10	Detrito grossolano;limo		
K2	022	70	50-100	100	4-6	Limo o assente	36;52**	Fronte principale parete
K3	310	68	100	100-150	4-6	Assenti: loc. deposito sali solfato-calcarei	22.5;34.5**	
K4	340	72	150	20-50	12-16*	Limo: loc. deposito di sali solfato-calcarei	23	Importante nel settore sx della parete; piano di faglia

**Tabella 9: Principali sistemi di discontinuità rilevati nella zona di nicchia (Studio Maione)**



## **2.0 FASE DI ANALISI**

### **2.1 PREMESSA**

Questa fase ha preso in considerazione in modo distinto, le problematiche connesse al Torrente Trobiolo e suo bacino idrologico e quelle della frana del Gasso, identificando le zone di possibile instabilità e ampliamento dell'attuale dissesto.

Per quanto riguarda il bacino del Torrente Trobiolo si è proceduto all'analisi della portata di massima piena a seguito di eventi piovosi intensi, successivamente con il calcolo della magnitudo intesa come il massimo volume di materiale solido mobilizzabile lungo l'asta. In questo caso si sono utilizzati i numerosi dati disponibili ricavati sia da Regione Lombardia che da specifici studi di bacino.

L'indagine è stata condotta seguendo le indicazioni contenute nell'allegato 2 – 4 della L.R. 12/2005 e nel quaderno regionale di ricerca n.34 (Regione Lombardia).

Per quanto riguarda la frana del Gasso si è cercato di individuare le zone di possibile ulteriore instabilità, distinte in zona 1 (retrostante alla nicchia attuale) e zona 2 (lato destro della frana) con la verifica dei relativi volumi massimi mobilizzabili e analisi delle interferenze con l'alveo ed il deflusso liquido e liquido solido. Si è inoltre analizzata la possibile influenza di un evento sismico sulla stabilità della massa in frana.

Le analisi di seguito riportate descrivono pertanto i due seguenti scenari a cui fanno riferimento diversi possibili fenomeni di dissesto:

- SCENARIO DI ESONDAZIONE DEL TORRENTE TROBIOLO: caratterizzato da possibili fenomeni di esondazione dovuti ad eventi di intense precipitazioni, sia di carattere liquido che di carattere liquido-solido;
- SCENARIO FRANA GASSO: caratterizzato dal possibile ampliamento dell'area interessata dalla frana del Gasso.

### **2.2 TORRENTE TROBIOLO**

In questo capitolo si è proceduto all'analisi idraulica del bacino del Torrente Trobiolo, andando a valutare la sola portata liquida e la portata in caso di trasporto liquido-solido. I metodi sono di seguito meglio definiti e le elaborazioni grafiche e matematiche sono riportate in allegato.

Nello specifico si è proceduto valutando dapprima la portata del Torrente utilizzando il Metodo Razionale ed il Metodo Razionale Modificato, andando poi a confrontare i risultati ottenuti con i dati disponibili da studi precedenti e cioè:

- dati ottenuti dal Sistema Informativo dei Bacini e dei Corsi d'Acqua delle Regione Lombardia (SIBCA);
- dati ottenuti dallo Studio di Caratterizzazione Idrologica a supporto dell'Elaborato Tecnico relativo al Reticolo Idrico Minore e relative Fasce di rispetto a firma del Dott.

Ing. Pier Giuseppe Fenaroli, e dati ottenuti dallo Studio “Messa in sicurezza del versante di frana e del torrente Trobiolo in comune di Pisogne;

- interventi di 1° fase – Riperimetrazione delle aree a rischio (procedura 267/98)” a cura di IDRO srl, Progettisti Prof. Ing. Ugo Majone et al..

Una volta valutata la portata media si è fatto riferimento alla verifica idraulica del deflusso della piena riprendendo quella condotta nello Studio “Messa in sicurezza del versante di frana e del torrente Trobiolo in comune di Pisogne, interventi di 1° fase – Riperimetrazione delle aree a rischio (procedura 267/98)” a cura di IDRO srl, Progettisti Prof. Ing. Ugo Majone et al.. In questo caso lo studio aveva assunto la sola portata liquida, senza considerare l’interferenza di eventuali trasporti liquido-solidi provenienti da franamenti o erosioni dal bacino.

Si è poi proceduto con una descrizione delle aree in frana presenti lungo il bacino del Torrente del Trobiolo. Tali dissesti, infatti, potrebbero generare fenomeni di trasporto in massa su conoide. L’ultimo paragrafo del presente capitolo, Analisi del trasporto liquido-solido, valuta proprio quest’ultimo aspetto.

## 2.2.1 ANALISI PORTATA LIQUIDA

Nello studio idraulico di un corso d’acqua la variabile fondamentale è la portata di massima piena. Tale variabile deve essere associata ad un tempo di ritorno  $T_r$  che indica il numero di anni in cui la portata è raggiunta o superata in media una sola volta. Il  $T_r$  va scelto in base alle normative vigenti, al rischio e al tipo di sistemazione del bacino. In questo studio, oltre a considerare i dati a disposizione dagli studi precedentemente realizzati, sono stati considerati tempi di ritorno di 50, 100 e 200 anni utilizzando i seguenti metodi per la stima della portata di massima piena:

1. Metodo Razionale;
2. Metodo Razionale con le modifiche Università di Brescia (studio Ranzi, Mariani, Rossini e Armanelli);

### Metodo Razionale

Il metodo indiretto di trasformazione degli afflussi meteorici in deflussi, come indicato dalle direttive PAI dell’autorità di Bacino del Po - legge 18 maggio 1989 n.183, è condotto utilizzando la seguente formula per il calcolo della portata critica  $Q$  (assumendo nota la precipitazione temibile di assegnato tempo di ritorno) :

$$Q = \Phi \cdot A \cdot i(d_c, T_r, r) \cdot e$$

$f$  indica il coefficiente di deflusso di progetto,  $A$  l’area del bacino in  $\text{km}^2$ ,  $i$  è l’intensità di precipitazione in funzione della durata critica  $d_c$ , del tempo di ritorno  $T_r$  e del coefficiente di ragguglio  $r$ ,  $e$  il coefficiente di laminazione.

Il tempo di corrivazione  $T_c$  viene calcolato con la formula di Giandotti:

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{(H_m - H_0)}}$$

$S$  indica la superficie del bacino in  $\text{km}^2$ ,  $L$  la lunghezza dell'asta principale,  $H_m$  l'altezza media del bacino in m s.l.m.,  $H_0$  la quota della sezione di chiusura in m s.l.m..

Le altezze di pioggia vengono calcolate utilizzando la relazione tra i parametri  $a$  e  $n$  della stazione pluviometrica di riferimento (Breno):

$$h_{(t)} = at^n$$

$t$  indica il tempo di progetto in ore posto pari al tempo di corrivazione.

La portata di massima piena viene quindi così calcolata:

$$Q_c = 0.278 \frac{ch_{(t)}S}{T_c}$$

$c$  indica il coefficiente di deflusso.

Le elaborazioni svolte sono riportate in allegato. Di seguito sono riassunti i risultati ottenuti:

**Tabella 10 Portate Torrente Trobiolo Metodo Razionale**

<b>METODO RAZIONALE</b>	
TEMPO DI RITORNO ( <i>anni</i> )	PORTATA DI MASSIMA PIENA ( <i>mc/sec</i> )
50	58.597
100	64.903
200	70.960

### **Metodo Razionale (Modificato da Bacchi, Ranzi, Rossini e Armanelli Università di Brescia)**

L'analisi è stata condotta con riferimento alle indicazioni dello studio di Ranzi, Mariani, Rossini, Armanelli e Bacchi sull'Analisi e sintesi delle piogge intense nel territorio Bresciano (1999), nel quale l'altezza di pioggia viene ipotizzata appartenere ad una popolazione la cui funzione di probabilità è la distribuzione asintotica del massimo valore, nota come distribuzione di Gumbel. Di seguito si riportano le formule che hanno portato alla stima della portata.

Per il calcolo delle altezze di pioggia si utilizzi la seguente relazione:

$$h = a_T T_c^{n_1}$$

Posto:

$$a_T = m_1 \left\{ 1 - \frac{CV\sqrt{6}}{p} \left[ e + \text{Ln} \left( \text{Ln} \left( \frac{T}{T-1} \right) \right) \right] \right\} \quad (T \text{ è il tempo di ritorno ed } \varepsilon \text{ il numero di Eulero})$$

$$T_c = \frac{3.3\sqrt{A+3.2L}}{\sqrt{Q_{med} - Q_{min}}} \quad (A \text{ è l'area del bacino e } L \text{ la lunghezza dell'asta principale})$$

Per il calcolo della portata si utilizzi invece la seguente relazione:

$$Q = \frac{1}{3.6} \cdot f \cdot r \cdot A \cdot a_t \cdot T_c^{n_t - 1}$$

Dove  $\phi$  rappresenta il coefficiente di afflusso locale, e r un coefficiente che dipende dall'area del bacino e dal tempo di corrivazione.

Le elaborazioni svolte sono riportate in allegato. Di seguito sono riassunti i risultati ottenuti:

**Tabella 11 Portate Torrente Trobiolo Metodo Razionale modificato**

<b>METODO RAZIONALE (Modificato)</b>	
TEMPO DI RITORNO (anni)	PORTATA DI MASSIMA PIENA (mc/sec)
50	36.91
100	40.22
200	43.52

Di seguito si riporta una schema che riassume tutti i dati di portata a disposizione: sia quelli ottenuti dalle presenti elaborazioni che quelli relativi a dati ottenuti da studi precedenti relativi al Sistema Informativo dei Bacini e dei Corsi d'Acqua delle Regione Lombardia (SIBCA), allo Studio di Caratterizzazione Idrologica a supporto dell'Elaborato Tecnico relativo al Reticolo Idrico Minore e relative Fasce di rispetto a firma del Dott. Ing. Pier Giuseppe Fenaroli, e allo Studio "Messa in sicurezza del versante di frana e del torrente Trobiolo in comune di Pisogne, interventi di 1° fase – Riperimetrazione delle aree a rischio (procedura 267/98)" a cura di IDRO srl, Progettisti Prof. Ing. Ugo Majone et al..

**Tabella 12 Riepilogo Portate Torrente Trobiolo**

Metodo Utilizzato	Tempo di Ritorno 50 anni	Tempo di Ritorno 100 anni	Tempo di Ritorno 200 anni
Metodo Razionale	58 mc/sec	65 mc/sec	71 mc/sec
Metodo Razionale Modificato	37 mc/sec	40 mc/sec	43 mc/sec
Sibca	26 mc/sec	28 mc/sec	
Reticolo Minore	62 mc/sec	68 mc/sec	82 mc/sec
Studio Majone	85 mc/sec	93 mc/sec	102 mc/sec

Nel grafico che segue si sono plottati i dati a disposizione andando a confrontare i diversi risultati ottenuti.

Le verifiche condotte per il calcolo del trasporto solido hanno considerato una portata media pari a 60 mc/sec.

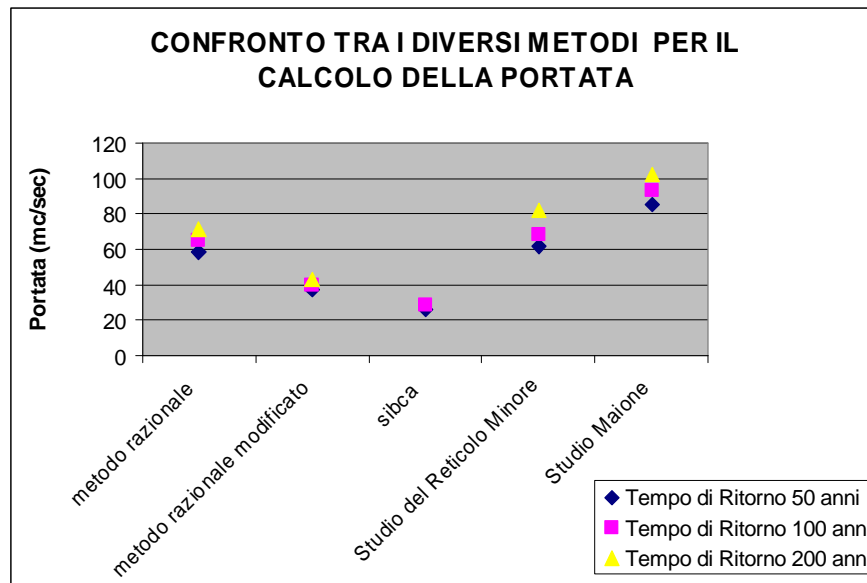


Figura 14 Confronto Portate Torrente Trobiolo

## 2.2.2 VERIFICA IDRAULICA DEFLUSSO LIQUIDO DI PIENA

Per quanto riguarda la verifica idraulica del Torrente Trobiolo si è preso in considerazione lo Studio “Messa in sicurezza del versante di frana e del torrente Trobiolo in comune di Pisogne, interventi di 1° fase – Riperimetrazione delle aree a rischio (procedura 267/98)” a cura di IDRO srl, Progettisti Prof. Ing. Ugo Majone et al..

Tale studio, qui brevemente riassunto, considera per diversi tempi di ritorno, un modello monodimensionale in moto permanente al fine di verificare che le sezioni di deflusso del Torrente Trobiolo siano o meno sufficienti a contenere la portata di massima piena, anche in caso di eventi estremi con tempi di ritorno di 200 anni. L'utilizzo del modello di calcolo scelto prevede la ricostruzione geometrica dell'asta fluviale, ottenuta da un rilievo dettagliato del torrente stesso e dei manufatti presenti in alveo.

In particolare sono state svolte delle simulazioni in moto permanente per tempi di ritorno di 30, 50, 100 e 200 anni utilizzando valori di portata pari a 82.7 mc/s per  $Tr=30$  anni, 89.3 mc/s per  $Tr=50$  anni, 98.1 mc/s per  $Tr=100$  anni e 107 mc/s per  $Tr=200$  anni. Da sottolineare il fatto che la verifica idraulica condotta dallo studio qui brevemente riassunto, utilizza valori di portata maggiori di quelli calcolati nel paragrafo precedente, garantendo così un risultato decisamente cautelativo. È comunque un'analisi che considera la sola portata liquida e non prende in considerazione la portata liquido-solida.

L'analisi dei risultati verifica che per nessuno dei tempi di ritorno si hanno tracimazioni arginali o funzionamenti in pressione dei ponti e dei manufatti esistenti. Considerando l'evento maggiormente

gravoso, quello cioè con tempo di ritorno pari a 200 anni, i franchi nel tratto di valle in prossimità della confluenza con il lago, si riducono sino ai 25 cm senza mai annullarsi. La corrente si mantiene sempre veloce, con numeri di Froude compresi tra 2 e 5 (con picchi di 7), e velocità variabili tra i 10 e i 16 m/sec (con picchi di oltre 20 m/sec), a seconda del variare del tempo di ritorno e della sezione considerata.

Dato che la corrente si mantiene sempre veloce, la condizione di valle imposta non influenza significativamente il profilo idrico, pertanto considerare un livello del lago costante ad una quota superiore a quella della riva non influisce sui livelli idrici e risulta più cautelativo.

Di seguito vengono riassunte le caratteristiche dei manufatti esistenti e della corrente per eventi con tempo di ritorno pari a 50 anni.

**Tabella 13 Caratteristiche manufatti esistenti e della corrente con  $T_r=50$  anni (estratto dallo Studio per la Messa in sicurezza del versante di Frana e del Torrente Trobiolo del Giugno 2005)**

<b>MANUFATTO</b>	<b>QUOTA INTRADOSSO (m.s.m.)</b>	<b>QUOTA ESTRADOSSO (m.s.m.)</b>	<b>LIVELLO IDRICO <math>T=50</math> anni (m.s.m.)</b>	<b>FRANCO (m)</b>	<b>FUNZIONAMENTO</b>
Passerella a monte del Ponte della Lages	240.80	241.00	240.06	0.74	Pelo libero
Nuovo ponte Lages	228.05	229.45	225.78	2.27	Pelo libero
Ponte Lages	214.07	215.02	211.67	2.40	Pelo libero
Ponte di Via del Molino	203.41	204.41	202.77	0.64	Pelo libero
Ponte di Via Trobiolo	193.77	194.73	192.90	0.87	Pelo libero
Ponte ex S.P. 510	190.89	191.74	190.37	0.52	Pelo libero

I manufatti risultano quindi sufficienti a convogliare la portata cinquantennale, presentando però franchi in alcuni casi ridotti. Questa situazione potrebbe creare problemi nel caso di fenomeni di trasporto solido, caso analizzato nei paragrafi che seguono.

### **2.2.3 DESCRIZIONE AREE IN FRANA LUNGO IL BACINO IDROGRAFICO**

La frana di Gasso non è l'unico dissesto compreso nel bacino del Trobiolo. Nella parte alta del bacino sono presenti diversi movimenti franosi, caratterizzati da un'estensione areale di rilevante importanza, e da una diversa tipologia.

Nell'ambito delle indagini effettuate per lo studio della frana in località Gasso, sono stati eseguiti dei sopralluoghi sui dissesti riportati nella cartografia disponibile, allo scopo di verificarne l'attività ed



accertare possibili apporti di materiale nelle aste torrentizie di secondo e terzo ordine, tali da innescare eventi parossistici di trasporto solido.

Vengono di seguito elencati i diversi movimenti franosi e le considerazioni effettuate sul terreno e sulla base dei dati estrapolati dai dataSet 1 e 4 delle interferometrie radar.

#### 1. Dissesto in località Grignaghe:

Il dissesto, segnalato nella tesi di laurea compilata a cura di Gianna Rizzi, ricade in una fascia comprendente la parte superiore del versante che da Grignaghe scende verso località Presso e Renzò. Il limite inferiore dell'area in frana è stato posto nella strada che da Pontasio scende verso Pisogne, mentre quello superiore sotto l'abitato di Grignaghe. Bisogna tuttavia specificare che data la natura del dissesto, di seguito esposta, risulta difficoltoso individuare dei limiti netti. I limiti riportati in carta sono stati ubicati in tale posizione in base all'assenza di lesioni sulla carreggiata e nel patrimonio edilizio costituente la frazione di Grignaghe. Tuttavia, come emerso in seguito, l'assenza di danneggiamenti nell'edificato non esclude il verificarsi di movimenti lenti e superficiali come quelli analizzati.

L'area individuata è quindi da considerarsi come potenzialmente soggetta a movimenti superficiali, non necessariamente sempre presenti.

Dal sopralluogo effettuato in data 16-07-08 è confermata la natura molto superficiale, ma diffusa del dissesto. La giacitura a franapoggio con inclinazione minore del pendio dei piastroni di Servino qui affioranti innesca scivolamenti nei depositi glaciali, di versante e nella coltre d'alterazione sopra adagiati. In corrispondenza della valle che scende verso località Minico Staffoni è stato possibile osservare spessori nella coltre di detrito molto esigui, sempre inferiori al metro. La vallecchia in questione è, infatti, incisa in roccia, e caratterizzata, a tratti, da forte acclività. La fratturazione della roccia affiorante origina frequenti crolli di blocchi di VRU inferiore al metro cubo, che vanno ad accumularsi nei tratti meno acclivi della valle ed in corrispondenza di "gradini" morfologici.

#### 2. Dissesto in località Ballo:

Il movimento franoso in questione, riportato come accumulo di frana nella cartografia CARG, si trova nella parte alta del bacino, in destra idrografica, sul versante che scende verso la valle di Nidre. Il Bedrock in questo settore è costituito dai micascisti del Maniva, la cui scistosità risulta essere orientata prevalentemente a franapoggio o a traversopoggio, condizione che, congiuntamente alla bassa permeabilità di tali litotipi, origina un diffuso ruscellamento.

Durante l'ispezione effettuata il 17-07-08, a seguito di prolungate e intense piogge avvenute nei giorni precedenti, il ruscellamento era continuo, e già rilevabile sulla sede stradale. Nella parte sommitale del dissesto, in corrispondenza dell'abitazione posta a quota 1135 m s.l.m. sono visibili affioramenti di scisti. Il limitato spessore dei depositi glaciali, è stato confermato anche dai residenti dell'abitazione (sulla base degli scavi eseguiti per la realizzazione delle fondamenta), e quantificato in un metro. Scendendo verso la sede stradale è ben visibile, all'interno di un impluvio, un piccolo dissesto e la relativa nicchia. L'accumulo di frana è completamente saturo e molto vegetato, il ruscellamento è pressoché continuo e presente non solo nell'impluvio, ma anche nelle parti pianeggianti del versante circostante. Gli abitanti della casa soprastante hanno datato l'avvenimento al 1954, l'abitazione,

edificata nel 1963, non presenta lesioni, nonostante sia data in movimento dai dati Ps del DataSet 1 (Area critica 157) con una velocità di -3.23 mm/a.

Al di sotto della carreggiata, nella prosecuzione dell'impluvio sopra citato, è visibile un evento molto recente, avvenuto con asportazione di terreno al di sotto della massicciata, cedimenti della stessa, ed un notevole accumulo di materiale sabbioso-ghiaioso alla base, non ancora vegetato.

Il muro a monte della strada è fratturato lungo una direzione orizzontale. La presenza di terra alla base della frattura testimonia venute d'acqua. In corrispondenza del ponte sulla valle di Ballo c'è molto detrito e la luce rispetto alla strada è limitata.

I residenti nell'abitazione posta a quota 1085 ricordano un primo fenomeno avvenuto nel 2003, che ha provocato un cedimento della carreggiata tale da richiedere interventi di manutenzione. L'accumulo di materiale presente alla base si presenta inciso dal rigagnolo che scende dall'impluvio, a testimoniare la notevole quantità d'acqua che esso convoglia verso la valle di Nisdre.

Proseguendo verso valle si nota un altro piccolo dissesto, con nicchia alta 40 cm, molto fresca, mentre la vecchia mulattiera che porta a Ballo bassa si presenta tiltata e parzialmente invasa dal materiale scivolato da monte. Anche qui tuttavia le case non presentano lesioni, nonostante gli indizi visibili sul campo ed i dati da satellite facciano presupporre movimenti in corso, che coinvolgono l'intero versante ed assumono contorni più marcati e valori di spostamento maggiori lungo gli impluvi.

### 3. Dissesto in località Ceto di Sotto:

Il dissesto, riportato nella cartografia CARG, è ubicato in una limitata porzione di versante tra la valle di Gislona e la Valle di Ballo, sopra la sede stradale. Il versante tuttavia si presenta molto più asciutto del precedente, presenta ruscellamento solo in corrispondenza degli eventi meteorici più intensi. Sono riconoscibili segni di piccoli smottamenti e colate, di esiguo spessore e molto limitati arealmente.

### 4. Dissesto in località Passabocche:

Il movimento franoso in questione è quello che interessa l'area maggiore tra tutti quelli analizzati, ed è riportato nella cartografia CARG, come accumulo di frana, senza indicazione sull'attività attuale.

Il dissesto ricade nel settore alto del bacino, in destra idrografica, ed interessa, secondo la perimetrazione effettuata dai rilevatori del CARG, un'area di 0.6 km<sup>2</sup>, avente come substrato i micascisti del Maniva. L'utilizzo del suolo prevalente in quest'area è a pascolo, e la morfologia dei prati presenta marcate ondulazioni, e tratti ad acclività anche elevata. Durante il sopralluogo effettuato in data 17-07-08, procedendo dalle porzioni sommitali del pendio fino alla base del dissesto, non sono state riscontrate aperture nel manto erboso o segni che testimoniano movimenti recenti, anche superficiali, nella parte sommitale. Solo una conformazione irregolare del terreno, più accidentata dove circola acqua. Sembra possibile intuire dove siano avvenuti piccoli dissesti, osservando la morfologia. I proprietari dei prati della parte alta dell'accumulo non ricordano avvenimenti negli ultimi 30 anni, anche minimi. Tutti i muretti in pietra, e la strada, visti scendendo, non presentano lesioni. Nei tagli delle mulattiere si apprezzano quasi 2 metri di detrito di scisti in matrice limoso - argillosa, umida e abbastanza plastica.

A quota 1230 m s.l.m., il guardrail della strada che sale verso loc. Passabocche, fissato sulla precedente pavimentazione stradale, è basculato verso valle, per una lunghezza notevole. La causa

non sembra essere riconducibile ad urti quanto ad un processo di scivolamento generale del versante, e cedimenti della vecchia massicciata. Osservando da sotto, in effetti, sembra che la massicciata abbia ceduto e ci sono discontinuità della morfologia dovute a vecchi movimenti. Ai piedi di questa porzione di versante si vedono, appena sopra un pianoro, avvallamenti e rigonfiamenti, in alternanza. Si nota inoltre come in questo impluvio debba essere convogliata molta acqua.

A quota 1100 m, sotto località Stalla Vecchia è ben visibile una nicchia di frana, alta 40 cm e ben definita, posta all'interno di un impluvio, ed una nicchia secondaria. L'accumulo di frana è diversamente vegetato dall'intorno, ad indicare abbondante circolazione d'acqua. Anche il terreno a monte della stalla sottostante è dissestato con aperture nel manto erboso, più o meno recenti. È la zona vista sin ora dove il fenomeno è più intenso. Si tratta di fenomeni di Creeping o Soliflusso, che negli impluvi assumono contorni più definiti e spessori maggiori.

Le case poste a valle (200 m) della nicchia, in località Zoncone, non presentano lesioni, anche se i dati PS le confermano in movimento.

Il muro di contenimento in località Dosso Parvisolo è vistosamente crepato (in corrispondenza della valletta non segnata in carta), la baita stessa (molto vecchia) presenta diverse crepe e interventi di sistemazione sulle stesse. È data in movimento dai PS. C'è un probabile vecchio accumulo che vi preme contro, e sopra una contropendenza. In località Trighetto i proprietari dichiarano l'assenza di lesioni negli edifici, aventi 20 anni. L'edificio più vecchio (inizio secolo) presenta qualche crepa.

C'è un nesso evidente tra acclività, circolazione d'acqua e smottamenti. Osservando la morfologia si evince il legame tra la conformazione del terreno e la tipologia del dissesto: quando si attiva qualche piccolo movimento, si crea una concavità ed un accumulo convesso, che si ferma più o meno stabilmente dove l'acclività è minore, percorrendo nella maggior parte dei casi pochi metri. Si tratta quindi di movimenti limitati e molto superficiali, che, come già accennato, assumono contorni meglio definiti e spessori maggiori lungo gli impluvi. Tuttavia, osservando i dati PSinSar, si nota come l'intero versante sia in lento movimento, e come la perimetrazione del dissesto disponibile nel Carg ben corrisponda a quanto evidenziato dal satellite. Il patrimonio edile recente (30 anni max) presente in zona d'altra parte, a detta dei residenti non è interessato da lesioni, neanche nei casi in cui i valori delle velocità sono maggiori (loc. Casarole, area critica 153, DataSet1, velocità -3.70 mm/a), ciò indica un movimento sufficientemente lento ed uniforme da non arrecare danni all'edificio.

Le considerazioni effettuate per questo dissesto sono valide anche per il dissesto in località Ballo, e sono dettate dalle condizioni idrogeologiche di questo settore del Bacino, dove la presenza di litotipi poco permeabili origina un intenso ruscellamento, che unito all'andamento prevalente a traversopoggio e franapoggio della scistosità dei micascisti ed alla presenza di depositi glaciali spessi fino a 2 m sopra adagiati, originano scivolamenti in quest'ultimi.

##### 5. Dissesto in località Renzò:

Il movimento franoso in questione è segnalato nella tesi di laurea compilata da Gianna Rizzi. Durante il sopralluogo effettuato in data 27-08-07 è stato possibile osservare una vecchia nicchia, di dimensioni limitate e non più attiva all'interno di una vallecchia a 20 m di quota sopra la strada, tra le abitazioni di località Renzò. Risalendo il versante, giunti in prossimità delle abitazioni poste a quota

410 m s.l.m. sono visibili ripetuti cedimenti nei muri a secco, di contenimento a monte del sentiero. Tali crolli non appaiono tuttavia recenti e presentano una limitata estensione laterale. Proseguendo lungo il sentiero oltre le abitazioni, si nota come i manufatti conservino la loro integrità lungo tutto il versante, e non si notano indizi di movimenti in corso. Risalendo fino a quota 500 m s.l.m. si distingue una vecchia nicchia non più attiva, localizzata all'interno di un impluvio sede di circolazione superficiale. Si riconoscono inoltre affioramenti di Servino, molto dirupati, i quali hanno originato crolli di blocchi di notevole volume nelle vicinanze di località Dossello, tuttavia non recenti.

Dal sopralluogo emerge come la perimetrazione del dissesto sia discutibile, in quanto non si riconoscono apparenze di movimento in corso in buona parte dell'area interessata, quanto piuttosto eventi di modesta entità, circoscritti o avvenuti in epoche molto lontane. Si potrebbe considerare invece l'area segnalata come un vecchio accumulo di frana, originatosi sia dai crolli avvenuti dalle pareti di Servino soprastanti, sia dai movimenti franosi locati a quota 500 m s.l.m. di cui sono ancora visibili le vecchie nicchie.

Consultando il dataset n.1 si notano 4 PS in località Renzò Nord (area critica n. 170), localizzati su edifici ampliati o realizzati in seguito al 1991. I redattori della scheda relativa all'area tuttavia hanno attribuito la causa del movimento a problemi di interazione terreno-fondazione, con un livello di attendibilità "probabile", che non esclude quindi possibili movimenti del versante, ora in corso.

## 2.2.4 ANALISI TRASPORTO LIQUIDO-SOLIDO

A partire dai parametri morfometrici del bacino e del conoide e dalla stima della portata liquida per un tempo di ritorno di 100 anni, sono state valutate la tipologia di trasporto solido e la magnitudo attesa attraverso l'applicazione di formule empiriche tratte da letteratura.

La tipologia attesa di trasporto solido prevalente è stata dedotta dalla relazione tra pendenza media del conoide e indice di Melton ed è stata confermata dai rilievi su campo come colata detritica (il bacino è a rischio di debris-flow).

Per la valutazione della magnitudo (volume mobilitabile) si è fatto ricorso all'applicazione di alcune formule empiriche di seguito riportate:

- Formula empirica di HAMPEL del 1977: la valutazione dei volumi di sedimento trasportati dalle colate detritiche è condotta in base all'area del bacino e alla pendenza del conoide alluvionale mediante la formula  $M=150*A*(J_c-3)^{2.3}$ ;
- Formula empirica di TAKEY del 1984: la valutazione dei volumi di sedimento trasportati dalle colate detritiche è condotta in base all'area del bacino mediante la formula  $M=136000*A^{0.61}$ ;
- Formula empirica di VAN DINE del 1985: la valutazione dei volumi di sedimento trasportati dalle colate detritiche è condotta in base all'area del bacino  $M=70000*A$ ;
- Formula empirica di D'AGOSTINO & al del 1996: la valutazione dei volumi di sedimento trasportati dalle colate detritiche è condotta in base all'area del bacino, alla pendenza media dell'asta principale e a due coefficienti IG e IT mediante la relazione  $M=39*A*S^{1.5}*IG*IT^{0.3}$ . Il

coefficiente IG è l'Indice Geologico che dipende dalle caratteristiche litologiche del bacino secondo la tabella dello schema seguente:

CLASSE LITOLOGICA	I.G.
Copertura morenica, alluvionale e di falda	5
Rocce metamorfiche	4
Rocce terrigene	3
Rocce laviche degradate, tufi basaltici, brecce	2
Rocce calcaree	1
Rocce porfiriche, granitiche e dioritiche	0

Il coefficiente IT è l'Indice di Trasporto basato sulla classificazione di Aulitzky secondo la tabella dello schema seguente:

CLASSE FENOMENO	I.T.
Debris flow	1
Debris flood	2
Bedload	3

- Formula empirica di BOTTINO, CRIVELLARI & MANDRONE del 1996: la valutazione dei volumi di sedimento trasportati dalle colate detritiche è condotta in base all'area del bacino mediante la relazione  $M=21241 \cdot A^{0.28}$ ;
- Formula empirica di MARCHI & TECCA del 1996: la valutazione dei volumi di sedimento trasportati dalle colate detritiche è condotta in base all'area del bacino mediante la relazione  $M=10000 \cdot A$ ;
- Formula empirica di RICKENMANN & ZIMMERMANN del 1997: la valutazione dei volumi di sedimento trasportati dalle colate detritiche è condotta in base alla pendenza del conoide alluvionale e alla distanza percorsa dalla colata, calcolata dal punto di possibile partenza al punto di deposito, mediante la formula  $M=(110-2.5 \cdot J_c) \cdot L$ ;
- Formula empirica di TROPEANO & TURCONI del 1999: la valutazione dei volumi di sedimento trasportati dalle colate detritiche è condotta in base all'area del bacino, allo spessore medio del materiale mobilizzabile (h) e alla pendenza media del bacino (tg q) mediante la formula  $M=(0.542 \cdot A+0.0151) \cdot 0.019 \cdot h \cdot \text{tg } q$ ;
- Formula empirica di CROSTA, CERIANI, FRATTINI & QUATTRINI del 2000: la valutazione dei volumi di sedimento trasportati dalle colate detritiche è condotta in base all'area del bacino, all'indice di Melton ( $M_b$ ), alla pendenza del collettore su conoide ( $S_{cl}$ ) e ai coefficienti di tipologia (K) e di franosità (IF) mediante la formula:  $M=1000 \cdot K \cdot A \cdot M_b^{0.8} \cdot S_{cl} \cdot (1/IF)^2$ .

Il coefficiente K si ricava dalla tabella dello schema seguente a seconda del fenomeno prevalente:

FENOMENO	K
Debris flow	5.4
Debris flood	3
Bedload	3

Il coefficiente di Frana (IF – Indice di Frana) si ricava dalla tabella dello schema seguente a seconda del tipo di fenomeno franoso prevalente:

TIPO FENOMENO	I.F.
Grandi frane e frane al piede	1
Frane sui versanti	2
Piccole frane o assenti	3

- Formula empirica di YAZAWA & MIZUYAM: la valutazione dei volumi di sedimento trasportati dalle colate detritiche è condotta in base all'area del bacino, al fattore correttivo (Na) ed ad un valore di riferimento per volume specifico di solidi per unità di area (Vr) mediante la formula:  
 $M=Na*A*Vr$ .

Il fattore correttivo Na è ricavabile dalla tabella dello schema seguente a seconda dell'ordine di grandezza dell'area del Bacino:

AREA BACINO	Na
Area Bacino = 0.1 Km <sup>2</sup>	3
Area Bacino = 1.0 Km <sup>2</sup>	1
Area Bacino = 10 Km <sup>2</sup>	0.5

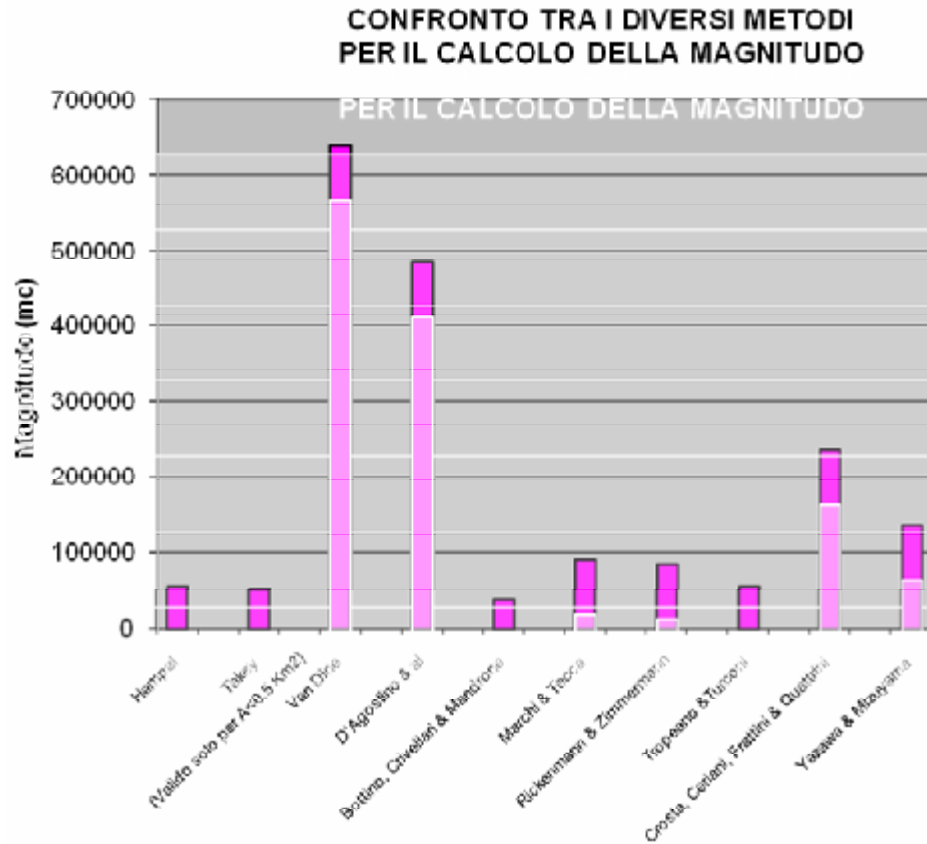
Il coefficiente Vr è ricavabile dalla tabella dello schema seguente:

TIPO DI ZONA	Vr
Zone Granitiche	50000
Zone Vulcaniche	80000
Zone Formazioni Terziarie	40000
Zone Fortemente Dissestate	100000
Altre Zone	30000

I risultati ottenuti dimostrano che il volume detritico mobilitabile risulta compreso tra 640500 mc e 33285 mc.

Dal confronto tra tutti i diversi metodi utilizzati (vedi grafico sotto riportato), si nota come i risultati dovuti a Van Dine e D'Agostino siano decisamente più elevati, quindi non verranno utilizzati per il calcolo della magnitudo media pari a 94433, valore confermato anche dalla media dei valori di magnitudo contenuti in SIBCA.





METODO	MAGNITUDO (mc)
Hampel	55609
Takey	52481
Van Dine	640500
D'Agostino & al	485160
Bottino, Crivellari & Mandrone	39480
Marchi & Tecca	91500
Rickenmann & Zimmermann	84600
Tropeano & Turconi	56708
Crosta, Ceriani, Frattini & Quattrini	237839
Yazawa & Mizuyama	137250

**Figura 15 Confronto Magnitudo**

Dalla portata di massima piena calcolata con i metodi precedentemente descritti, si è ricavata la portata massima di piena della miscela liquido-solido che risulta essere pari a 600 mc/sec per tempo di ritorno di 100 anni.

Al fine di verificare la possibile interferenza della colata detritica con l'area in esame si è proceduto calcolando l'estensione massima longitudinale del deposito, attraverso una serie di relazioni ed elaborazioni riportate in allegato (alle quali si rimanda per una verifica in dettaglio), che è risultata esser pari a circa 365 metri.

Dall'apice della conoide, ovvero dal cambio di pendenza, punto in cui si considera dovrebbe avvenire il primo fenomeno di deposizione del trasporto solido, la lunghezza di 365 metri individua un'area che arriva sino al nuovo ponte della ditta Lages.

Analizzando le caratteristiche dell'alveo che, dall'area in frana e comunque dal punto di rottura delle pendenze, presenta una geometria regolare, si può calcolare il volume massimo che può essere contenuto che è risultato essere pari a circa 20.000 m<sup>3</sup>. Questo calcolo è stato effettuato considerando semplicemente la larghezza dell'asta per la sua lunghezza. Il volume massimo derivato dai calcoli della magnitudo, pari a circa 95.000 m<sup>3</sup>, una volta colmato l'alveo per i 20.000 m<sup>3</sup> interesserebbe la conoide con i restanti 70.000 m<sup>3</sup>.

Considerando che l'ambito di conoide risulta fortemente urbanizzato, sia in sponda destra che in sponda sinistra, si è individuata l'area di possibile espansione della colata considerando la presenza di strade o ostacoli di origine antropica che possono deviare il flusso. Per un maggior dettaglio a riguardo della perimetrazione si rimanda al capitolo 3.1 per la pericolosità preliminare e 3.2 per la pericolosità finale.

## **2.3 FRANA DEL GASSO**

In seguito ai sopralluoghi effettuati, all'esame dei dati esistenti e agli approfondimenti effettuati, sono stati individuati i seguenti scenari di possibile evoluzione del dissesto. Data la giacitura della faglia K9, sulla quale si è impostata la superficie di rottura dell'evento del 2000, si ritiene di poter escludere un evento di entità analoga. La faglia in questione, infatti, si approfondisce verso le parti orientali del bacino, mentre emerge nel settore occidentale, ed i sistemi di discontinuità K1, K2 e K3 non possiedono le caratteristiche geometriche necessarie a rappresentare la superficie di rottura, se non limitatamente ad aree circoscritte e per volumi inferiori. Si ritengono pertanto più plausibili, qualora si verificassero tutte le condizioni al contorno predisponenti, scenari di medie dimensioni, quali l'arretramento della nicchia e l'allargamento del dissesto sul fianco orientale.

Infine, gli scenari inferiori ai 1000 m<sup>3</sup> sono stati già largamente riscontrati, approfonditi e la pericolosità derivante mitigata dalla realizzazione di interventi di natura passiva<sup>1</sup> (Progetto esecutivo "Messa in

---

<sup>1</sup> Sarebbe tuttavia auspicabile verificare l'efficienza delle opere realizzate con una nuova analisi traiettografica, in quanto l'altezza utile del sistema vallo-rilevato è stata notevolmente diminuita rispetto ai 6 m originali dalla deposizione di materiale limoso e dall'accumulo di notevoli quantità di detrito.

sicurezza del versante di frana e del torrente Trobiolo in comune di Pisogne, interventi di 1° fase” a cura di STUDIO MAIONE INGEGNERI ASSOCIATI, Progettista Incaricato Prof. Ing. Ugo Maione).

Sono stati esclusi dalla presente anche le zone instabili sul fianco occidentale, per le quali è stato effettuata un’analisi probabilistica dallo STUDIO MAIONE nella relazione sopra citata, cui si fa riferimento, dalla quale emergono FS sempre maggiori a 2, e cinematismi che coinvolgono cunei di  $2000\div 3000\text{ m}^3$  (Progetto esecutivo “Messa in sicurezza del versante di frana e del torrente Trobiolo in comune di Pisogne, interventi di 1° fase” a cura di STUDIO MAIONE INGEGNERI ASSOCIATI, Progettista Incaricato Prof. Ing. Ugo Maione).

Lo studio e la zonazione della pericolosità derivante dall’evoluzione del dissesto sono stati effettuati seguendo le norme dell’allegato 2 – 1.2 della L.R. 12/2005 e nel quaderno regionale di ricerca n. 34 (Regione Lombardia).

Il paragrafo descrive la procedura da adottare nel definire la zonazione della pericolosità derivante dai crolli in massa (ovvero frane con volumetria compresa tra i  $1000\text{ m}^3$  e qualche centinaia di migliaia di  $\text{m}^3$ ). La procedura proposta prevede l’identificazione delle aree soggette a crolli in massa potenziali, rilevando le fratture aperte che isolano i volumi di roccia potenzialmente instabili, in zone limitrofe a crolli già avvenuti o in zone che non sono ancora state oggetto di franamenti.

Successivamente, se possibile, si determinano per ogni area i volumi minimi, medi e massimi potenzialmente instabili, includendo l’eventuale ampliamento della nicchia di distacco di crolli già avvenuti. In base a queste volumetrie si calcolano le distanze massime raggiungibili e le relative aree di espansione dell’accumulo per ciascun volume secondo i metodi empirici disponibili in letteratura.

Ad esempio le formule proposte da:

→ Scheiddeger (1973):  $\log H/X = -0.1566 \cdot \log V + 0.62419$

→ Davies (1982):  $X = 9.98V^{0.33}$

→ Tianchi:  $\log H/L = 0.664 - 0.1529\log V$

Dove H è il dislivello disponibile fino a giungere a fondovalle, X la distanza percorribile dal materiale mobilizzato e V il volume.

I metodi citati sono validi per volumetrie elevate, risulta inoltre determinante la morfologia del pendio, nel delimitare le aree raggiungibili dal detrito, specialmente nel caso in esame, dove la distanza percorribile fino al fondovalle è limitata, tanto che durante l’evento principale l’accumulo è risalito di diversi metri sul versante opposto, fino ad una quota di 327 m s.l.m. Il fattore discriminante in questo caso risulta dunque essere la morfologia, in particolare per l’area instabile n°2 e per i volumi massimi stimati.

La zonazione della pericolosità può essere effettuata in due modi. Preferibilmente si utilizzeranno le tre volumetrie indicate (minima, media e massima) per ogni area; se questo non è possibile si applicheranno più metodi empirici che risulteranno più o meno conservativi. In questo modo si distingueranno tre distanze massime raggiungibili dalla frana e quindi tre zone di pericolosità relativa decrescenti (H4, H3, H2) con la distanza.

Per valutare l'attività delle aree di distacco e quindi passare alla pericolosità effettiva, le aree stesse vanno classificate in base al loro stato di attività:

- Non attive: se vi sono fratture aperte senza sintomi di movimento. Questa condizione è evidenziata ad esempio, dalla presenza di vegetazione antica all'interno della frattura, dall'assenza di evidenze di crolli recenti e fattori innescanti;
- Quiescenti: se sono presenti fratture aperte e persistenti e se vi è possibilità cinematica di movimento della porzione di ammasso roccioso in esame;
- Attive: se, oltre ai sintomi precedenti, vi sono anche fratture con superfici non alterate, evidenze di frequenti crolli di blocchi, blocchi ruotati, emergenze di acque, piante con radici tirate.

La pericolosità viene diminuita, mantenuta o aumentata secondo lo stato di attività della zona di distacco: rispettivamente non attiva, quiescente o attiva. In tal modo la pericolosità varia da H1 ad H5. Di seguito si riporta la descrizione delle aree instabili.

**Zona di distacco n°1:** Il caso in questione considera l'arretramento della nicchia principale della frana verso monte. L'ipotesi è supportata dall'individuazione sul terreno di sistemi di fratture disgiuntive, disposti su più ordini nella zona a monte, in corrispondenza dei quali sono stati calcolati valori di FS in condizioni drenate, senza considerare l'attrito dovuto alle discontinuità laterali pari a 1.26 in corrispondenze della frattura di trazione ubicata 10 m a monte della nicchia, e valori compresi tra 1.26÷1.28 per gli altri sistemi di fratture (Progetto esecutivo "Messa in sicurezza del versante di frana e del torrente Trobiolo in comune di Pisogne, interventi di 1° fase" a cura di STUDIO MAIONE INGEGNERI ASSOCIATI, Progettista Incaricato Prof. Ing. Ugo Maione).



La zona è soggetta a detensionamento e rottura progressiva, come confermano anche i dati di monitoraggio estensimetrici (3 mm/a nel 2001/2002). Il limite superiore della zona instabile è stato posto in corrispondenza della faglia ubicata a quota 510-515 m s.l.m. avente giacitura 20°N60°, in quanto essa possiede le caratteristiche necessarie a determinare l'isolamento a tergo del cuneo sottostante, benché la presenza di detrito a blocchi nell'area pianeggiante posta immediatamente a valle non consenta l'osservazione di evidenze di terreno. Il piano necessario allo scivolamento del cuneo è rappresentato dalla faglia K9 di giacitura 43°N45° nella parte inferiore, e 43°N65° nella parte superiore, già evidenziata dai rilievi precedenti, sulla quale si è impostata la superficie

**Figura 16** Monitoraggio estensimetrico di uno dei sistemi di tension crack

di scivolamento principale, mentre gli svincoli laterali sono offerti da sistemi quali K1 e K3.

L'arretramento della nicchia potrebbe avvenire secondo diverse modalità le quali determinano volumi coinvolti sensibilmente diversi:



**Figura 17 La faglia assunta come potenziale superficie di rottura nello scenario più gravoso**

Nel primo caso, coinvolgente il volume minimo, il crollo interesserebbe un cuneo delimitato da una frattura di trazione locata sull'area pianeggiante, a 10,5 m dalla nicchia attuale, e lateralmente dai sistemi K3 e K4. In questo caso i volumi coinvolti sarebbero pari a circa 60.000 m<sup>3</sup>.

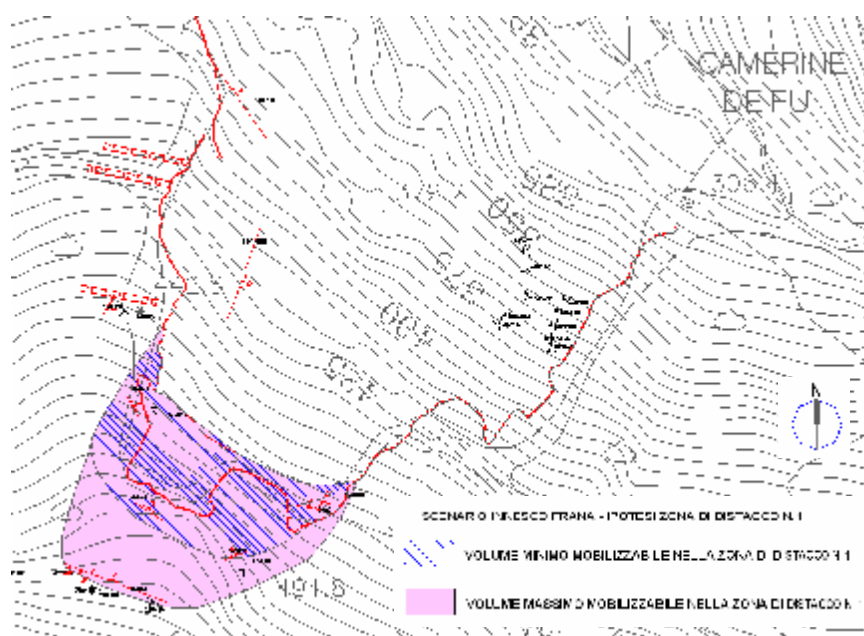
Nel secondo caso, coinvolgente il volume massimo, il cuneo sarebbe individuato, a tergo, dalla faglia avente giacitura 20°N60°, a componente normale e, in misura minore trascorrente destra, segnalata in carta.

In questo caso il prisma di roccia

raggiungerebbe proporzioni considerevoli, ed un volume pari a 125.000 m<sup>3</sup>.

Uno scenario intermedio è ipotizzabile qualora la faglia K9 assumesse nella parte superiore una geometria diversa, con inclinazione maggiore. In questo caso si assume un volume mobilizzato di circa 90.000 m<sup>3</sup>.

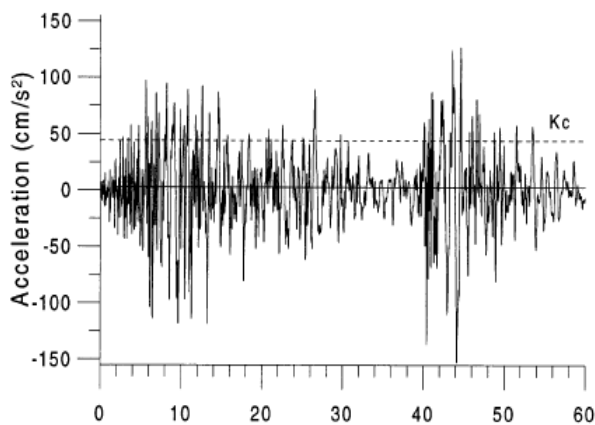
I volumi sono stati ottenuti sulla base degli elementi riportati nelle sezioni geologiche di dettaglio e nella carta della dinamica, integrandoli con quanto osservato sul terreno.



**Figura 18 Zona di distacco n.1**



Per determinare le distanze percorribili si è utilizzata la relazione proposta da Scheiddeger, in quanto la formula di Davies fornisce valori non comparabili con le altre due (non tiene conto del dislivello), mentre quella di Tianchi è meno cautelativa. Si ottengono valori pari a 260 m per lo scenario più limitato, 280 m per quello intermedio e 300 m, per quello più pessimistico. In tutti e tre i casi il materiale destabilizzato copre una distanza sufficiente a raggiungere la base del pendio, e la presenza del rilevato paramassi in terre rinforzate non è in grado di arrestare la massa, in quanto progettato per energie sensibilmente inferiori (indicativamente 5000 Kj). Utilizzando il metodo del cono d'ombra (in questo caso pari a 51°, ovvero l'inclinazione del versante), tarando le considerazioni sulla base della forma della conoide di detrito osservabile sul corpo frana, e sulla morfologia delle pareti laterali si è infine in grado di individuare la potenziale zona di accumulo.



**Figura 19** Illustrazione metodo di Newmark

Relativamente a questo scenario, sono state effettuate considerazioni sulla potenziale azione destabilizzante di un evento sismico, applicando il modello predittivo di Newmark. Tale teoria consente la valutazione dello spostamento cosismico in un dissesto franoso. (Roberto Romeo. *Seismically induced landslide displacement: a predictive model*, 2000)

I fattori di sicurezza cui si è fatto riferimento nel corso dell'analisi sono quelli riportati nello "Studio ed analisi numerica del fenomeno franoso,

relazione conclusiva", al paragrafo 3.3. Progetto esecutivo "Messa in sicurezza del versante di frana e del torrente Trobiolo in comune di Pisogne, interventi di 1° fase" a cura di STUDIO MAIONE INGEGNERI ASSOCIATI, Progettista Incaricato Prof. Ing. Ugo Maione e riportato nella presente al capitolo 3.3.7.

Il primo parametro da determinare nell'effettuare l'analisi è l'accelerazione critica KC, ovvero una soglia oltre la quale il valore di accelerazione è in grado di indurre spostamento nella massa instabile. Nelle analisi pratiche si trascura la componente verticale dell'accelerazione, poco influente sulla stabilità, e si considera la sola componente orizzontale agente sul pendio. Quando i picchi dell'accelerogramma superano il valore di KC, la velocità relativa tra la porzione instabile e la sua base aumenta, fino a che l'accelerazione cui il pendio è sottoposto torna al di sotto della soglia. Lo spostamento cosismico cumulativo continua a crescere per le forze inerziali, fino a che il valore della velocità relativa torna ad essere pari a zero.

L'accelerazione critica è data da:

$$K_C = (SF-1) \tan \beta$$

( $K_C$  orizzontale,  $\beta$  corrispondente all'inclinazione del piano di faglia)



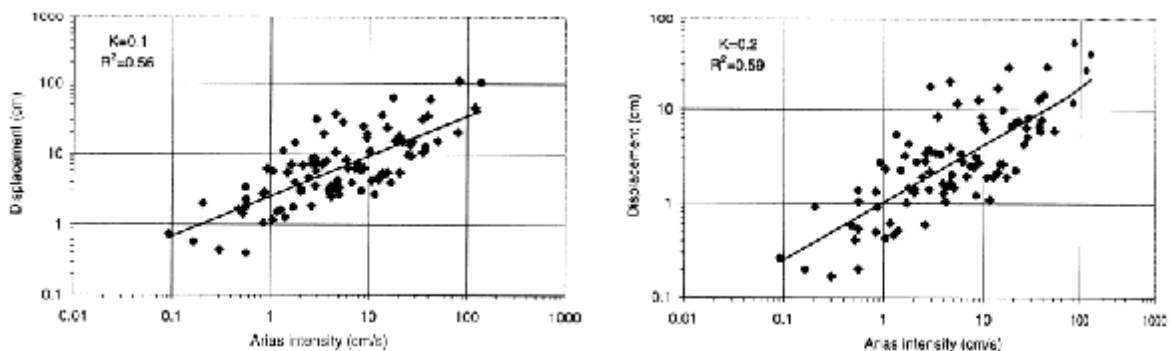
Lo spostamento cumulativo finale è dato dalla doppia integrazione nel dominio del tempo dell'accelerazione che eccede il valore di  $K_C$ .

$$D = \int_0^t \int_0^t [a(t) - K_C \cdot g] dt^2$$

Per definire lo spostamento cosismico cumulativo come una funzione dei parametri sismici della registrazione accelerometrica, si è proceduto a normalizzare l'accelerazione critica con PGA, individuando il parametro K, ovvero il rapporto di accelerazione critica.

$$K = K_C \cdot g / \text{PGA}$$

Il parametro K varia tra zero e l'unità, e sono stati fissati nove step, da 0.1 a 0.9 secondo un incremento di 0.1, escludendo i valori estremi. Per  $K = 0$ , infatti, lo spostamento tende ad infinito, mentre per  $K = 1$  non avviene alcuno spostamento cosismico. L'utilizzo del parametro K piuttosto che  $K_C$ , ha mostrato una migliore correlazione (0.87 contro 0.48) tra spostamento ed intensità di Arias<sup>2</sup>, richiede tuttavia la conoscenza di PGA. Nei grafici successivi sono plottati lo spostamento e l'Intensità di Arias corrispondente per i valori di K corrispondenti al caso in analisi. Il parametro  $K_C$  è stato quantificato per lo scenario in esame in 0.022, mentre i conseguenti valori di K determinati dai valori di  $I_A$  dei sei accelerogrammi considerati variano tra 0.169 e 0.244, risultando compresi negli intervalli riportati in fig.19.



**Figura 20 Spostamento cosismico su intensità di Arias per i valori di K 0.1 e 0.2**

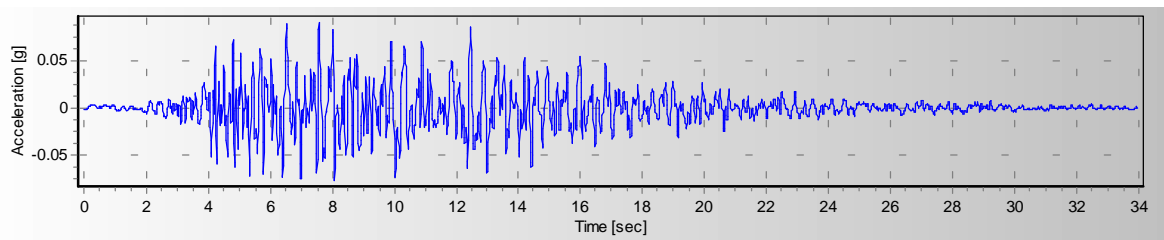
Al fine di ottenere valori di spostamento dettagliati, nella presente è stata utilizzata la relazione empirica:

$$\text{Log}_{10} D = 0.607 \cdot \log_{10} \cdot I_A \text{ (cm/s)} - 3.719 \cdot K + 0.852$$

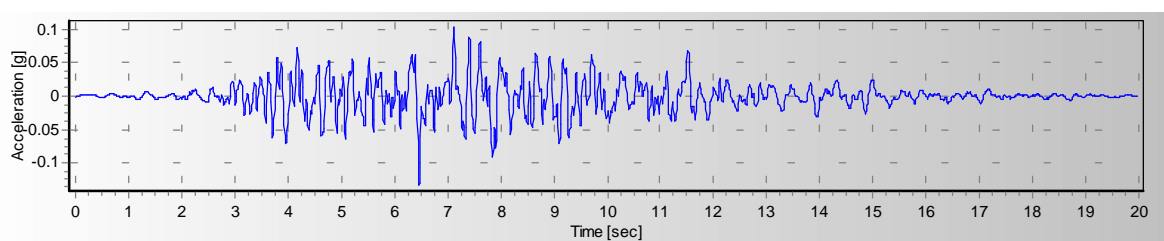
L'analisi è stata eseguita utilizzando gli accelerogrammi forniti dalla regione per il comune di Pisogne, corrispondenti ad un periodo di ritorno di 475 anni. Si tratta di sismogrammi sintetici, appositamente elaborati per rappresentare gli effetti delle coppie M e r più influenti sulla pericolosità, evidenziate eseguendo una deagggregazione sui risultati delle analisi probabilistiche.

<sup>2</sup> L'intensità di Arias è una dei parametri sismici più rappresentativi del contenuto energetico di un sisma. Dimensionalmente è una velocità, ed è così definita:  $I_A = \pi / 2g \int_0^t [a(t)]^2 dt$ .

Gli accelerogrammi utilizzati hanno magnitudo pari a 5.5, 6 e 6.5, e distanze epicentrali variabili tra 11.9 e 46 km. In calce vengono riportate le storie temporali dei segnali aventi il valore massimo e minimo di  $A_{MAX}$ . Tutti i parametri di scuotimento necessari sono stati calcolati con il programma Sismo Signal.



**Figura 21 Accelerogramma n°4, Magnitudo 6 e distanza epicentrale 30 Km.  $A_{MAX} = 0,091$  g**



**Figura 22 Accelerogramma n°5, Magnitudo 6.5 e distanza epicentrale 29.4 Km.  $A_{MAX} = 0,132$  g**

I risultati conseguiti sono riportati nella tabella seguente:

**Tabella 14: Parametri dei diversi accelerogrammi utilizzati nella verifica e rispettivi valori di spostamento cosismico ottenuti**

	<b>Acc. 1</b>	<b>Acc. 2</b>	<b>Acc.3</b>	<b>Acc.4</b>	<b>Acc.5</b>	<b>Acc.6</b>
<b>Magnitudo</b>	5.5	5.5	6	6	6.5	6.5
<b>Distanza (Km)</b>	11.9	19.4	19	30	29.4	46
<b><math>A_{MAX}</math> (g)</b>	0.11	0.107	0.1	0.09	0.13	0.11
<b><math>I_A</math> (Cm/s)</b>	13.1	18.4	13.8	19.3	14.9	19
<b>Spostamento cosismico (Cm)</b>	6.115	7.163	5.318	5.287	8.605	7.663

Osservando i parametri di scuotimento delle tracce si nota come le combinazioni M - r ipotizzate dalla Regione Lombardia si traducano in una buona varietà dei valori  $A_{MAX}$  e  $I_A$ , che ben rappresenta i diversi scenari possibili. Gli eventi cui è attribuita una maggior distanza presentano un contenuto energetico più elevato determinato dalla maggior durata del segnale. L'intensità di Arias tuttavia non è determinante come  $A_{MAX}$  nel causare lo spostamento (si osservi ad esempio l'accelerogramma n°4). D'altra parte è il valore di accelerazione alla base del modello, infatti, i valori maggiori di spostamento cosismico sono stati causati dagli eventi con l'accelerazione di picco più alta.

Dato che per i pendii in roccia è assunto un valore di spostamento critico pari a 5 cm, è chiaro che tutti gli eventi considerati andrebbero potenzialmente a destabilizzare la massa instabile. Bisogna tuttavia considerare il margine di errore delle relazioni utilizzate, evidenziato dalla fig. 19.

Se gli eventi 1, 3 e 4, che si approssimano al valore limite, potrebbero anche non causare il collasso del cuneo, per gli accelerogrammi 2 e 5 e 6 l'innescò della frana è determinato con un buon margine.

**Zona di distacco n°2:** Lo scenario in questione è individuato sul fianco orientale della frana. I sopralluoghi effettuati hanno evidenziato la presenza di tension crack recenti, non segnalati durante i



**Figura 23 La frattura disgiuntiva più interna**

poco accennato. L'ubicazione nella parte basale è stata posta sulla base della morfologia e dell'andamento dei limiti attuali della zona in frana.

rilievi ARETHUSA e MAIONE, i quali escludevano possibili cinematismi di distacco in quest'area. Particolarmente evidente quello posto ad E dello sperone isolato a quota 460 m s.l.m., avente apertura decimetrica, posto a pochi metri dalla nicchia attuale: l'esiguo volume di roccia che esso delimita appare ormai prossimo al collasso.

Una seconda frattura disgiuntiva, meno evidente e mascherata nella parte a valle dalla folta vegetazione, è posta più ad E, in corrispondenza di un impluvio



**Figura 24 La seconda frattura disgiuntiva individuata**

hanno di fatto confermato la presenza di una terza frattura di trazione, meno recente e più alterata, che borda l'area in allentamento. È dislocata tra quota 480 e 460 m s.l.m. ad W della cresta avente direzione circa N-S che delimita l'area potenzialmente interessabile dal dissesto. Appare improbabile che il fenomeno possa propagarsi ad E del dosso sopra citato, in quanto quest'ultimo costituisce un elemento di maggior resistenza nella stabilità del versante. A quota 435 m s.l.m., in corrispondenza di una prominente della cresta stessa si trovano gli unici affioramenti di questo settore esterni all'area attualmente in frana; la carniola si presenta molto piegata, e presenta giaciture a reggipoggio e a traversopoggio, le quali possono favorire l'evoluzione del fenomeno. Gli affioramenti presentano la

Osservando il settore orientale dal versante prospiciente si percepisce inoltre come il fenomeno potrebbe propagarsi ad una più ampia porzione di pendio, come messo in luce anche dalla scheda sull'area critica n°159 dello studio "Interpretazione geologica dei dati ottenuti dall'interferometria differenziale SAR" (cfr paragrafo 1.1.3), realizzato dal dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pavia in collaborazione con lo studio Savazzi. Le

verifiche condotte ai margini dell'area



famiglia di discontinuità K2 con giacitura  $10^{\circ}N60^{\circ}$ , spaziatura pari a 1,5 m ed apertura decimetrica che riveste un ruolo fondamentale nella dinamica dell'allentamento, come svincolo a tergo. Dato che l'inclinazione del sistema è maggiore di quella del pendio, l'ipotesi che su di essa si imposti il piano di scivolamento è vincolata alle aree situate sopra la nicchia attuale, dove il versante non ha sostegno al piede e si presenta in arretramento, la base del pendio è infatti protetta da opere di difesa spondale, pertanto non presenta fenomeni di erosione al piede.

Secondo un'altra ipotesi la superficie di scivolamento potrebbe essere rappresentata da una struttura di neoformazione favorita dall'assetto a traversopoggio, localmente presente soprattutto nelle porzioni inferiori del pendio, mentre nella parte medio – alta, a letto del limite con i Calcari di Angolo, la giacitura dominante è a reggipoggio.

Difficilmente, la faglia K9 potrebbe fungere da superficie di rottura, in quanto essa sembra approfondirsi verso le porzioni orientali del bacino.

Un elemento di svincolo laterale potrebbe essere fornito dalla faglia subverticale avente direzione N-S riportata nella cartografia Carg, la cui ubicazione è più ad E di quanto ipotizzato in quanto essa non è visibile negli affioramenti messi a giorno dalla frana. Oppure dai sistema di discontinuità K1, e K3 presenti in tutto l'intorno della frana.



**Figura 25 Frattura del set K2 rilevata nel settore orientale**

L'analisi con il software Slope-rock non ha fornito elementi significativi nello stimare la profondità del piano di rottura, in quanto vengono ipotizzate improbabili superfici di rottura circolari, a profondità notevoli e non compatibili con quelle riscontrate nella porzione centrale e attuale del dissesto, con la stessa probabilità e fattori di sicurezza simili ad eventi con profondità analoghe o minori di quelle già rilevate. Il meccanismo di rottura della frana in esame risulta difficilmente modellizzabile con il software utilizzato, essendo definito da

una combinazione di scorrimenti rotazionali e traslazionali largamente determinati da superfici di discontinuità, con crolli associati.

Tuttavia i fattori di sicurezza elaborati ipotizzando una superficie di rottura di neoformazione, con profondità analoghe, o minori di quelle osservate, sono sempre maggiori ad 1.3, anche diminuendo notevolmente i parametri geotecnici immessi nel modello.

Date le evidenze di terreno, che confermano l'attività del dissesto nelle parti più interne, e quantomeno uno stato quiescente in quelle più esterne, è quindi ragionevole supporre la presenza di elementi di discontinuità, occultati dalla diffusa copertura detritica e vegetale diffusa nel settore, che facilitino il movimento. Un altro fattore di aggravio potrebbe essere rappresentato da perdite d'acqua di rilevante entità dalla condotta forzata che attraversa il versante a circa 10÷15 m, ed è visibile più ad

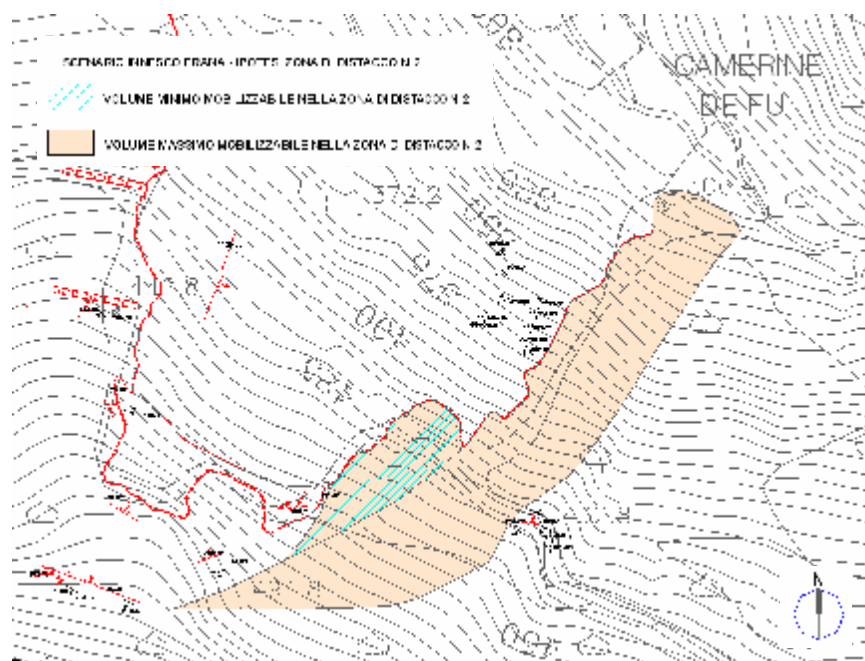
E sul sentiero che conduce da Terzana all'area in frana. L'ipotesi della presenza di una falda nel pendio in esame è poco verosimile, data l'elevata permeabilità per fratturazione e dissoluzione dell'ammasso, tuttavia in corrispondenza di eventi meteorici eccezionali potrebbe instaurarsi una parziale saturazione del versante, tale da causare movimenti "a scatti" della porzione instabile.

Nei computi volumetrici, effettuati in base alle sezioni geologiche di dettaglio, e agli elementi (fratture disgiuntive) individuati sul campo, si è ipotizzata una superficie di rottura ad una profondità media di 15/20 m, dato che ci si trova nelle porzioni marginali del dissesto, contenuto dalla presenza della cresta.

Nell'ipotesi che il crollo interessi unicamente la porzione delimitata dalla seconda frattura disgiuntiva si mobiliterebbero volumi pari a 40.000 m<sup>3</sup>, cui bisogna aggiungere il volume del torrione in roccia (circa 80 m<sup>3</sup>) che verrebbe certamente destabilizzato dal crollo.

Assumendo, al contrario, che il collasso coinvolga la porzione di versante sopra citata congiuntamente alla sezione delimitata dalla frattura di trazione più esterna, locata nei pressi della cresta si ottengono volumi complessivi di circa 135.000 m<sup>3</sup>. I volumi complessivi si riducono a 100.000 m<sup>3</sup>, se si considera una superficie di rottura posta a profondità medie di 10 m, ipotesi peraltro verosimile vista la forma concava dell'area in frana attuale, la quale determina una maggiore superficialità delle superfici suddette nelle aree periferiche.

Utilizzando la relazione empirica di Scheiddeger si ottengono, per le tre volumetrie indicate, le seguenti distanze, in ordine crescente: 250 m, 290 m e 300 m. Anche in questo caso è dunque la morfologia del pendio a rivestire un ruolo discriminante: anche il volume minimo di 40.000 m<sup>3</sup> raggiunge il fondovalle. È pertanto opportuno stimare, ai fini della pericolosità, la quota cui risalirebbero gli accumuli di frana sul versante opposto.



**Figura 26 Zona di distacco n. 2**

Il verificarsi simultaneo degli scenari 1 e 2 è poco probabile, data la diversa dinamica delle dinamiche ipotizzate. Inoltre in tutti e due i casi si sono riscontrate evidenze di terreno, come ripetuti sistemi di *tension crack*, e l'elevata fratturazione dell'ammasso, che fanno presupporre una propagazione graduale del fenomeno, con eventi intermedi e volumetrie in gioco sensibilmente minori. I computi volumetrici sono inoltre stati effettuati in maniera punitiva, arrotondando per eccesso. Gli scenari illustrati sono dunque il frutto delle ipotesi più peggiorative possibili. Considerando infine che parte del materiale si fermi in corrispondenza della conoide di detrito sviluppatasi al centro della zona in frana o nelle parti basali dell'accumulo, si ottengono volumetrie in alveo del tutto analoghe a quelle previste dallo scenario di esondazione con colata detritica del torrente Trobiolo.



## 3.0 FASE DI SINTESI E PROPOSTE

### 3.1 ANALISI SCENARI DI PERICOLOSITA'

Lo studio e la zonazione della pericolosità sul conoide sono stati condotti seguendo le indicazioni contenute nell'allegato 2 – 4 della L.R. 12/2005 e nel quaderno regionale di ricerca n.34 (Regione Lombardia).

In particolare si sono seguite le indicazioni fornite dalla Regione Lombardia per la valutazione della pericolosità in ambito di conoidi alpine, interessate da trasporto solido e/o in massa (bed load, debris flood, debris flow, debris torrent) o per colate detritiche di tipo debris flow e debris avalanche.

Nello specifico si è ricostruito un quadro spaziale e temporale dei fenomeni che hanno interessato la conoide (vedi paragrafo 1.1.4) in modo da avere indicazioni sulla frequenza di accadimento degli eventi.

A questa prima fase ha fatto seguito una caratterizzazione geomorfologica ed idraulica della conoide, porgendo particolare attenzione all'individuazione di punti critici sulla conoide (sezioni ristrette, attraversamenti, curve), e alla delimitazione delle aree con diversa influenza del deflusso delle portate solido-liquide. Si è infine proceduto con il calcolo della magnitudo ovvero del volume massimo mobilabile lungo l'asta torrentizia.

Tutte le informazioni raccolte nei paragrafi precedenti hanno contribuito alla realizzazione della carta di pericolosità preliminare su conoide che è stata condotta considerando distintamente il caso di esondazione del Torrente Trobiolo per la sola portata liquida e per il caso di trasporto solido.

Inoltre, seguendo le indicazioni contenute nell'allegato 2 della L.R. 12/2005, si è proceduto perimetrando l'area in frana e assegnando a tale area la pericolosità derivata dall'analisi degli scenari del paragrafo 2.3.

#### 3.1.1 INFLUENZA FATTORI ANTROPICI

In questo paragrafo si vuole sottolineare la possibile influenza di alcuni fattori antropici sul possibile innesco della Frana del Gasso. In particolare gli elementi che appaiono maggiormente influenti sono:

- La condotta d'acqua che convogliando parte delle acque del Torrente Trobiolo, arriva sino alla vasca a monte dell'abitato di Govine, passando in sotterraneo a tergo dell'area in frana.
- La vasca d'accumulo presente a monte della nicchia di frana oggi ridotta a rudere, che serviva come bacino di carico per una centrale ormai dismessa.
- Briglia e vasca di laminazione: progetto in fase di realizzazione di una nuova briglia e relativa vasca di laminazione.

La condotta d'acqua e la vasca d'accumulo interessano l'area instabile n°2. I fattori di sicurezza determinati con il software slope-rock per il settore in questione, alla luce delle conoscenze geologiche e geomeccaniche attuali, non sono tuttavia così bassi da giustificare lo stato di allentamento del

versante visibile sul terreno. Bisogna specificare che i risultati delle simulazioni sono afflitti da una certa incertezza, in quanto la tipologia del dissesto risulta difficilmente modellizzabile, data l'elevata fratturazione dell'ammasso e la complessità della superficie di scivolamento, avente componenti rotazionali e traslazionali (quest'ultime impostate su discontinuità geomeccaniche). Tuttavia, data l'assenza nel settore di sistemi aventi angolo di inclinazione tale da permettere l'uscita a giorno della superficie di rottura bisogna supporre che la rottura sia governata dalla resistenza dell'ammasso roccioso, a meno di elementi di discontinuità ad oggi sconosciuti. Nel settore indicato la stratificazione della Carniola di Bovegno si presenta a reggipoggio nelle porzioni medio-alte del versante, e a traversopoggio e localmente a franapoggio nella parte medio-bassa, ciononostante, anche diminuendo notevolmente i parametri geotecnici utilizzati nelle simulazioni, i valori di  $F_s$  non scendono mai sotto 1.3. È pertanto lecito supporre che uno dei fattori sopra citati intervenga ad aggravare le condizioni di stabilità, saturando parzialmente il versante, anche se l'ipotesi di una falda vera e propria appare di difficile verosimiglianza. Durante i rilievi è stata constatata la presenza di un'incisione recente ed abbastanza profonda a valle della vasca d'accumulo posta a monte della nicchia, che testimonia importanti quantità d'acqua convogliate verso l'area attualmente in frana, ma non verso le aree instabili individuate nella presente, le quali ne vengono soltanto bordate. Pertanto un ruolo determinante potrebbe essere rivestito da perdite e infiltrazioni dalla condotta d'acqua, che transita a circa 10÷15 m di profondità proprio nel settore considerato.

In definitiva, se allo stato attuale non è possibile attribuire con certezza la responsabilità dell'evento ai fattori antropici sopra citati, appare tuttavia con evidenza come essi abbiano accelerato le dinamiche di allentamento del versante già naturalmente in atto. Appare quindi necessario ed assolutamente indispensabile verificare lo stato attuale della vasca di accumulo e della condotta, con lo scopo di definire e quantificare le infiltrazioni di acqua nel versante.

La realizzazione della briglia e della vasca di laminazione, delle quali allo stato attuale si hanno solo indicazioni sull'ubicazione e nessun dettaglio preciso, avrebbe al contrario un effetto positivo sulla stabilità del versante, in quanto andrebbe a proteggere ulteriormente il piede del versante dall'erosione e, congiuntamente ad un eventuale opera di rivestimento in pietrame, eviterebbe fenomeni di infiltrazione e conseguente dissoluzione dei gessi presenti nel sottosuolo.

### **3.1.2 SCENARIO ESONDAZIONE TORRENTE TROBIOLO**

In questo scenario si è considerata l'ipotesi di esondazione del Torrente Trobiolo a seguito di eventi meteorologici intensi, legata al possibile innesco della sola portata liquida massima attesa e di quella liquida e solida lungo l'apparato di conoide.

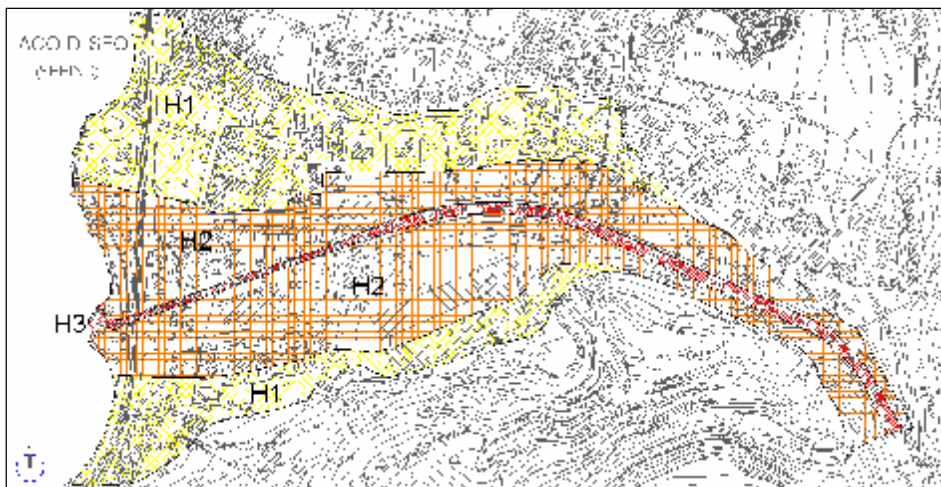
Nei paragrafi precedenti sono state condotte analisi e verifiche sul bacino, allo scopo di ricavare le portate di massima piena da utilizzare nei calcoli e nelle verifiche dei deflussi liquidi e liquido-solidi lungo il torrente e definire quindi le condizioni di pericolosità dell'apparato di conoide. Si rimanda pertanto a tali paragrafi per una più accurata analisi dei dati utilizzati.

Lo studio e la zonazione della pericolosità generata da esondazione e da trasporto in massa lungo l'apparato di conoide è stata condotta seguendo le indicazioni contenute nell'allegato 2 – 4 della L.R. 12/2005 e nel quaderno regionale di ricerca n.34 (Regione Lombardia).

La perimetrazione è stata rappresentata in scala 1:2000 facendo riferimento al caso dell'esondazione della sola fase liquida (Allegato 08) e al caso della possibile formazione di colata detritica (Allegato 09).

Vengono distinte due situazioni corrispondenti al CASO 1 di sola portata liquida e al CASO 2 con trasporto solido.

**CASO 1: ESONDAZIONE DEL TORRENTE TROBIOLO PER LA SOLA FASE LIQUIDA (TAVOLA 08)**



**Figura 27 Stralcio carta pericolosità nel caso di esondazione del Torrente Trobiolo della sola fase liquida**

La carta di pericolosità nel caso di esondazione del Torrente Trobiolo della sola fase liquida è stata realizzata utilizzando tre classi “accorpate” di pericolosità:

- PERICOLOSITA' BASSA H1 (colore giallo)
- PERICOLOSITA' MEDIA H2 (colore arancio)
- PERICOLOSITA' ALTA H3 (colore rosso)

Come si può vedere nello stralcio sopra riportato, l'area interessata dalla pericolosità alta comprende il solo alveo torrentizio e le aree limitrofi (assai limitate) nei dintorni del punto di confluenza con il lago d'Iseo. Si tratta delle zone direttamente coinvolte da fenomeni di esondazione che, come dimostrato dalle analisi idrauliche riportate nei paragrafi 2.2 interessano il solo alveo e le sponde del torrente Trobiolo.

La pericolosità media è relativa alle aree più prossime all'alveo sia in sinistra che in destra idrografica che risultano esterne alla zona direttamente esondabile (per sola portata liquida) ma che, proprio per la loro vicinanza al corso d'acqua, devono essere analizzate in dettaglio in caso di modifiche allo stato morfologico e antropico dei luoghi attuale.

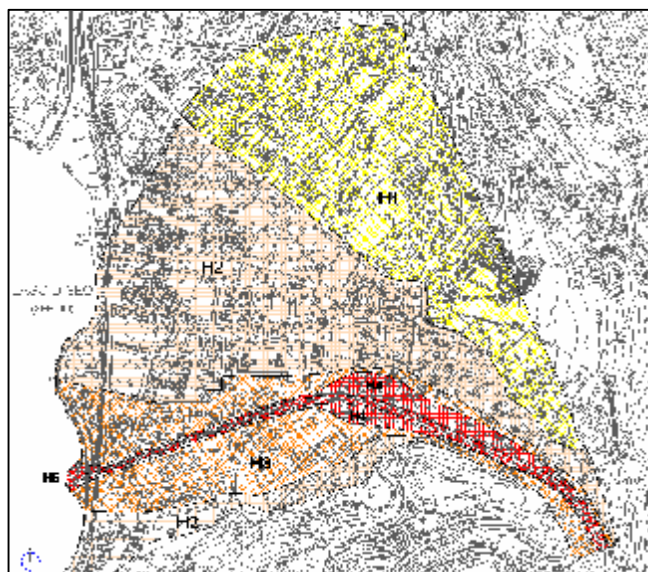
Le aree che potrebbero essere colpite da fenomeni di esondazione con bassa pericolosità sono localizzate nelle fasce esterne, definite da limiti naturali quali pendii e innalzamenti della topografia, e da limiti antropici, quali strade, che risultano vie preferenziali per il deflusso delle acque verso valle. In questo caso le zone potrebbero venire coinvolte sono in casi eccezionali per forti deviazioni del flusso di acqua.

La perimetrazione è stata effettuata considerando che già nelle verifiche idrauliche condotte da IDRO s.r.l. con modello idraulico nel giugno 2005, si rilevava l'assenza di fenomeni di esondazione.

### CASO 2: ESONDAZIONE DEL TORRENTE TROBIOLO CON FORMAZIONE DI TRASPORTO SOLIDO (TAVOLA 09)

La carta di pericolosità relativa al caso di esondazione del Torrente Trobiolo con formazione di trasporto solido è stata realizzata utilizzando le seguenti classi di pericolosità:

- PERICOLOSITA' MOLTO BASSA H1  
(colore giallo)
- PERICOLOSITA' BASSA H2  
(colore arancio chiaro)
- PERICOLOSITA' MEDIA H3  
(colore rosso chiaro)
- PERICOLOSITA' ALTA H4  
(colore rosso)
- PERICOLOSITA' MOLTO ALTA H5  
(colore rosso intenso)



**Figura 28 Stralcio carta pericolosità nel caso di esondazione del Torrente Trobiolo con formazione di colata detritica**

Le analisi dei volumi massimi mobilitabili in caso di trasporto in massa lungo la conoide (paragrafo 2.2.4) hanno fornito valori molto diversi e si è deciso in tal senso di adottare come dato di progetto il valore di  $V_{max}=95.000$  mc, a cui corrisponde una portata massima liquido-solida pari a 600 mc/sec.

Dai calcoli della lunghezza massima di propagazione della colata dal punto di rottura di pendenza, verso valle, si sono ottenuti valori pari a 365 mt. In tale distanza, maggiorata a favore di sicurezza, si è tenuto il limite per la definizione dell'area potenzialmente coinvolta negli eventi a maggiore intensità con forte capacità distruttiva ovvero pericolosità H4 e H5.

In sito, percorrendo l'area di conoide, è ben individuabile il passaggio tra le due situazioni morfologiche molto diverse che hanno costruito l'apparato sedimentario della conoide del Trobiolo, ovvero la porzione più "alta" e quella più "bassa". La prima si estende dall'apice dell'apparato di conoide, comprendendo Minico e la zona a monte di Borne e si differenzia dalla zona "bassa" per la

presenza di un salto morfologico molto evidente che improvvisamente, procedendo dall'alto (della conoide) verso il basso, è percepibile attraverso la visuale delle abitazioni di fondovalle che risultano molto più basse della porzione alta che degrada invece con pendenza regolare verso lago.

Si tratta delle zone inserite nella classe di pericolosità H4 e H5 alle quali seguono le aree H3 esterne a queste.

Nelle zone H5 e H4 è ragionevole supporre che si verifichi la deposizione della maggior parte del materiale trasportato dalla corrente ovvero grossi blocchi, massi, ghiaia e fango. Una volta che la massa detritica rallenta e si ferma, soprattutto per la presenza di numerosi ostacoli come costruzioni, muri, strade ecc, rimane la fase più liquida e fangosa che invade le aree limitrofe, determinando la perimetrazione della zona definita come H3.

In questo caso si tratta delle zone che già vennero interessate da eventi di esondazione nel corso dell'evento catastrofico del 1953, ampliate a favore i sicurezza.

Nello schema fotografico di seguito riportato, è evidenziata l'area che nel 1953 interessò l'apparato di conoide, dalla quale si ricava che la zona maggiormente colpita era stata proprio la sponda sinistra orografica di località Borne.



Le aree individuate a pericolosità media H3 sono state identificate a favore di sicurezza, come aree marginali al vero fenomeno di dissesto, potenzialmente coinvolte per deviazioni dei flussi dotati di maggior mobilità liquido e liquido fangosi ma di minor energia. Si tratta comunque di aree di fatto protette dall'edificato esistente a monte che taglia trasversalmente il flusso delle colate detritiche e ne attutisce e smorza fortemente l'effetto. Rimangono le aree H2 ed H1 che sono marginali e difficilmente coinvolte in eventi di dissesto.



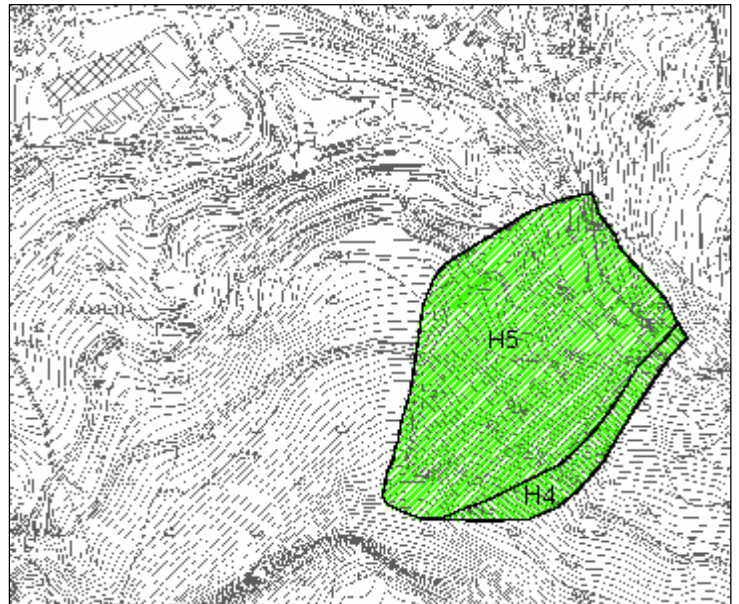
### 3.1.3 SCENARIO INNESCO FRANA DEL GASSO

La pericolosità derivante dallo scenario dell'innescò della Frana del Gasso è stata individuata e analizzata secondo le procedure della Regione Lombardia contenute nell'allegato 2 della L.R. 12/05. In particolare si è fatto riferimento agli scenari di crolli in massa di medie dimensioni (cfr paragrafo 2.3). Nella prima ipotesi è stata considerata la possibilità del distacco di un cuneo ubicato a monte dell'attuale nicchia di distacco. Nelle altre due ipotesi si è invece considerato il possibile ampliamento laterale sul fianco orientale dell'area interessata dal dissesto.

Si è proceduto utilizzando la formula di Scheiddeger (1973) che, a partire da parametri quali il volume mobilizzabile (V) e il dislivello del pendio (H), fornisce una stima della distanza percorribile dai blocchi (X):

$$\log \frac{H}{X} = (-0.15666 \cdot \log V) + 0.62419$$

Per quanto concerne l'area instabile n°1, i volumi potenzialmente mobilizzabili sono, in ordine crescente 60.000 m<sup>3</sup>, 90.000 m<sup>3</sup> e 125.000 m<sup>3</sup> nell'ipotesi più peggiorativa. Le distanze percorribili calcolate con la formula di Scheiddeger sono, rispettivamente pari a 260 m per lo scenario più limitato, 280 m per quello intermedio e 300 m, per quello più pessimistico. In tutti e tre i casi il materiale destabilizzato copre una distanza sufficiente a raggiungere la base del pendio, e la presenza del rilevato paramassi in terre rinforzate non è in grado di arrestare la massa, in quanto progettato per energie sensibilmente inferiori (indicativamente 5000



**Figura 29** Stralcio perimetrazione preliminare area in frana

Kj). Utilizzando il metodo del cono d'ombra (in questo caso pari a 51°, ovvero l'inclinazione del versante), tarando le considerazioni sulla base della forma della conoide di detrito osservabile sul corpo frana, e sulla morfologia delle pareti laterali si è infine in grado di individuare la potenziale zona di accumulo.

Relativamente all'area instabile n°2, i volumi instabili si attestano a 40.000 m<sup>3</sup> nell'ipotesi più ottimistica, mentre salgono a 100.000 m<sup>3</sup> nell'ipotesi intermedia e a circa 135.000 m<sup>3</sup> nello scenario più gravoso. Utilizzando la relazione empirica di Scheiddeger si ottengono, per le tre volumetrie indicate, le seguenti distanze, in ordine crescente: 250 m, 290 m e 300 m. Anche in questo caso è dunque la morfologia del pendio a rivestire un ruolo discriminante: anche il volume minimo di 40.000 m<sup>3</sup> raggiunge il fondovalle.



Non avrebbe dunque significato pratico procedere ad una zonazione graduale del versante in frana, dato che anche nelle ipotesi più ottimistiche il materiale raggiunge il fondovalle. Si è optato per attribuire al settore centrale un valore di pericolosità effettiva H5, data l'attività rilevata, mentre un valore di pericolosità effettiva H4 al settore periferico orientale, cui è stato attribuito uno stato di attività corrispondente a quiescente.

Le aree perimetrate con pericolosità H5 e H4 comprendono la porzione basale del versante opposto poiché, sulla base dei dati disponibili, delle osservazioni effettuate e delle elaborazioni eseguite, il materiale risale andando a depositarsi sino a quella fascia.

La perimetrazione preliminare dello scenario di innesco della frana del Gasso è stata rappresentata in scala 1:2000 ed è contenuta nell'allegato 10.

### 3.1.4 PERICOLOSITA' SCENARIO TORRENTE TROBIOLO E FRANA GASSO

Questo scenario è indubbiamente il più catastrofico che si possa immaginare.



Debbono verificarsi in concomitanza di evento, l'innesco della frana del Gasso e la formazione di colate detritiche lungo l'asta del Trobiolo.

Nella condizione più gravosa si tratta di immaginare che il torrente possa venire ostruito dall'accumulo di frana generato dal distacco dell'area ritenuta instabile di monte nicchia e lato

destro, con sviluppo di volumi molto variabili nell'ordine comunque dei 100.000 mc. In tal caso, come è già avvenuto nell'anno 2000, si formerebbe una sorta di lago di sbarramento ed il sopraggiungere di nuovo materiale di colata dal torrente potrebbe irrompere sullo sbarramento trascinandolo a valle. Dei 100.000 mc che ipoteticamente possono sbarrare il torrente, è ragionevole supporre che parte di questo materiale rimanga al piede della frana e non possa venire mobilitati dalle acque (si tratta soprattutto delle porzioni laterali di sponda destra e sinistra orografica). In tal caso, a favore di sicurezza, si considera che possa venir messo in movimento il 70% del volume che corrisponde a circa 70.000 mc che, sommati ai 90.000 mc portano ad un volume totale di 160.000 mc.

In tal caso l'area di possibile influenza diretta del materiale solido è stata perimetrata con pericolosità H4 e H5, alla quale fanno seguito le aree H3 ed H2 marginali. Si tratta chiaramente di una porzione ben più vasta di aree coinvolte in dissesto, rispetto all'area perimetrata per il solo evento di trasporto solido in massa dal Torrente Trobiolo, che si estende in questo caso dall'apice di conoide sino al lago. Anche in questo caso, come per l'analisi sviluppata al paragrafo 3.1.1, valgono le medesime considerazioni circa la zona di forte rallentamento e quindi deposizione del materiale solido, corrispondente con il passaggio dalla zona "alta" a quella "bassa" di conoide e delle zone dove di fatto buona parte dei deflussi vengono mitigati e "laminati" dall'edificato esistente.



### **3.2 PROPOSTA DI RIPERIMETRAZIONE DELL'AREA 267** (cod. 146-LO-BS)

Con la prima fase di applicazione della legge 267/98 la Struttura Rischi Idrogeologici della Regione Lombardia ha perimetrato 129 siti a rischio per dissesti sui versanti e per fenomeni di trasporto in massa su conoide. A seguito degli eventi dell'autunno del 2000 sono stati aggiunti altri 26 siti tra i quali il sito 146-LO-BS oggetto del presente studio di ripерimетrazione, e classificato come Frana di scivolamento della Val Trobiolo. Il Piano Straordinario della legge 267/98 l'Autorità di Bacino del Fiume Po ha individuato per quest'area due zone alle quali sono associate le prescrizioni di limitazioni d'uso del suolo in base alla pericolosità, distinguendo la zona 1 e la zona 2 con relative diverse limitazioni d'uso del suolo.

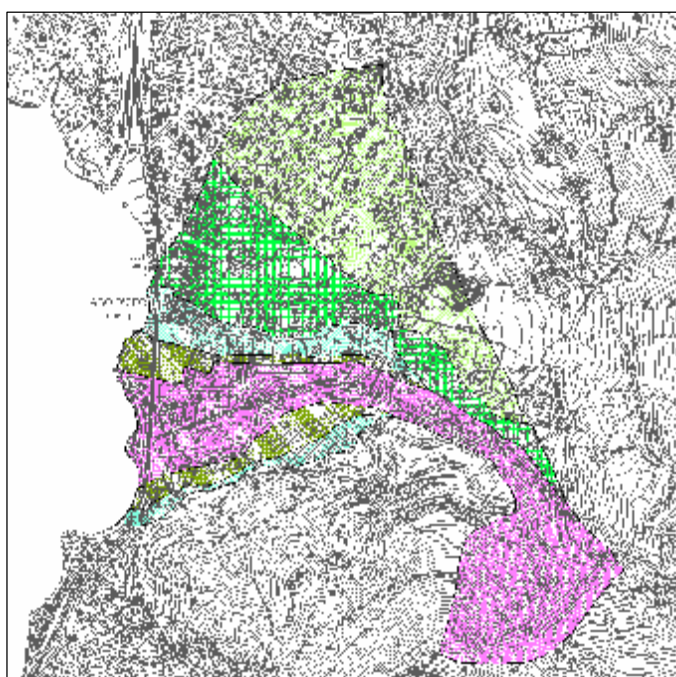
Ai sensi dell'art. 54 delle N.d.A. del PAI, come modificato con deliberazione 4/2004 del Comitato Istituzionale dell'Autorità di bacino del Fiume Po, la perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico molto elevato può essere modificata con la procedura di cui all'art. 18 delle N.d.A. del PAI.

La presente proposta di modifica è stata condotta utilizzando, oltre alle già citate procedure, quelle di cui agli Allegati 2 Parte II e 3 dei criteri attuativi l.r. 12/05 Per il Governo del Territorio.

In riferimento alle indicazioni contenute nella normativa di riferimento, si propone, per l'ambito di conoide, la corrispondenza tra le classi di pericolosità definite in questo studio e le classi di fattibilità geologica per le azioni di piano, oltre che le classi delle aree interessate da dissesto idrogeologico. Di seguito si riporta uno schema che riassume quanto appena esposto.

**Tabella 15** Correlazione tra classi di pericolosità, classi di fattibilità geologica e voci della legenda PAI

<b>CLASSE DI PERICOLOSITA'</b>		<b>CLASSE DI FATTIBILITA'</b>	<b>CLASSIFICAZIONE AREE INTERESSATE DA DISSESTO IDROGEOLOGICO (PAI)</b>	<b>NORMA DI RIFERIMENTO</b>
H5		Classe 4	Zona 1	norma per la Zona 1 art. 50 N.d.A. PAI
H4		Classe 4	Zona 1	norma per la Zona 1 art. 50 N.d.A. PAI
H3		Classe 3	Zona 2	norma per la Zona 2 art. 50 N.d.A. PAI
H2*		Classe 3	Cn Conoide protetto	
H2		Classe 2	Cn Conoide protetto	
H1		Classe 2	Cn Conoide protetto	

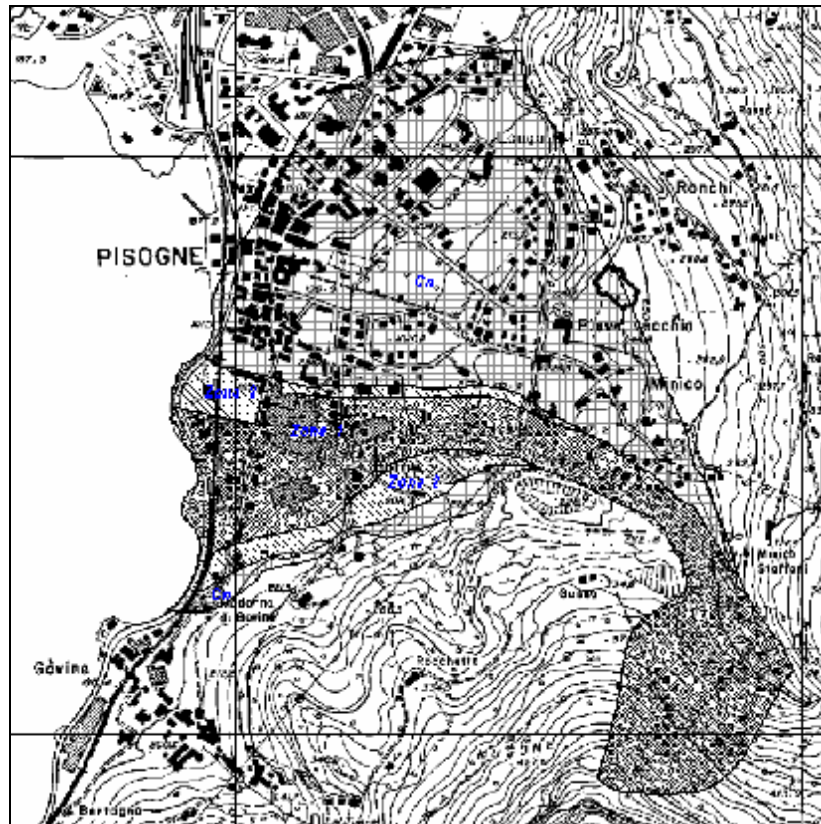


Si precisa che l'assegnazione alla classe di fattibilità è riferita agli aspetti riguardanti la pericolosità connessa ai fenomeni alluvionali e ai fenomeni di innesco della frana del Gasso, considerando la condizione più gravosa e interpolando la situazione storica degli eventi accaduti. A lato è riportato uno stralcio della carta della fattibilità riportata nell'allegato 12 in scala 1:2000.

**Figura 30** Stralcio della carta di fattibilità (In verde chiaro classe H1, in verde classe 2 con H2, in azzurro classe 3 con H2\*, in verde oliva classe 3-Zona 2 e in magenta classe 4-Zona 1)



Di seguito si riporta uno stralcio della proposta di modifica della perimetrazione dell'area 146-LO-BS, risultato del presente studio, contenuta anche nell'Allegato 12 in scala 1:10000.



**Figura 31 Stralcio carta del dissesto con legenda uniformata PAI**

### **3.3 VINCOLI E PRESCRIZIONI**

In riferimento alla corrispondenza tra classi di pericolosità e la classificazione delle aree in dissesto si ricorda che, per le aree classificate con pericolosità H5 e H4 valgono le indicazioni ed i vincoli individuati dall'art.50 delle Norme di Attuazione del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico e riguardanti le aree a rischio idrogeologico molto elevato ricadenti in Zona 1.

Per le aree classificate con pericolosità H3 valgono le indicazioni ed i vincoli individuati dall'art.50 delle Norme di Attuazione del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico e riguardanti le aree a rischio idrogeologico molto elevato ricadenti in Zona 2.

Le restanti aree di conoide, esterne alla perimetrazione della zona 267, classificate con pericolosità H2\*, H2 e H1, risultano classificate come Cn (Conoide protetta) in accordo con le indicazioni dell'art. 9, comma 9, delle norme di Attuazione del PAI.

Di seguito si riportano le norme per la Zona 1 e per la Zona 2 così come definiti dall'art. 50 delle N.d.A. del PAI.

### **AREE RICADENTI IN ZONA 1 (Classe H5e H4 di pericolosità)**

Per queste aree valgono le indicazioni ed i vincoli individuati dalle Norme di Attuazione del PAI contenute nel Titolo IV delle Norme d'attuazione del PAI e successivi aggiornamenti dell'art. 50, riferite alle aree a rischio molto elevato in ambiente collinare e montano. In queste aree sono esclusivamente consentiti:

- gli interventi di demolizione senza ricostruzione;
- gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria, restauro, risanamento conservativo, così come definiti alle lettere a), b), c) dell'art. 27 della L. R. 12/2005, senza aumenti di superficie e volume, salvo gli adeguamenti necessari per il rispetto delle norme di legge;
- le azioni volte a mitigare la vulnerabilità degli edifici e degli impianti esistenti e a migliorare la tutela della pubblica incolumità con riferimento alle caratteristiche del fenomeno atteso. Le sole opere consentite sono quelle rivolte al consolidamento statico dell'edificio o alla protezione dello stesso;
- gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria relativi alle reti infrastrutturali;
- gli interventi volti alla tutela e alla salvaguardia degli edifici e dei manufatti vincolati ai sensi del D.Lgs. 29 ottobre 1999 n. 490 e successive modifiche e integrazioni, nonché di quelli di valore storico-culturale così classificati in strumenti di pianificazione urbanistica e territoriale vigenti;
- gli interventi per la mitigazione del rischio idrogeologico e idraulico presente e per il monitoraggio dei fenomeni;
- la ristrutturazione e la realizzazione di infrastrutture lineari e a rete riferite a servizi pubblici essenziali non altrimenti localizzabili, previo studio di compatibilità dell'intervento con lo stato di dissesto esistente valicato dall'Autorità competente. Gli interventi devono comunque garantire la sicurezza dell'esercizio delle funzioni per cui sono destinati, tenuto conto dello stato di dissesto in essere.

Per gli edifici ricadenti nella ZONA 1 già gravemente compromessi nella stabilità strutturale per effetto dei fenomeni di dissesto in atto sono esclusivamente consentiti gli interventi di demolizione senza ricostruzione e quelli temporanei volti alla tutela della pubblica incolumità.

### **AREE RICADENTI IN ZONA 2 (Classe H3 di pericolosità)**

Per queste aree valgono le indicazioni ed i vincoli individuati dalle Norme di Attuazione del PAI contenute nel Titolo IV delle Norme d'attuazione del PAI e successivi aggiornamenti dell'art. 50, riferite alle aree a rischio molto elevato in ambiente collinare e montano. In queste aree sono esclusivamente consentiti (oltre a quelli specificati nei commi relativi alla Zona 1):

- gli interventi di ristrutturazione edilizia così come definiti alla lettera d dell'art. 27 della L.R. 12/2005;

- gli interventi di ampliamento degli edifici esistenti unicamente per motivate necessità di adeguamento igienico-funzionale, ove necessario, per il rispetto della legislazione in vigore anche in materia di sicurezza del lavoro connessi ad esigenze delle attività e degli usi in atto;
- la realizzazione di nuove attrezzature e infrastrutture rurali compatibili con le condizioni di dissesto presente; sono comunque escluse le nuove residenze rurali;
- gli interventi di adeguamento e ristrutturazione delle reti infrastrutturali.



### **3.4 APPROFONDIMENTI D'INDAGINE MONITORAGGIO**

Le analisi sviluppate e presentate nel presente lavoro, si sono basate su dati ricavati da precedenti studi, integrati con rilievi geologici di superficie e rilievi geomeccanici, al fine di elaborare una proposta di ripermimetrazione dell'area 267.

Per l'area in frana mancano tuttavia una serie di dati ed approfondimenti di indagine che consentano di meglio chiarire:

- *stato di conservazione del canale di derivazione delle acque che scorre al di sotto dell'area in frana;*
- *riconoscimento ed intercettazione di eventuali superfici di scivolamento in profondità;*
- *rilevamento di eventuali spostamenti delle aree definite potenzialmente instabili ovvero zona a monte della nicchia e lato destro.*

Va di fatto evidenziato che se da un lato si ritiene del tutto plausibile la riduzione dell'area a rischio, così come proposto, si segnala che permane una condizione di potenziale instabilità per una parte dell'abitato e delle infrastrutture esistenti, inserite nelle classi di pericolosità H5 H4 ed H3 (zona 1 e 2 della ex L.267/98).

La permanenza di condizioni di rischio giustifica di fatto la realizzazione di approfondimenti di indagine e la predisposizione di un adeguato sistema di monitoraggio e controllo dell'area in frana e si ritengono pertanto indispensabili le seguenti attività:

- 1) ESECUZIONE DI INDAGINI GEOLOGICHE DI APPROFONDIMENTO;
- 2) PREDISPOSIZIONE DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO;
- 3) INTEGRAZIONE DEL PIANO DI EMERGENZA CON LE ATTIVITA' DI MONITORAGGIO GEOLOGICO.

#### 1) esecuzione di indagini di approfondimento

Al fine di addivenire ad una maggiore conoscenza delle condizioni di stabilità del pendio e rilevare dati circa i potenziali spostamenti delle masse in frana, si ritiene di dover programmare le seguenti attività:

- a) esecuzione di n° 2 sondaggi a carotaggio continuo spinti sino alla profondità di circa 60 mt da realizzarsi previo ripristino dell'esistente pista ed apertura di un nuovo tratto della medesima, che dalla località Terzana arriva sino all'area in frana. La frana del Trobiolo interessa una zona difficilmente raggiungibile dai mezzi meccanici ed eventuali sondaggi sono possibili solo attraverso la realizzazione di nuove piste di accesso (con il rischio di apportare elementi destabilizzanti) o a seguito di trasporto con elicottero. Per tali ragioni si considera comunque indispensabile eseguire i due sondaggi sopra richiamati integrati da indagini indirette di tipo geofisico;
- b) esecuzione di una campagna di indagini geofisiche con stendimenti sismici profondi eseguiti sia trasversalmente che longitudinalmente al pendio, approfondendo le conoscenze delle zone potenzialmente instabile;
- c) esecuzione di stendimenti di tomografia elettrica lungo le direttrici delle stese sismiche.

#### 2) predisposizione di un sistema di monitoraggio

Allo stato attuale è sospeso il monitoraggio predisposto per le fasi di realizzazione dei lavori di messa in sicurezza dell'area in frana (realizzazione del rilevato paramassi e riprofilatura del pendio). Si trattava di un sistema di allertamento che doveva, attraverso lo spostamento del filo estensimetro in alcune basi di lettura, attivare l'allertamento per le squadre impegnate nei lavori. Oltre questo era stato predisposto un sistema di raccolta dei dati pioggia e temperatura.

Al fine di fornire dei dati importanti circa gli spostamenti profondi e superficiali del versante, si ritiene di poter proporre:

- a) la predisposizione delle tubazioni inclinometriche da realizzarsi nelle perforazioni di sondaggio geognostico;
- b) l'integrazione e riattivazione del monitoraggio degli estensimetri superficiali a filo;
- c) l'esecuzione di una campagna di monitoraggio topografico di capisaldi posizionati nell'area in frana per la durata di anni TRE con cadenza trimestrale delle misurazioni;
- d) la predisposizione di un sistema di monitoraggio con laser scanner che potrebbe sostituire egregiamente il punto "c" precedente;
- e) la predisposizione delle basi di riflessione del monitoraggio RADAR SAT da satellite attivato dalla Regione Lombardia.

### 3) integrazione del piano di emergenza con le attività di monitoraggio geologico

L'esistente Piano di Emergenza comunale andrebbe integrato prevedendo delle soglie di allertamento sia su base meteorologica (cosiddetti precursori di evento) sia relativamente alle deformazioni del versante.

In via preliminare si possono stimare i costi relativi alle attività sopra richiamate:

<b>1</b>	<b>Esecuzione di indagini di approfondimento</b>	
	a) sondaggio geognostici compresa l'apertura della pista di accesso ed ogni altro onere, per un totale di mt 120 con prove in foro.	€ 40.000,00
	b) Esecuzione della campagna di indagine geofisica sismica ed elettrica	€ 50.000,00
<b>TOTALE (approssimato per eccesso)</b>		<b>€ 90.000,00</b>
<b>2</b>	<b>Predisposizione di un sistema di monitoraggio</b>	
	a) predisposizione delle tubazioni inclinometriche (compreso nella voce sopra)	€ 0,00
	b) integrazione e riattivazione del monitoraggio geologico esistente	€ 5.000,00
	c) campagna di monitoraggio topografico	€ 40.000,00
	d) predisposizione di un monitoraggio con sistema laser scanner	€ 100.000,00
	e) predisposizione delle basi riflettenti per monitoraggio da satellite	€ 20.000,00
<b>TOTALE</b>		<b>€ 125.000,00</b>
<b>3</b>	<b>Integrazione del piano di emergenza</b>	<b>€ 15.000,00</b>
<b>TOTALE INDAGINI E MONITORAGGIO</b>		<b>€ 230.000,00</b>

*Dott. Geol. Luca M. Albertelli*

Hanno collaborato:

*Dott.ssa Ing. Simona Bianchetti  
 Studente Fabio Canova*

## BIBLIOGRAFIA

- Ø “Studio del movimento franoso in località Gasso a Pisogne e proposta di messa in sicurezza” a cura di ARETHUSA srl, Responsabile Tecnico Dr. Geol. E. Dolci, del 2001;
- Ø Progetto esecutivo “Messa in sicurezza del versante di frana e del torrente Trobiolo in comune di Pisogne, interventi di 1° fase” a cura di STUDIO MAIONE INGEGNERI ASSOCIATI, Progettista Incaricato Prof. Ing. Ugo Maione, del 2002;
- Ø Studio “Interpretazione geologica dei dati ottenuti dall’Interferometria differenziale SAR con la tecnica dei PS (Permanent Scatterers technique) relativamente a fenomeni franosi e di subsidenza”, Provincia di Brescia – Settore Protezione Civile, del 2007;
- Ø Studio di Caratterizzazione Idrologica a supporto dell’Elaborato Tecnico relativo al Reticolo Idrico Minore e relative Fasce di rispetto (ai sensi D.G.R. n.7/7868 del 25-01-2002 e n.7/13950 del 01-08-2003), a firma del Dott. Ing. Pier Giuseppe Fenaroli;
- Ø Sistema Informativo dei Bacini e dei Corsi d’acqua (SIBCA) della Regione Lombardia;
- Ø Studio “Messa in sicurezza del versante di frana e del torrente Trobiolo in comune di Pisogne, interventi di 1° fase – Riperimetrazione delle aree a rischio (procedura 267/98)” a cura di IDRO srl, Progettisti Prof. Ing. Ugo Majone, Dott. Ing. Denis Cerlini, Dott. Ing. Franco Galli, Dott. Ing. Beatrice Majone del 2005;
- Ø Aldo Deruti: “Pisogne, un secolo di immagini, un secolo di storia”;
- Ø Giacomo Sebastiano Pedersoli: “La lunga alluvione (1960)”, Edizioni Toroselle;
- Ø Giuseppe Berretti: “Levandosi i fiumi sopra le rive”, Grafo edizioni.

***ALLEGATI***

## STIMA DELLE PORTATE DI MASSIMA PIENA

*Direttiva n. 2 Autorità di Bacino del Fiume PO - P.A.I. "Piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica"*

### TEMPO DI CORRIVAZIONE (Giandotti)

DATI MORFOMETRICI BACINO IDROGRAFICO			DATI RISULTANTI
<b>S</b>	⇒ <b>9,15</b>	[Km <sup>2</sup> ] Superficie Bacino	Tempo di Corrivazione  $T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5L}{0,8\sqrt{(Hm - Ho)}} \Rightarrow \mathbf{0,90}$ [ore]
<b>L</b>	⇒ <b>5,2</b>	[Km] Lunghezza asta principale	
<b>Hm</b>	⇒ <b>1008</b>	[m] Altezza media del Bacino s.l.m.m.	
<b>Ho</b>	⇒ <b>240</b>	[m] Quota della sez. di chiusura s.l.m.m.	

### PREVISIONE QUANTITATIVA DELLE PIOGGE INTENSE

FORMULA								
Curva di probabilità pluviometrica	$h_{(t)} = at^n$		h <sub>(t)</sub> = massima precipitazione in mm al tempo t t = tempo di progetto (ore) = tempo di corrivazione a = fattore della curva relativo ad un determinato Tr n = esponente della curva relativo ad un determinato Tr Tr = tempo di ritorno (20-100-200 anni)					
DATI CELLA DELLA GRIGLIA DI DISCRETIZZAZIONE DELLE PIOGGE INTENSE (Cfr. Allegato n.3 della Direttiva n.2 PAI dell'Autorità di Bacino del Fiume PO)								
Cella	Coord. Est UTM	Coord. Nord UTM	a Tr 50	n Tr 50	a Tr 100	n Tr 100	a Tr 200	n Tr 200
<b>BRENO</b>			<b>42,69</b>	<b>0,2944</b>	<b>47,27</b>	<b>0,2916</b>	<b>51,67</b>	<b>0,2895</b>
MASSIMA PRECIPITAZIONE PROBABILE								
<b>Tr</b>	<b>h(t)</b>							
50	<b>41,35</b>	h <sub>(t)</sub> = massima precipitazione in mm al tempo t						
100	<b>45,80</b>	t = tempo di progetto (ore) = tempo di corrivazione [ore]					<b>0,90</b>	
200	<b>50,08</b>	Tr = tempo di ritorno						

### PORTATE DI MASSIMA PIENA

FORMULA del METODO RAZIONALE			
$Q_c = 0,278 \frac{ch_{(t)}S}{T_c}$	dove	$Q_c$ $c$ ⇒ <b>0,5</b> $h_{(t)}$ $S$ ⇒ <b>9,15</b> $T_c$ ⇒ <b>0,90</b>	portata al colmo coefficiente di deflusso massima precipitazione in mm al tempo t (vedi punto prec.) [Km <sup>2</sup> ] Superficie Bacino [ore] Tempo di corrivazione
RISULTATI			
<b>Tr</b>		<b>Q<sub>c</sub> [mc/sec]</b>	
50	⇒	<b>58,597</b>	Tr = tempo di ritorno [anni]
100	⇒	<b>64,903</b>	
200	⇒	<b>70,960</b>	



## Analisi delle portate con la formula razionale

### Torrente Trobiolo

STAZIONE	
<b>Nome:</b>	BRENO
<b>m1:</b>	21,25
<b>n1:</b>	0,313
<b>Cv:</b>	0,288

PARAMETRI BACINO			
Area <b>A</b> Km <sup>2</sup> :	9,15	Quota media <b>Qmed.</b> :	1008
Lungh. Asta <b>L</b> Km:	5,2	Q. media relativa:	801,5
Q. massima <b>Qmax</b> :	1843		
Q. minima <b>Qmin</b> :	240		

Retta segnalatrice di possibilità pluviometrica

$$aT = m1 \left\{ 1 - \frac{CV\sqrt{6}}{p} \left[ e + LnLn \left( \frac{T}{T-1} \right) \right] \right\} =$$

<b>TR</b>				
10	20	50	100	200
mm/h	mm/h	37,12 mm/h	40,46 mm/h	43,78 mm/h

Tempo di corrivazione

$$Tc = \frac{3.3\sqrt{A} + 3.2L}{\sqrt{Qmed - Qmin}} = \mathbf{0,96} \text{ ore}$$

Altezza di pioggia critica (h=at^n)				
<b>TR</b>				
10	20	50	100	200
mm	mm	36,6592 mm	39,951 mm	43,23

### Calcolo portata

$$Q = \frac{1}{3.6} \cdot f \cdot r(A, d) \cdot A \cdot aT \cdot Tc^{n1-1} =$$

dove si assume:

- φ= 0,50      coefficiente di afflusso locale
- Tc= 0,96    ore
- A= 9,15    Km<sup>2</sup>
- aT= variabile con TR
- n1= 0,313
- r(A,d)= 0,761038

	<b>TR</b>				
	10	20	50	100	200
<b>Q</b> (mc/sec,)			36,91	40,22	43,52

## PARAMETRI CARATTERISTICI DEL BACINO

Area Bacino	A	Km <sup>2</sup>	9,15
Lunghezza Conoide	L	m	940
Pendenza Media del Bacino	tg q	%	60
Pendenza Conoide	J <sub>c</sub>	%	8
Pendenza media Asta Principale	S	%	59
Pendenza Collettore su Conoide	S <sub>cl</sub>	%	8
Indice di Melton	M <sub>b</sub>		0,53
	Hmax	m slm	1843
	Hmin	m slm	240
Coefficiente Litotipi presenti nel Bacino	IG		3
Indice di Trasporto (basato sulla classificazione di Aulitzky)	IT		1
Fattore Correttivo	Na		0,5
Valore di riferimento per Volume specifico di solidi per unità di	Vr	m <sup>3</sup> /Km <sup>2</sup>	30000
Coefficiente Tipologia	K		5,4
Indice di Frana	IF		1
Spessore medio del materiale mobilizzabile	h	m	1

$$M_b = (H_{max} - H_{min}) * A^{-0.5}$$

IG=5 Morene alluvionali e detriti  
 IG=4 Metamorfiti  
 IG=3 Rocce terrigene  
 IG=2 Rocce laviche degradate, tufi basaltici, brecce  
 IG=1 Rocce calcaree  
 IG=0 Rocce porfirite, granitiche, dioritiche

IT=1 Debris Flow  
 IT=2 Debris Flood  
 IT=3 Bedload

Na=3 con A=0.1 Km<sup>2</sup>  
 Na=1 con A=1.0 Km<sup>2</sup>  
 Na=0.5 con A=10 Km<sup>2</sup>

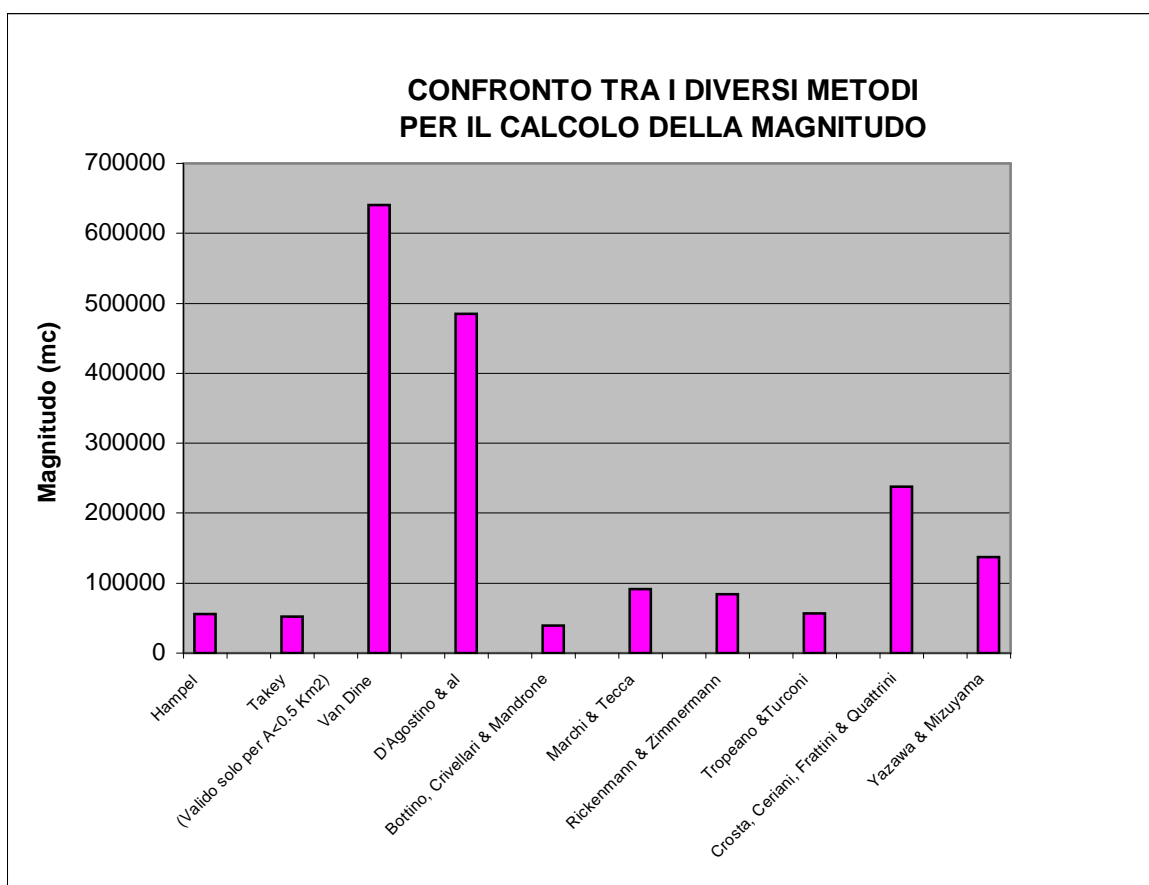
Vr=50000 Zone Granitiche  
 Vr=80000 Zone Vulcaniche  
 Vr=40000 Zone Formazioni Terziarie  
 Vr=100000 Zone Fortemente dissestate  
 Vr=30000 Altre zone

K=3 Bedload e Debris flood  
 K=5.4 per Debris Flow

IF=1 Grandi frane e Frane al piede  
 IF=2 Frane sui Versanti  
 IF=3 Piccole Frane o Assenti

## CALCOLO DELLA MAGNITUDO

Hampel	m <sup>3</sup>	55609	$M=150*A*(J_c-3)^{2.3}$
Takey (Valido solo per A<0.5 Km <sup>2</sup> )	m <sup>3</sup>	52481	$M=13600*A^{0.67}$
Van Dine	m <sup>3</sup>	640500	$M=70000*A$
D'Agostino & al	m <sup>3</sup>	485160	$M=39*A*S^{1.5}*IG*IT^{-0.3}$
Bottino, Crivellari & Mandrone	m <sup>3</sup>	39480	$M=21241*A^{0.28}$
Marchi & Tecca	m <sup>3</sup>	91500	$M=10000*A$
Rickenmann & Zimmermann	m <sup>3</sup>	84600	$M=(110-2.5*J_c)*L$
Tropeano & Turconi	m <sup>3</sup>	56708	$M=(0.542*A+0.0151)*0.019*h*tg\ q$
Crosta, Ceriani, Frattini & Quattrini	m <sup>3</sup>	237839	$M=1000*K*A*M_b^{0.8}*ScI*(1/IF)^2$
Yazawa & Mizuyama	m <sup>3</sup>	137250	$M=Na*A*Vr$



## Scheda di calcolo conoidi

 Comune: 

 Torrente: 

 Località: 

### QUANTIFICAZIONE DELLA MAGNITUDO OSSIA DEL VOLUME MASSIMO MOBILITABILE IN UN EVENTO DI TRASPORTO IN MASSA (TR 100anni)

#### Dati generali calcolo magnitudo

Area bacino	A	9,15	Kmq
Pend. Media bacino	S	60,00	%
Pendenza conoide	Sc	8	%
Pendenza collettore sul conoide	Scl	8	%
Fattore correttivo na (Yazawa-Mizuyama)	na	0,5	
Volume specifico Vr (Yazawa-Mizuyama)	Vr	30000	
Lunghezza asta sul conoide Lcl	Lcl	940	m
Quota massima del bacino	Hmax	1843	Km
Quota minima del bacino	Hmin	240	Km
fattore K (Crosta,Ceriani...)	K	5,4	
spessore medio materiale mobilizzabile	h	1	m
Indice di frana (Crosta, Ceriani,...)	If	1	
Indice di Melton	Mb	0,53	Mb=(Hmax-Hmin)*A^-0,5

#### Valori di magnitudo

**FORMULA**

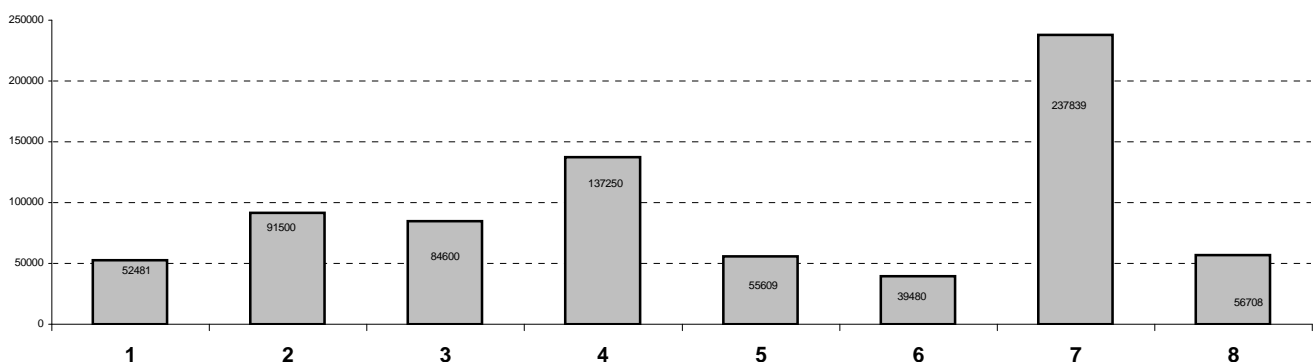
- 1 Takei (1984)
- 2 Marchi & Tecca (1996)
- 3 Rickemann e Zimmerman (1997)
- 4 Yazawa & Mizuyama
- 5 Hampel (1977)
- 6 Bottino, Crivellari & Mandrone (1996)
- 7 Crosta, Ceriani, Frattini & Quattrini (2000)
- 8 Tropeano e Turconi (1999)

**MAGNITUDO (mc)**

52481	M=13600*A^0.61
91500	M=10000*A(perA<10)
84600	M=(110-2,5*Sc)*Lcl
137250	M=na*A*Vr (perA<10)
55609	M=150*A*(Sf-3)^2.3 (perA<10)
39480	M=21241*A^0.28
237839	M=(K*A*Mb^0.8*Scl*(1/If)^2
56708	M=(0,542*A+0,0151)*0,019*h*S

 Valore massimo magnitudo  mc

 Valore minimo magnitudo  mc

 Valore medio magnitudo  mc


## CALCOLO DELLA MASSIMA ESTENSIONE LONGITUDINALE DELLA COLATA DETRITICA (METODO DI TAKAHASHI)

## Dati generali

Angolo fondo alveo a monte cambio penden:	$\theta_u$	7,20	°
Angolo fondo alveo a valle cambio penden:	$\theta_b$	6,10	°
Diametro rappresentativo sedimenti	$d$	0,1	m
Densità dell'acqua	$\rho_l$	1000	Kg/mc
Densità dei sedimenti fini	$\rho_{pf}$	2650	Kg/mc
Densità dei sedimenti grossolani	$\rho_{ps}$	2650	Kg/mc
Densità del fluido interstiziale acqua e sed.	$\rho_{pl}$	1200	Kg/mc
Angolo d'attrito interno del materiale	$\emptyset$	35	°
Concentrazione volumetrica del materiale	$c^*$	0,65	$C^*=1-n$ dove $n$ = porosità
Accelerazione di gravità	$g$	9,81	
Costante "a <sub>B</sub> "	$a_B$	0,04	
Larghezza a monte cambio pendenza	$B_u$	13	m
Larghezza media dell'alveo a valle della rottura di pendio	$B_d$	11	m
Portata liquida di piena del corso d'acqua	$Q_l$	60	mc/sec.
Volume massimo in magnitudo dei sediment	$V_{max}$	237839	mc
Volume minimo in magnitudo dei sedimenti	$V_{min}$	39480	mc

## Calcoli

Concentrazione volumetrica del materiale nella corrente $C_u=C^* \cdot 0,9$	$C_u =$	<b>0,59</b>	
Portata massima della miscela liquido-solido $Q_m=(c^*/(c^*-c_u))^*$	$Q_m =$	<b>600</b>	mc/sec.
Costante di calcolo della velocità	$K =$	<b>0,90</b>	
Velocità della corrente a monte del cambio di pendenza	$U_u =$	<b>9,56</b>	m/sec.
Altezza della corrente a monte del cambio di pendenza	$h_u =$	<b>4,83</b>	m
Velocità nel tratto di conoide dal punto fisso al punto di arresto	$V =$	<b>12,02</b>	m/sec.
Costante di calcolo G	$G =$	<b>2,31</b>	
Tempo di arresto colata	$T_t =$	<b>10,40</b>	sec.
Distanza percorsa dalla colata detritica (calcolo di primo tentativo)	$XI =$	<b>62</b>	m

Condizioni del conoide per calcolo BD

- 1) il conoide è inciso da un alveo torr. con pendenza  $\theta_b$  e sezione circa rettangolare larga  $B_d$
- 2) il conoide è approssimabile ad un piano di pendenza



2
---

Pendenza  $\omega$  della superficie del deposito  $\omega =$  **3,6** °

Valore corretto di  $\omega$  (viene corretto se  $\omega < B_d$ , non corretto se maggiore)  $\omega' =$  **6,7** °

Calcolo dell'area di accumulo

**Condizioni (scegliere una sola delle tre condizioni scrivendo "VERO"):**

- 1) la superficie del deposito ha la forma ad imbuto  
 2) la zona di deposito avviene in un canale rettangolare largo Bd  
 3) condizione in cui non si voglia trascurare che parte del materiale si deposita a monte dell'apice di conoide.

VERO

Volume di materiale contenuto nella zona di estensione XI **Wd =**  mc

Volume della miscela depositata nella zona a rischio : **Wr =**  mc

Essendo **wd < wr** si adotterà il valore di ricalcolato **sino ad ottenere Wd=Wr.**

Disntanza percorsa dalla colata detritica  $XI =$   m  
 calcolo per tentativi