LA GESTIONE DELLE ACQUE SOTTERRANEE NEI PROGETTI DI OPERE CIVILI

Le acque sotterranee sono storicamente oggetto di grandi progetti di ingegneria civile.
Tuttavia è oggi venuta meno la consapevolezza che, nella massima parte dei casi, esse vengono a interferire con la realizzazione di strutture e vie di comunicazione e che , in tali circostanze, possono nascere problemi di non facile soluzione.

Quando vengono redatti i progetti di opere civili, i progettisti non devono quindi trascurarne gli effetti sulle modalità di flusso e sulla qualità delle acque sotterranee, anche quando a un primo esame risultino prevedibilmente di scarsa importanza.

Gli argomenti di seguito affrontati dimostrano anzi che il tema "acque sotterranee" deve essere sviluppato accuratamente fin dalla prima fase di studio (quella di fattibilità) in modo da fornire agli enti valutatori dell'impatto ambientale (analisi di VIA) informazioni sufficienti per suggerire idonei adeguamenti.

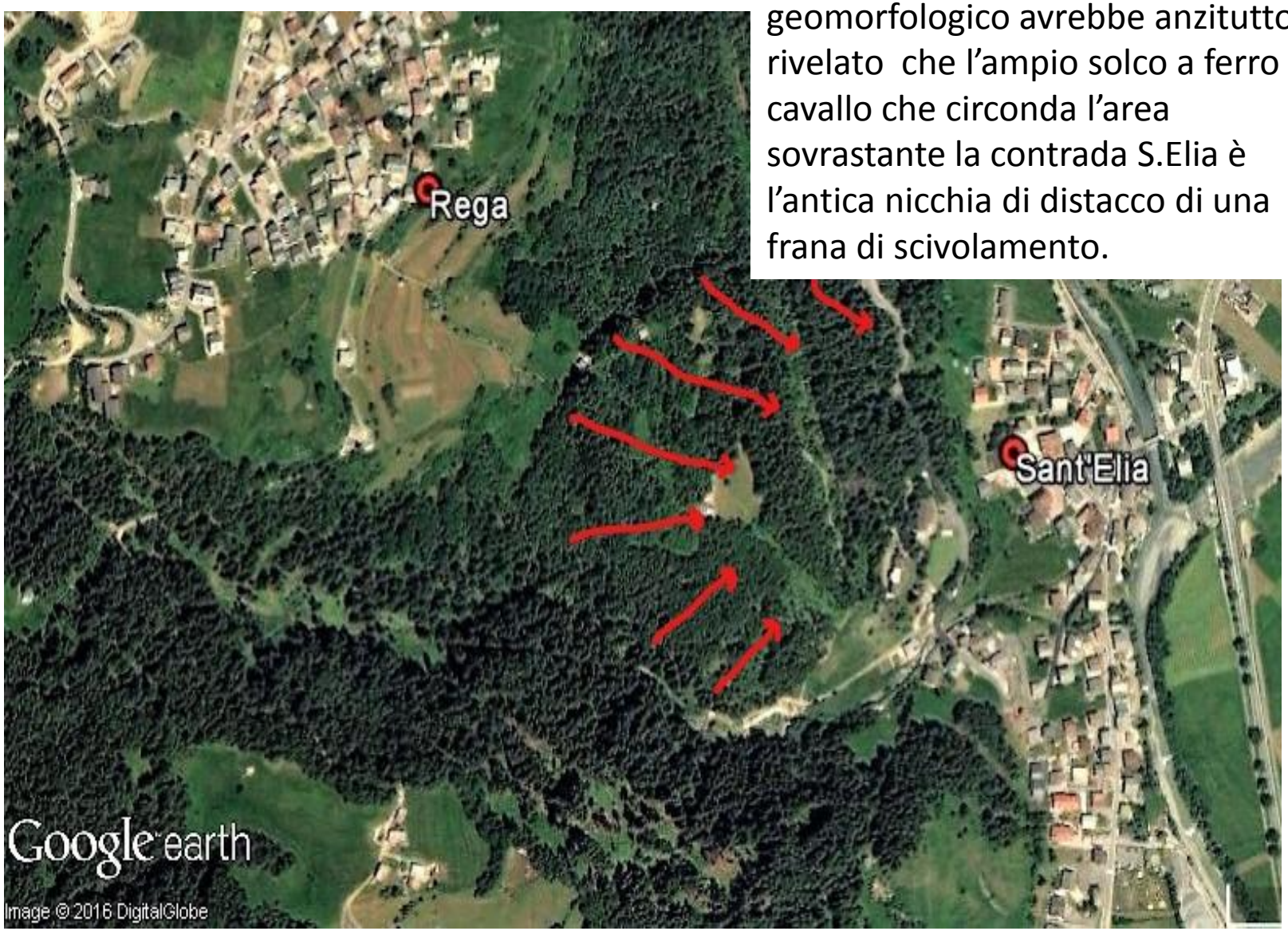
In queste diapositive vengono infatti presentati casi che riguardano opere costruite su versanti franosi , dove gli studi geologici non avevano posto in evidenza particolari difficoltà.

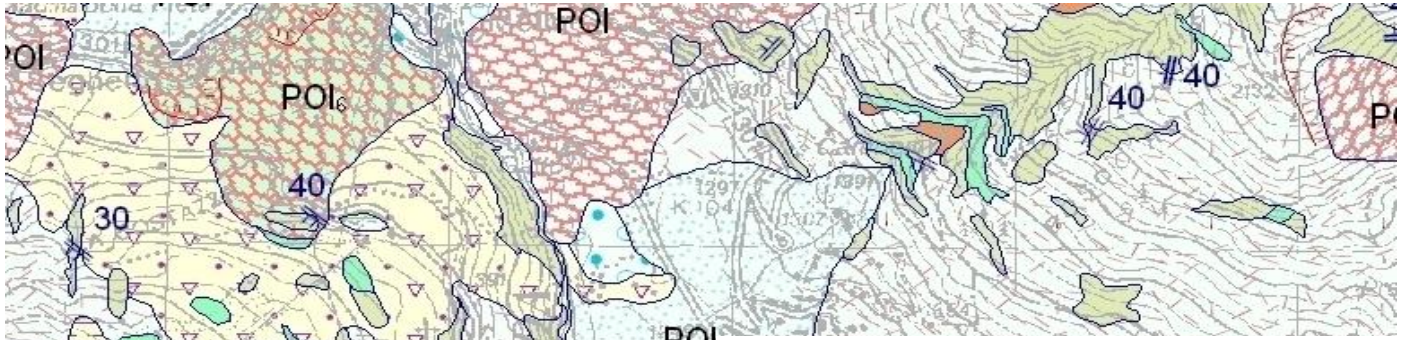
Si osserva da questi esempi che un approfondimento della tematica avrebbe reso possibile evitare che la realizzazione di queste infrastrutture incontrasse problemi che hanno reso necessari costosi studi e interventi.

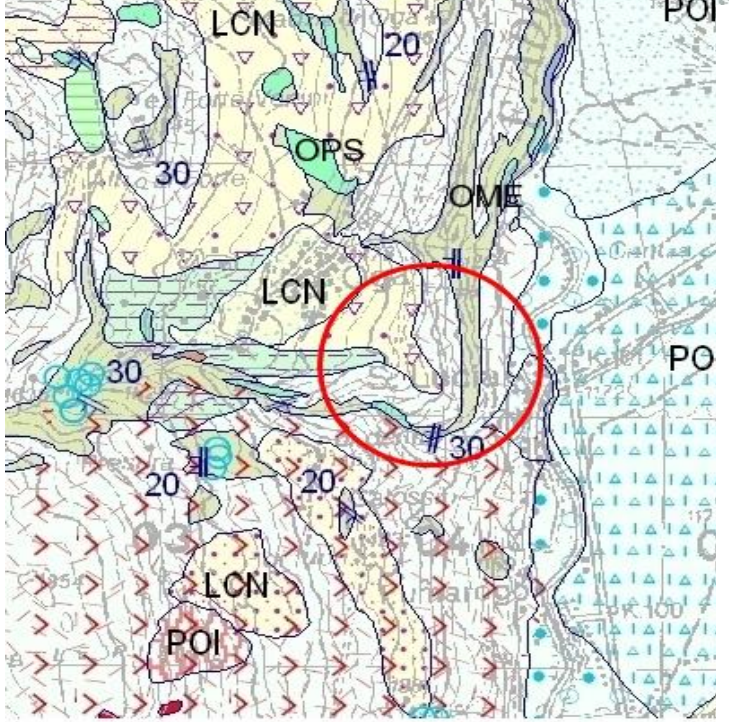
Frana di Sant’Elia

Nel 2008 l’area , situata nella media-alta Valtellina, è stata oggetto di accurate indagini geotecniche e idrogeologiche nella fase di progettazione di un’importante infrastruttura viaria, che comportava anche scavi profondi.
Con le indagini tradizionali, non si è riusciti tuttavia a descrivere con sufficiente approssimazione la natura e la storia evolutiva del versante.
Solo ultimata l’opera ci si è si resi conto che essa è esposta a problemi di stabilità per la franosità del pendio.
Nella presentazione vengono esposti gli studi che si sono resi necessari per chiarire la natura del dissesto idrogeologico e per provvedere al suo controllo, in quanto minaccia anche un centro abitato.

Un approfondito esame geomorfologico avrebbe anzitutto rivelato che l'ampio solco a ferro di cavallo che circonda l'area sovrastante la contrada S.Elia è l'antica nicchia di distacco di una frana di scivolamento.







Si nota che la recente carta geologica rilevata a scala 1/50.000 non ha riportato alcuna indicazione che potesse evidenziare il fenomeno: l'area risulta coperta da depositi glaciali limoso-sabbiosi che ricoprono filladi e miscascisti minuti con lenti di prasiniti. Al momento dello studio progettuale nulla poneva in guardia contro possibili dissesti del versante, che si sono manifestati solo in seguito con cedimenti nel terreno e danni agli edifici.

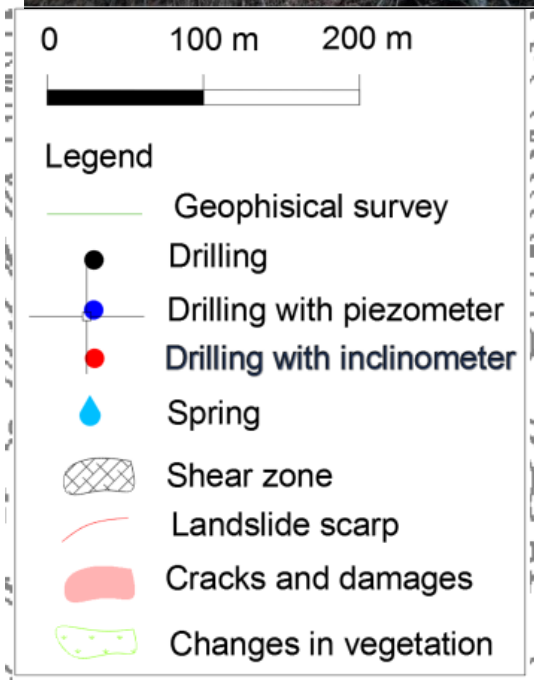
LCN SINTEMA DI CANTÙ
Diamicton massivi a supporto di matrice con blocchi sino a metrici (depositi glaciali);

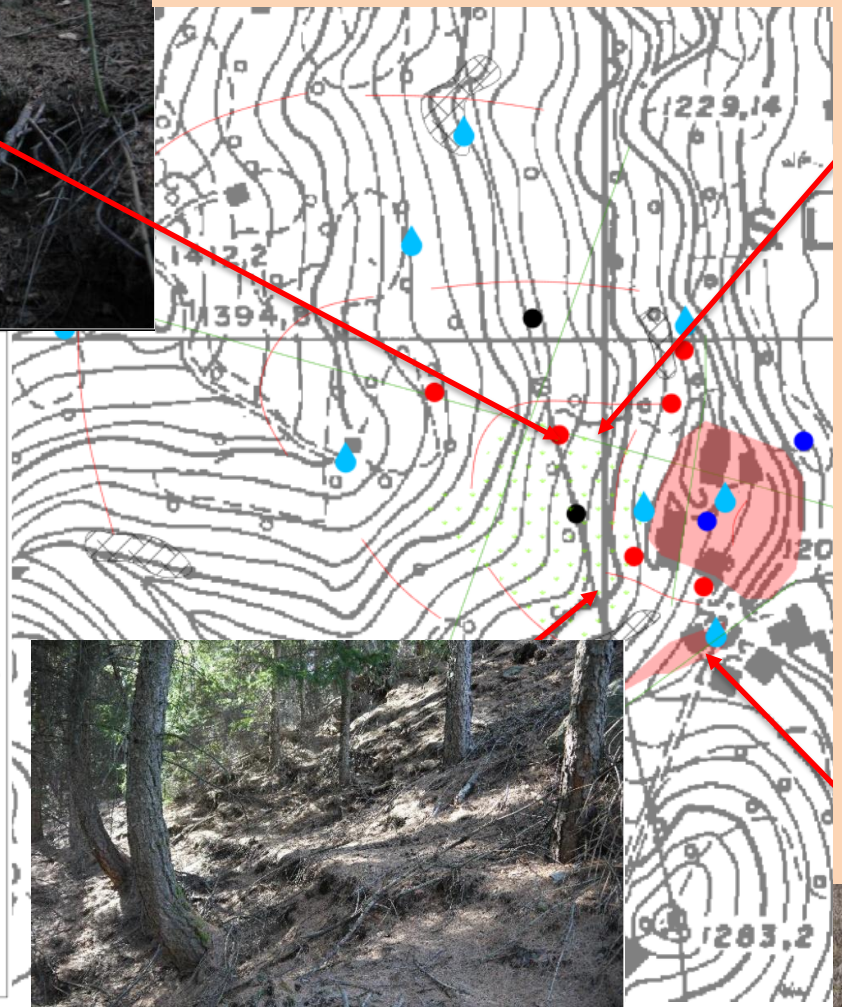
OME MICASCISTI A CLORITE E SERICITE

OPS PRASINITI

GLI STUDI SUL DISSESTO

Una volta accertata l'esistenza del dissesto si è provveduto a indagini suppletive.Si è osservato anzitutto che i movimenti del terreno e i danni sono avvenuti quasi contemporaneamente agli abbattimenti di grandi fronti di roccia, in un periodo di forti precipitazioni.

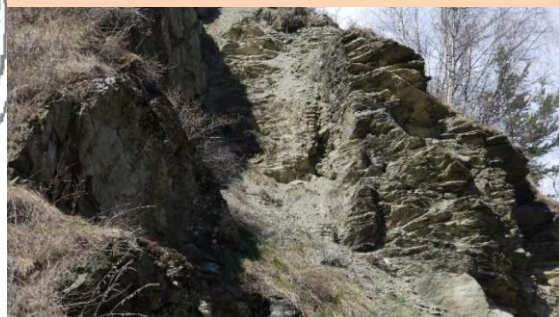




1.Le indagini **geomorfologiche** hanno permesso di delimitare le fenditure del terreno e delle rocce che suddividono il versante in ampie zolle concentriche di forma parabolica. 2.**Sondaggi** hanno consentito lo studio della qualità dell'ammasso roccioso e dei terreni di copertura. 3.**La geosisimica** ha restituito l'andamento in profondità delle porzioni in cui si suddivide la frana.

4.Gli inclinometri indicano la velocità degli spostamenti e la posizione delle superfici di rottura .

5.La **dendrocronologia** permette di ricostruire la storia dei movimenti negli ultimi decenni



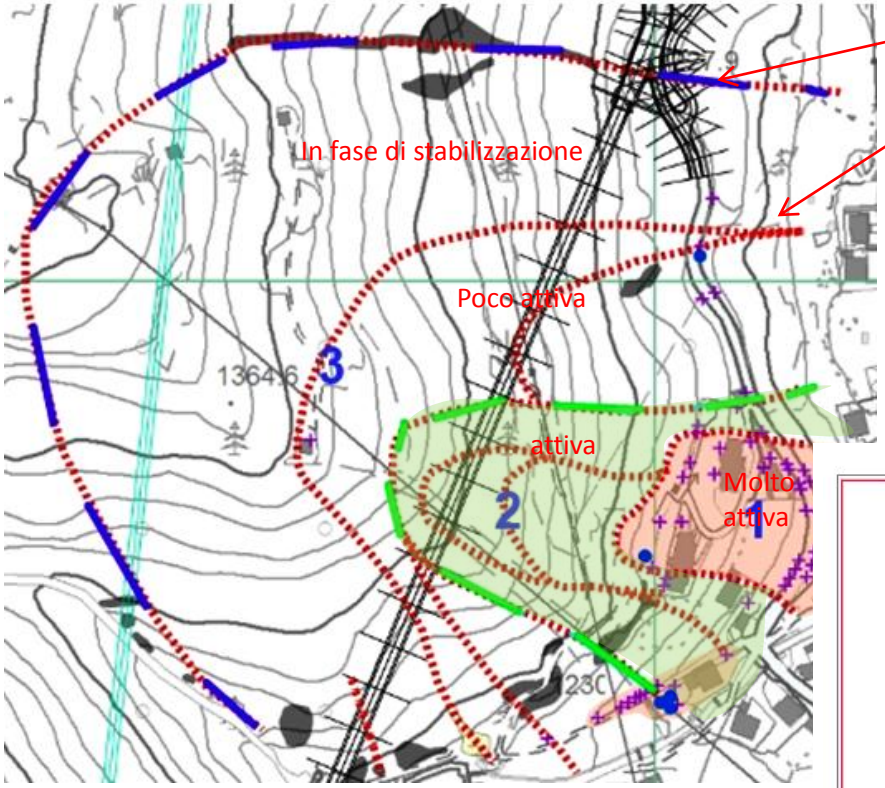
Sono state eseguite rilevazioni delle **sorgenti** e della **piezometria** che si sono rivelate determinanti per la comprensione dei fenomeni in atto

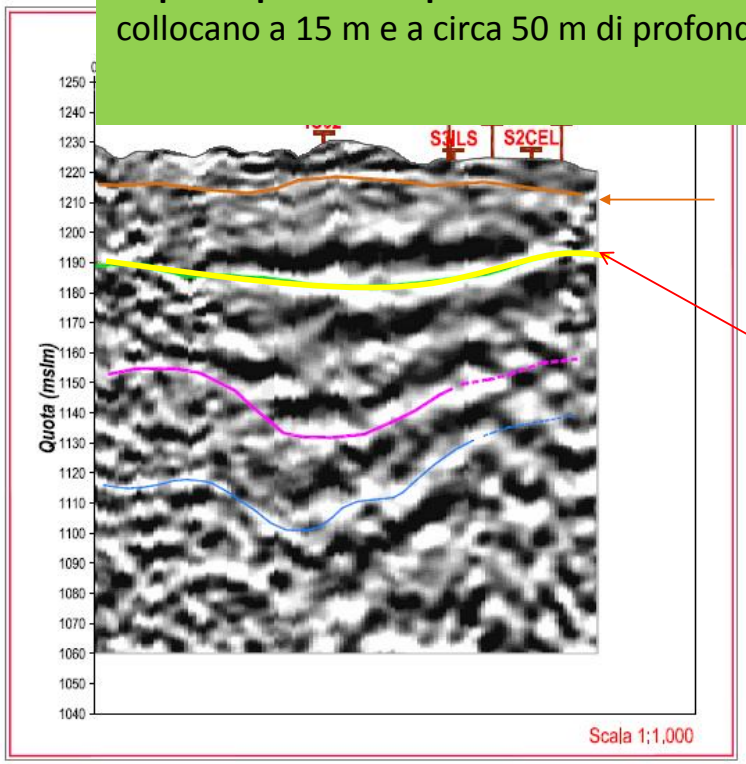
Risultati

Le rilevazioni **geomorfologiche** hanno evidenziato il limiti superficiali delle porzioni nelle quali è separato il versante, che si spostano con velocità diversa . Le porzioni periferiche presentano ridotte velocità (pochi mm/anno), mentre quelle più interne e poste al piede del pendio hanno spostamenti più rapidi.

Gli inclinometri hanno permesso di ricostruire la velocità di questi spostamenti e (insieme alla geofisica) la posizione e la profondità delle diverse superfici di rottura .

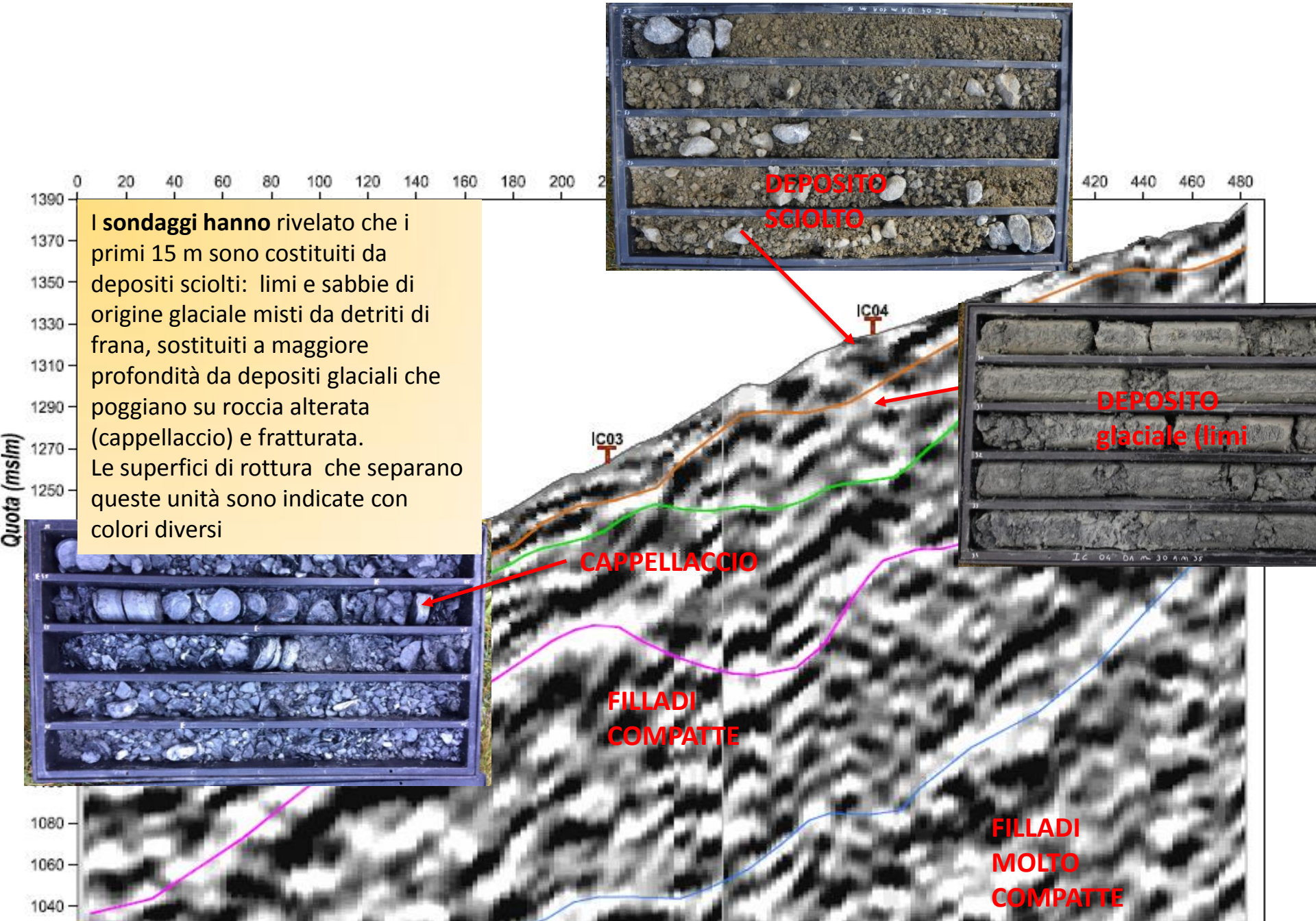
Le più importanti superfici di rottura si collocano a 15 m e a circa 50 m di profondità





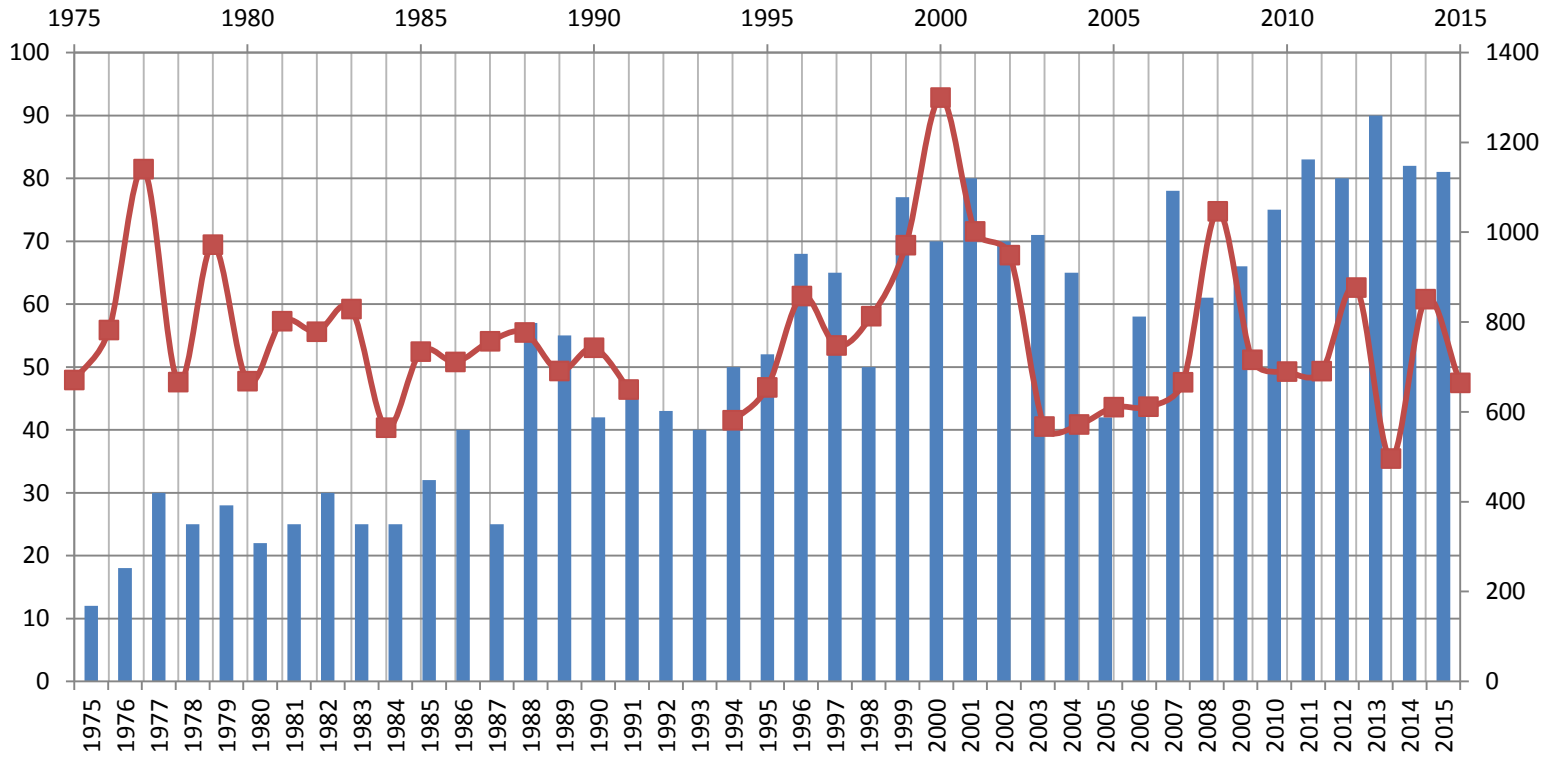
Base del dissesto più attivo

Base della frana



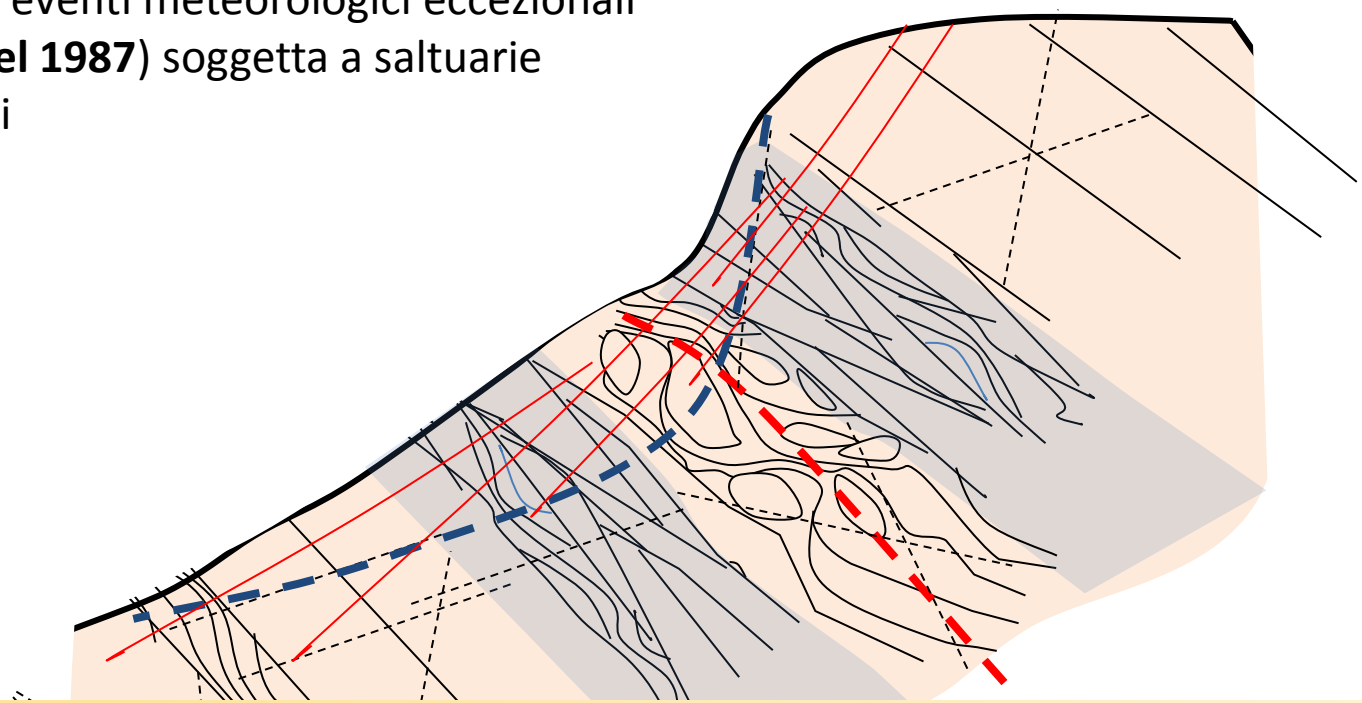
I **sondaggi hanno** rivelato che i primi 15 m sono costituiti da depositi sciolti: limi e sabbie di origine glaciale misti da detriti di frana, sostituiti a maggiore profondità da depositi glaciali che poggiano su roccia alterata (cappellaccio) e fratturata.
Le superfici di rottura che separano queste unità sono indicate con colori diversi

La **dendrocronologia** ha messo in evidenza che l'evoluzione del dissesto è iniziata da decine di anni, come conferma l'aumento dell' IE. L' Indice di Eccentricità è il rapporto fra la differenza di spessore dell'anello di accrescimento del fusto tra il lato di valle e il lato di monte rispetto rispetto allo spessore totale. Tanto maggiore è IE, tanto maggiore l'aumento di inclinazione del fusto in seguito alla deformazione del suolo. Accanto alla sezione schematica di un tronco asimmetrico ((( )))) si riporta la relazione che esprime l'indice di eccentricità $IE = (Vi - Mi) / (Vi + Mi) * 100$



L'indice di eccentricità sale progressivamente dagli anni '80, evidenziando che il movimento franoso è in atto da molto tempo, con sporadici ralleNtamenti e brusche riprese. Dal grafico **si nota che IE sale anche indipendentemente dalle piogge**, denunciando una componente del movimento franoso estranea agli eventi climatici.

Si pensa quindi a una **frana molto antica riattivata** da eventi meteorologici eccezionali (**alluvione del 1987**) soggetta a saltuarie accelerazioni



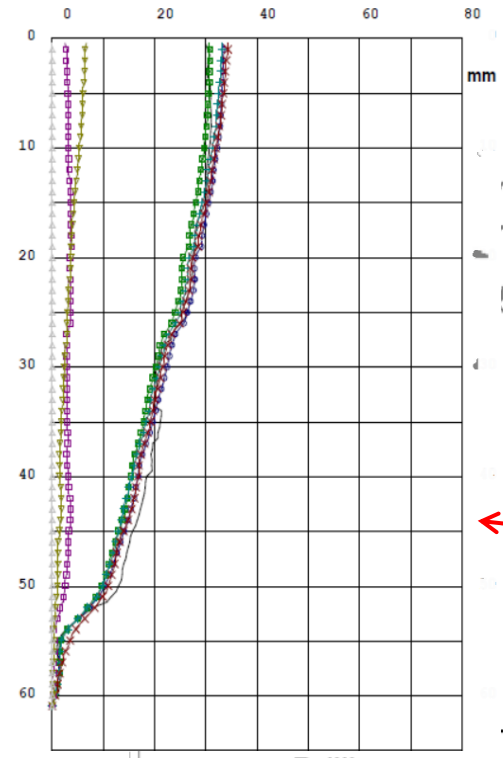
Le deformazioni (in specie quelle **per flessione**, dette di “fauchage”) sono congenite a un versante indebolito per alterazione o per le deformazioni tettoniche. Sul piede dei versanti agisce anche la pressione esercitata dalle masse sovrastanti, che producono fratture dette **“di versante**” (in rosso) parallele al pendio, spesso molto aperte, che favoriscono la genesi di dissesti.

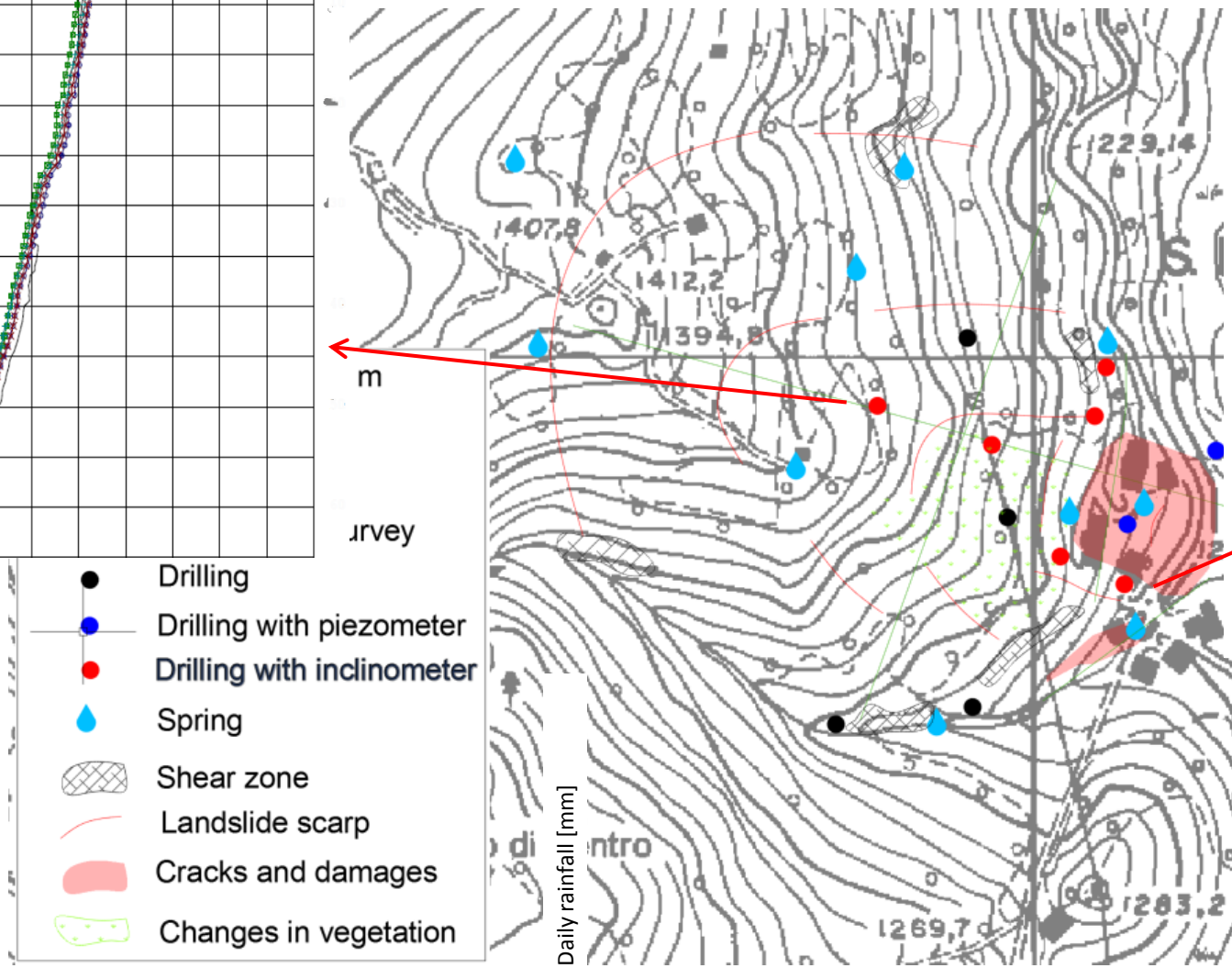
Esame del dissesto con SONDAGGI E INCLINOMETRI

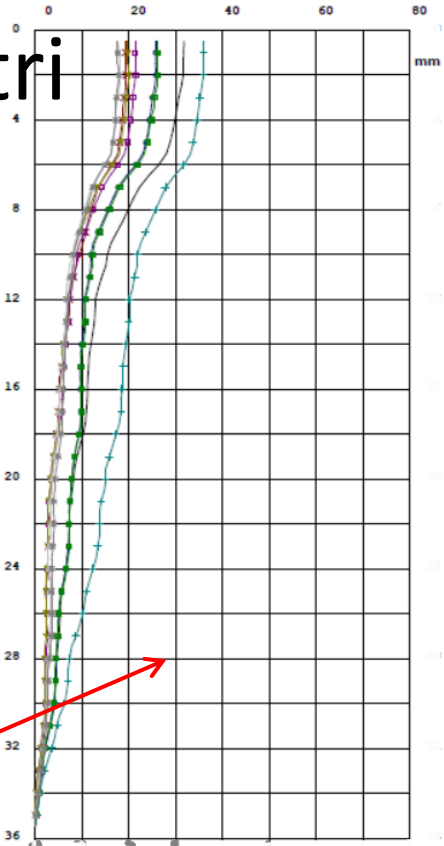
Un esame dei dati inclinometrici è stato compiuto per identificare le profondità alle quali si manifestano i movimenti più salienti, che corrispondono alle superfici principali di rottura.
I grafici che riportano le cumulate degli spostamenti indicano anche le velocità di movimento e quindi di classificare la pericolosità della frana, secondo la definizione di Cruden e Varnes

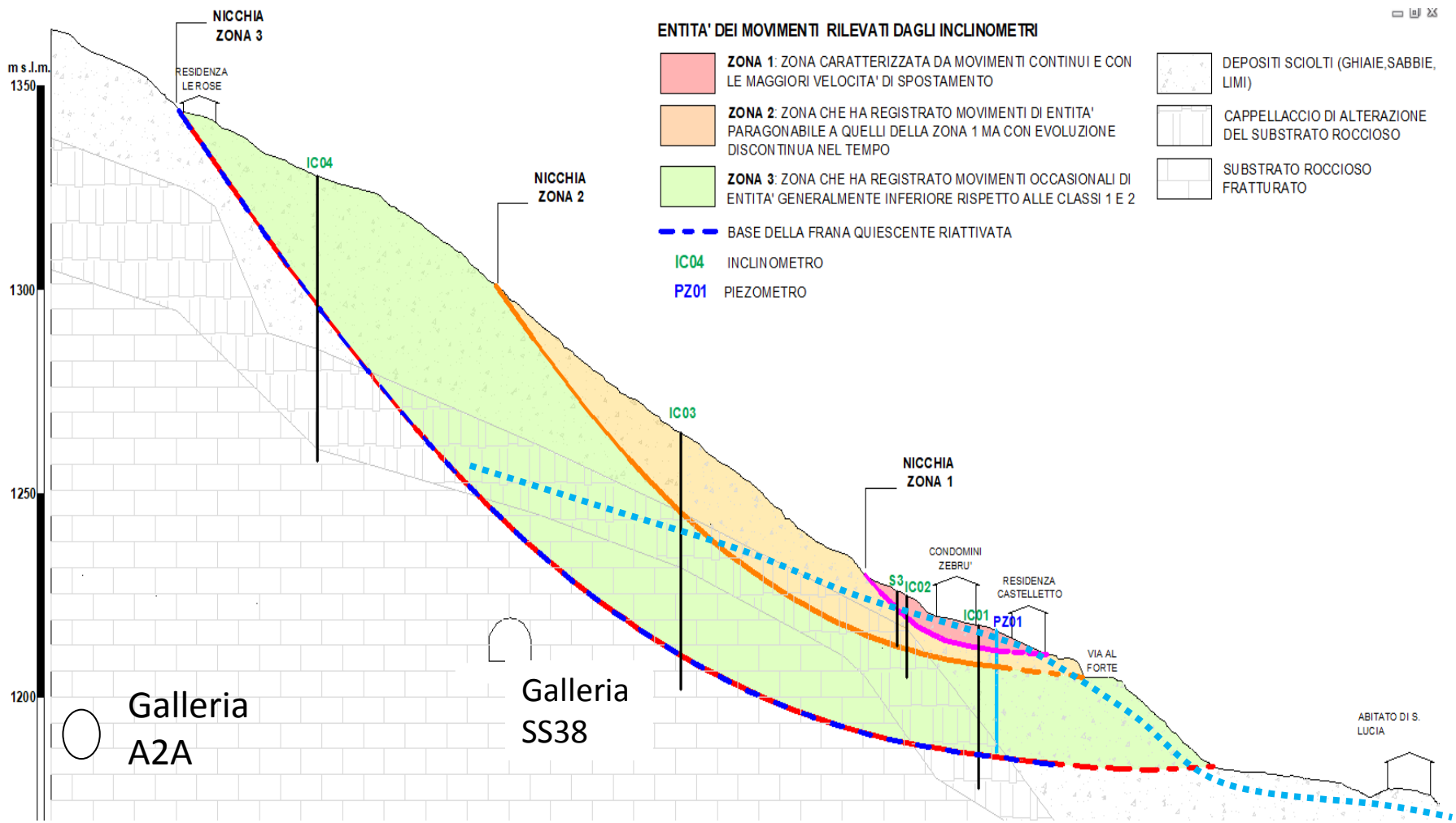
Classe	Descrizione	Velocità tipica	Osservazioni sui danni
I	Estremamente lento	6 mm/anno	Impercettibile senza strumenti di monitoraggio, costruzione di edifici possibile con precauzioni.
II	Molto lento	16 mm/anno	Alcune strutture permanenti possono essere danneggiate dal movimento.
III	Lento	1,6 m/anno	Possibilità di intraprendere i lavori di rinforzo e restauro durante il movimento.
IV	Moderato	13 m/mese	Alcune strutture temporanee o poco danneggiabili possono essere mantenute.
V	Rapido	1,8 m/h	Evacuazione possibile; distruzione di strutture, immobili ed installazioni permanenti.
VI	Molto rapido	3 m/min	Perdita di vite umane, velocità troppo elevata per permettere l'evacuazione.
VII	Estremamente rapido	5 m/s	Catastrofe di eccezionale violenza, edifici distrutti per l'impatto del materiale spostato, molti morti.

Dati degli inclinometri









I dati inclinometrici e geofisici hanno permesso la ricostruzione delle superfici di rottura principali e la velocità di spostamento dei comparti di roccia in movimento; lo studio idrogeologico ha consentito , dall'accertamento della posizione delle sorgenti e dai dati piezometrici , di tracciare il profilo piezometrico.

Si è concluso che il drenaggio, operato con numerosi tubi finestrati suborizzontali spinti con una leggera inclinazione a una profondità anche superiore alla decina di metri, costituisce un intervento utile al riequilibrio del versante. In effetti le velocità di movimento rilevate dagli inclinometri sono negli ultimi tempi diminuite, anche se il versane non è ancora completante risanato.

Galleria

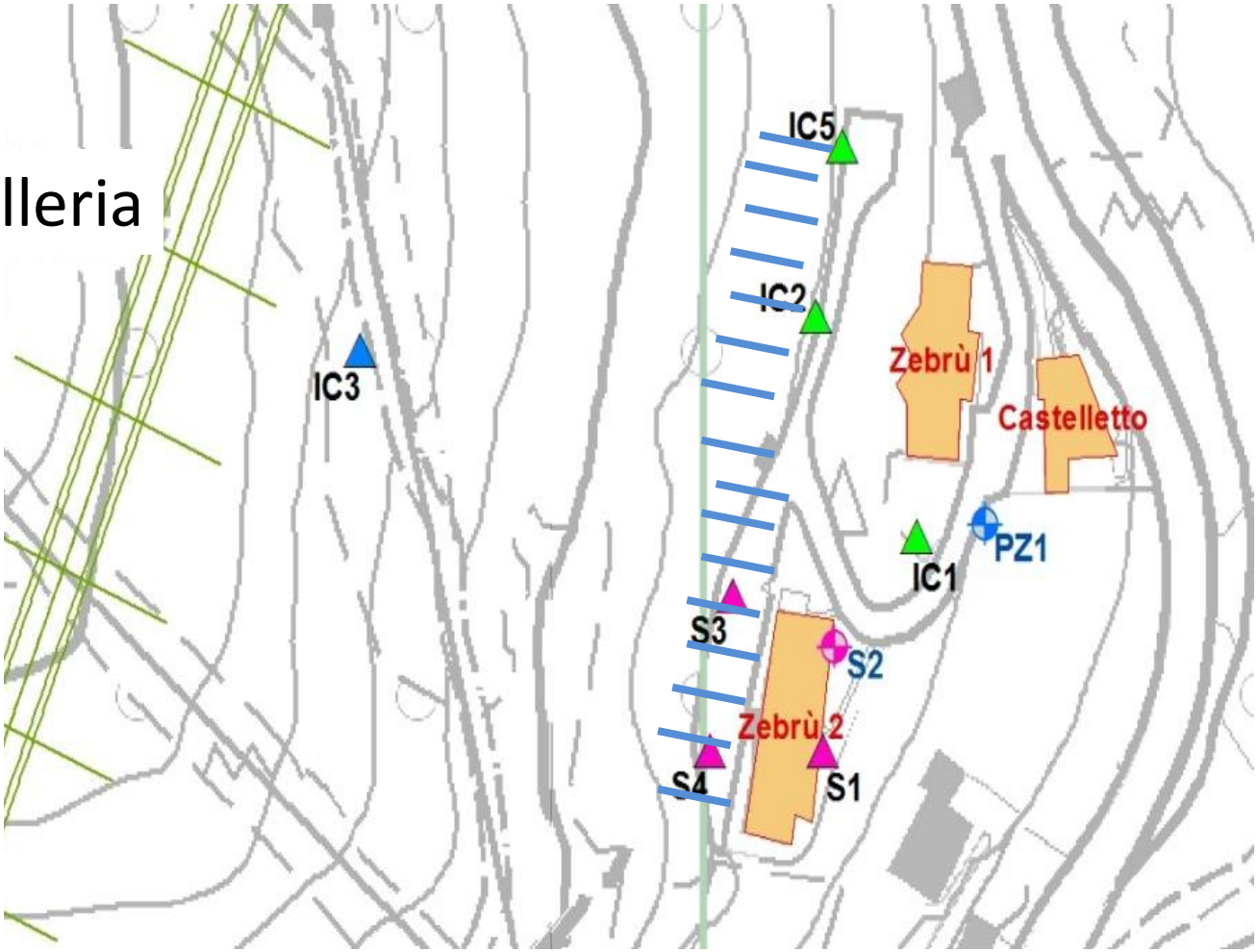


Foto dreni

Problemi prodotti dagli afflussi d'acqua in galleria

Problemi di smaltimento

- Deformazioni della galleria e sua instabilità
- Fermo cantieri
- Aumento della pressione sul rivestimento

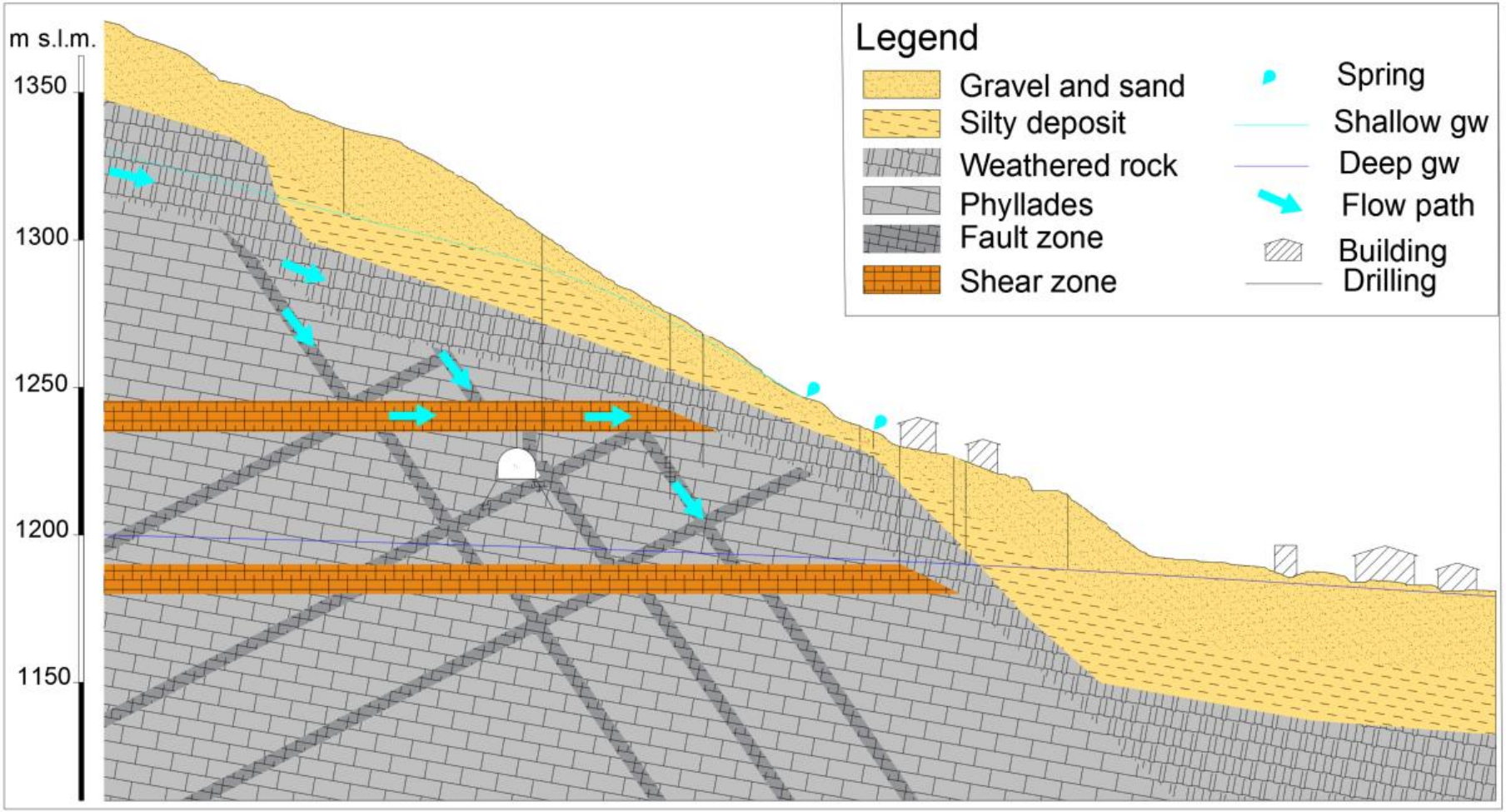
- inquinamento
- Disseccamento o riduzione delle portate delle sorgenti
- Depressione piezometrica

- Depressioni del suolo
- Interazione con la stabilità dei versanti

Le gallerie quando drenano acque sotterranee determinano gli inconvenienti riportati nello schema .

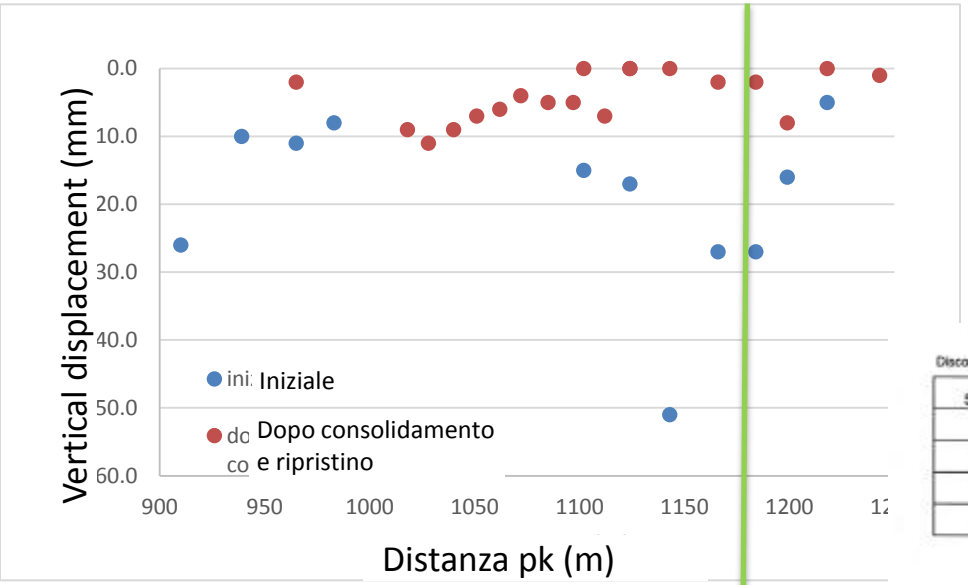
Nel caso in studio una galleria per la SS38, perforata sotto il corpo di frana, la cui posizione è riportata in pianta e sezione nelle figure precedenti, ha subito danni a causa dell'imprevista instabilità del versante per il forte stato di fratturazione dell'ammasso roccioso e per le venute d'acqua che hanno accompagnato lo scavo.

Modello concettuale del versante

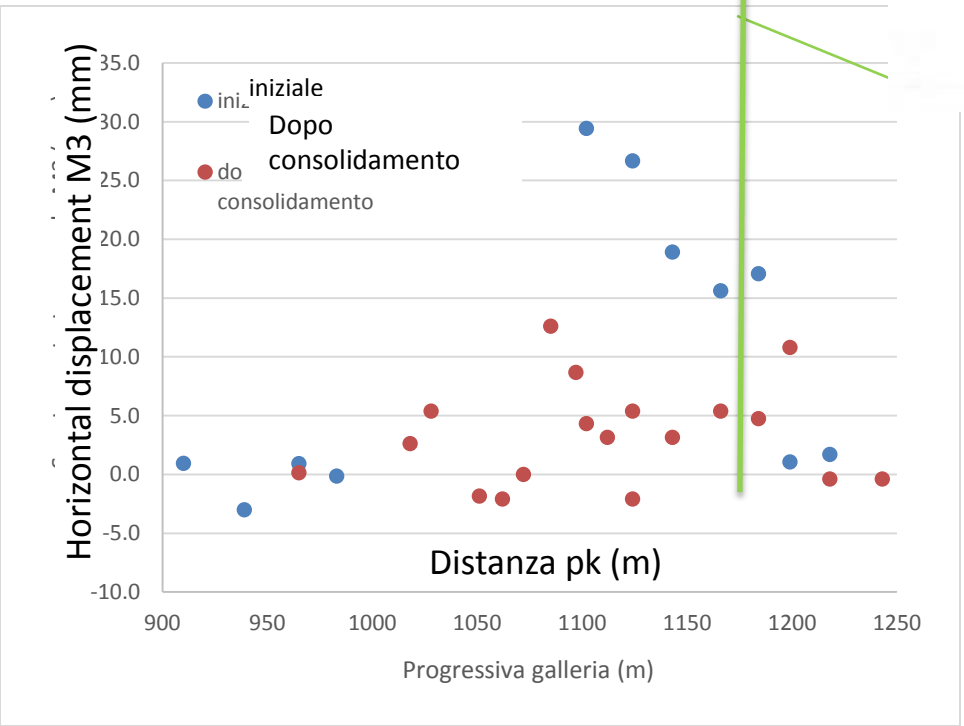


Per comprenderne le cause è stato effettuato ,utilizzando rilievi di superficie e sondaggi, lo studio geologico strutturale del versante che ha permesso di ricostruire la disposizione delle discontinuità principali, lungo le quali la roccia presenta uno stato di fratturazione e di apertura che dà luogo a estesa circolazione idrica lungo un sistema di discontinuità ortogonali e lungo superfici interpretabili come sovrascorrimenti di grandi masse di roccia.

Effetti sulle deformazioni dello scavo

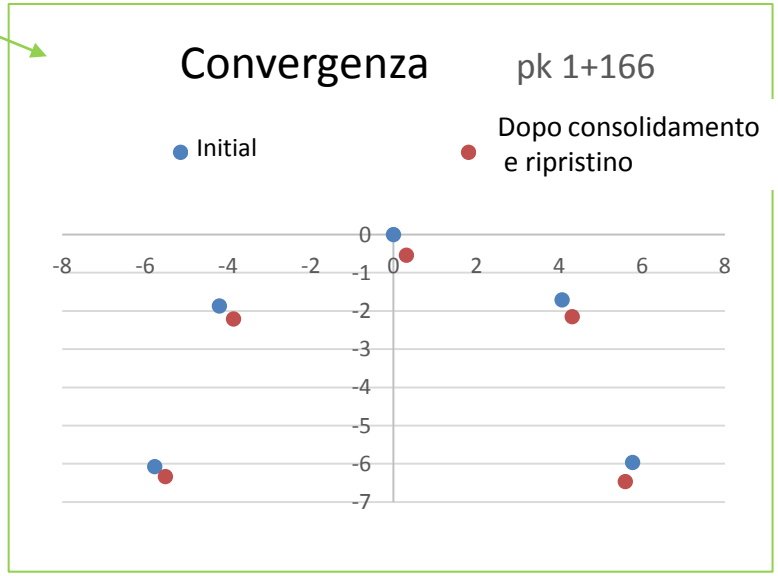


Durante l'attraversamento delle shear zones caratterizzate da cataclasiti e ampie zone di frattura, si sono avute notevoli deformazioni orizzontali e verticali nel tratto caratterizzato da venute d'acqua , che si sono fermate solo dopo il consolidamento del cavo eseguito con iniezioni a raggera di cemento



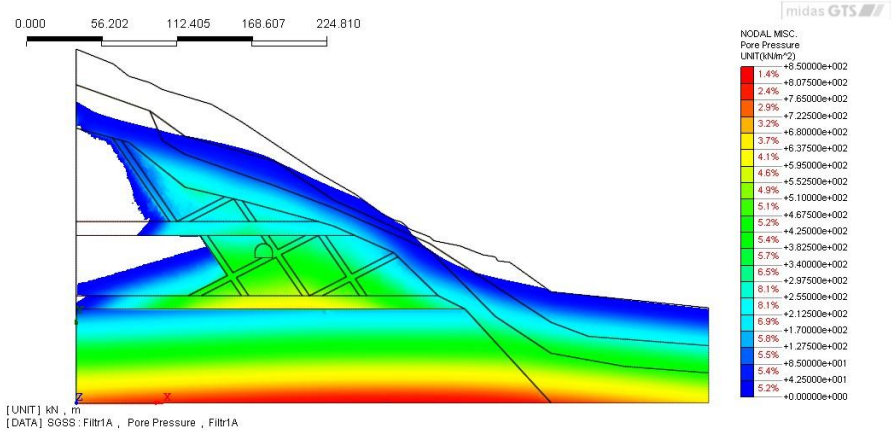
LEGENDA

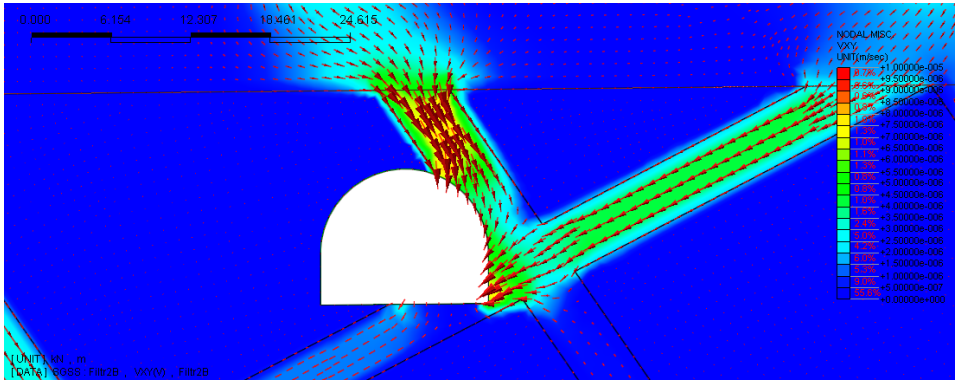
Discontinuità		Giacitura
Smil	Sc	40/20
F1	F	360/15
F2	F	310/55
K2	G	100/40
K6	G	300/60



Tramite una modellazione matematica nella quale sono stati inseriti i valori di permeabilità misurati nei sondaggi e i parametri meccanici della roccia, si sono ricostruite le modalità di afflusso dell'acqua in galleria ,che si sposta lungo le permeabili zone di frattura che circondano il nucleo di faglia . I colori rappresentano la pressione esercitata dall'acqua: in blu le pressioni minori.

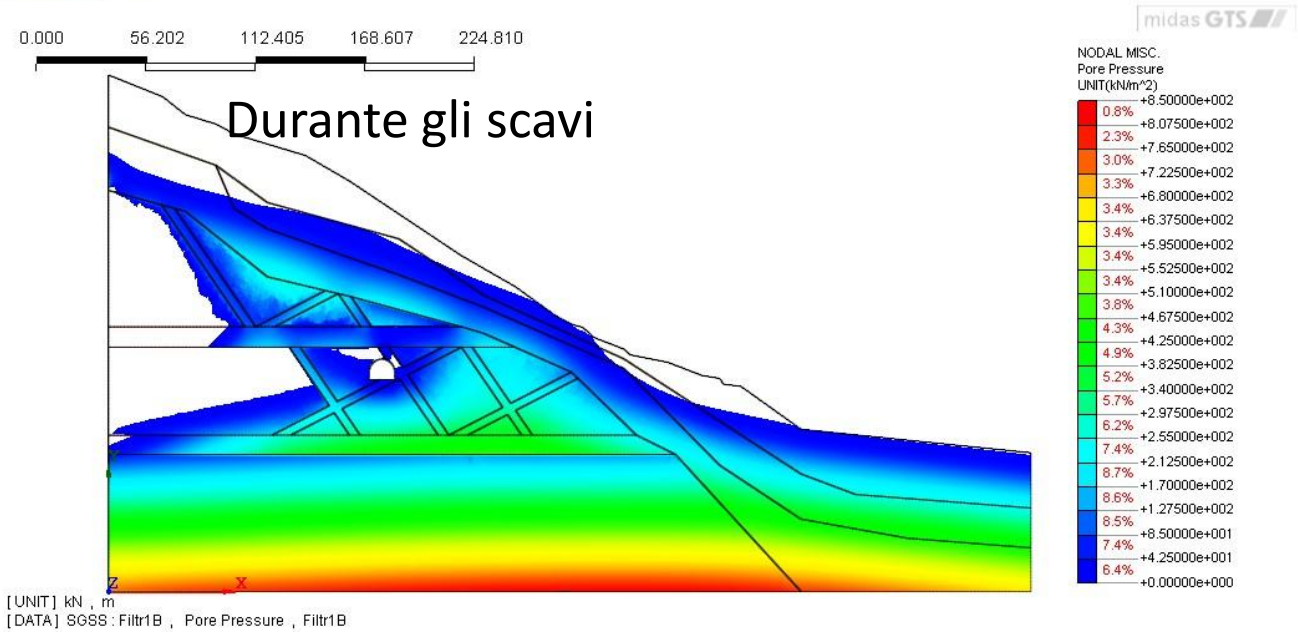
Prima degli scavi





Si nota che lo scavo produce l'azzeramento delle pressioni in galleria e quindi il richiamo d'acqua lungo le zone di frattura, che interessa anche il soprastante corpo di frana.

Durante gli scavi



	Fs				
Geological model	Dry		Wet		
	Initial	After tunnelling	Initial	Short term during tunnelling	Long term after tunnelling
With faults and shear zones	1.31	1.26	1.06	1.04	1.11

Conclusioni

L'esistenza non rilevata di un corpo di **frana nel quale era presente acqua ha influenzato la stabilità del cavo,** producendo uno squilibrio idrogeologico nel versante che si è tradotto in una temporanea condizione di instabilità con forti deformazioni ,come indica la **tabella.**

La successiva fase di interventi, piuttosto costosi per il volume di cemento iniettato, ha permesso di ridurre le conseguenze dell'apertura del cavo in condizioni pericolose. La galleria è oggi transitabile.

Si conclude che un approccio più approfondito avrebbe rivelato per tempo tramite l'analisi delle **foto aeree** (Google Earth) la possibile esistenza di un ben delineato movimento franoso. **Le successive indagini ne hanno consentito la caratterizzazione.** Di interesse particolare lo studio dendrocronologico e La sua applicazione per ricostruire l'età dell'inizio dei movimenti. L'intervento di **drenaggio** ha favorito il miglioramento delle condizioni di stabilità del versante e ha dato tempo per la progettazione di interventi di stabilizzazione profondi che si prevedono lunghi e costosi.

Il dissesto idrogeologico della Val Tartano

La val Tartano è caratterizzata da un’ampia conoide che occupa un’area superiore al km quadrato, che si è formata in seguito a una frana all’inizio del secolo scorso. La valle è molto franosa e il trasporto solido verso la conoide risulta molto elevato , per il persistere dei dissesti che hanno dato origine alla conoide. Questa estesa superficie non può essere utilizzata in alcun modo e si desidera individuare quali interventi siano necessari per il ripristino della sua agibilità con un inalveamento progettato in modo da evitare che sia ostruito dalla deposizione di materiale alluvionale, in gran parte proveniente dai versanti in frana.

A una soluzione di questo tipo stanno lavorando gli enti , supportati da un gruppo di progettisti che ritiene fattibile un intervento di **arginatura dell’apice** della conoide **, previa un’accurata indagine idrogeologica** che stabilisca quali sono le cause del persistere dei dissesti e del materiale solido che ne deriva.

Lo studio dell’influenza delle acque sotterranee sulla stabilità dei versanti del bacino richiede un’analisi multidisciplinare come quella esposta per il caso precedente, a iniziare dalla **geomorfologia e dalla climatologia,** per procedere tramite la **ricostruzione geologica basata sulla geofisica** e infine della s**truttura idrogeologica dell’ammasso roccioso.**

Conoide del t.Tartano dopo l'alluvione del 1911

Elenco degli eventi catastrofici e frane nella valle del t.Tartano e sulla sua conoide (ricostruzione della Regione Lombardia, che comprende oltre 50 eventi)

Anni 1450, 1460, 1Debris flow 1479

1816, 1827, 1829, 1834, 1836, 1839, 1844, 1855, 1856, 1857, 1868, 1885, 1886, 1888, 1889, 1890, 1891, 1892, 1895, 1896, 1897

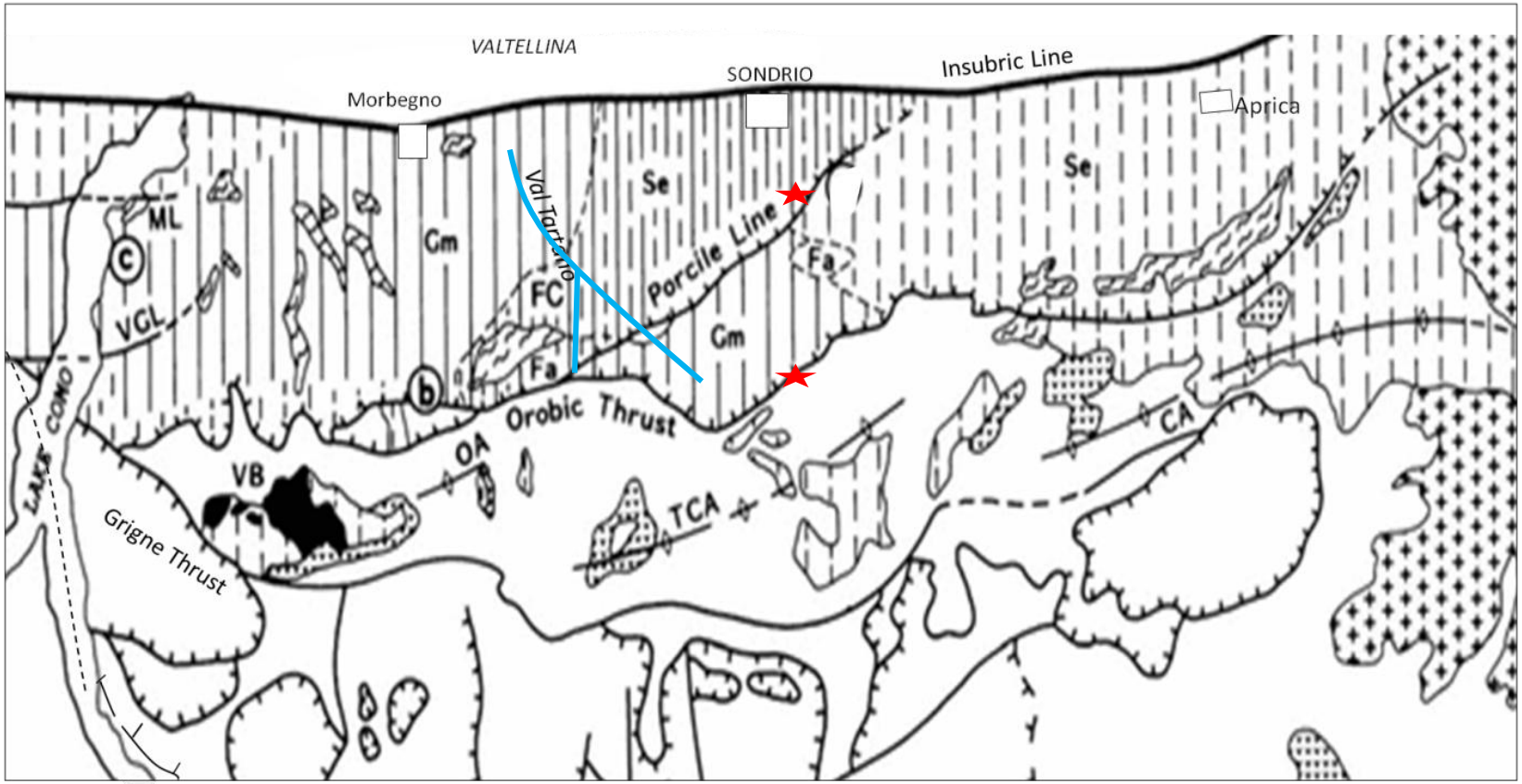
1901, 1901, 1903, 1905, **1911**, , 1912, 1913, **1914**, **1915**, 1916, **1917**, 1927, 1928, 1933, 1934, 1937, 1960, 1963, 1965, 1968, 1985, 1991), 3Debris flows (1885, 1911, **1987**),1 alluvione con Debris flow (1951); 88

Dall'esame della storia delle catastrofi avvenute, risulta evidente che la franosità della valle è ricollegabile a **fattori meteorologici** (particolarmente catastrofico quello del 1987) e alle **caratteristiche idrogeologiche** .Non sono state notate conseguenze degli insediamenti abitativi e delle infrastrutture , tuttora modeste.

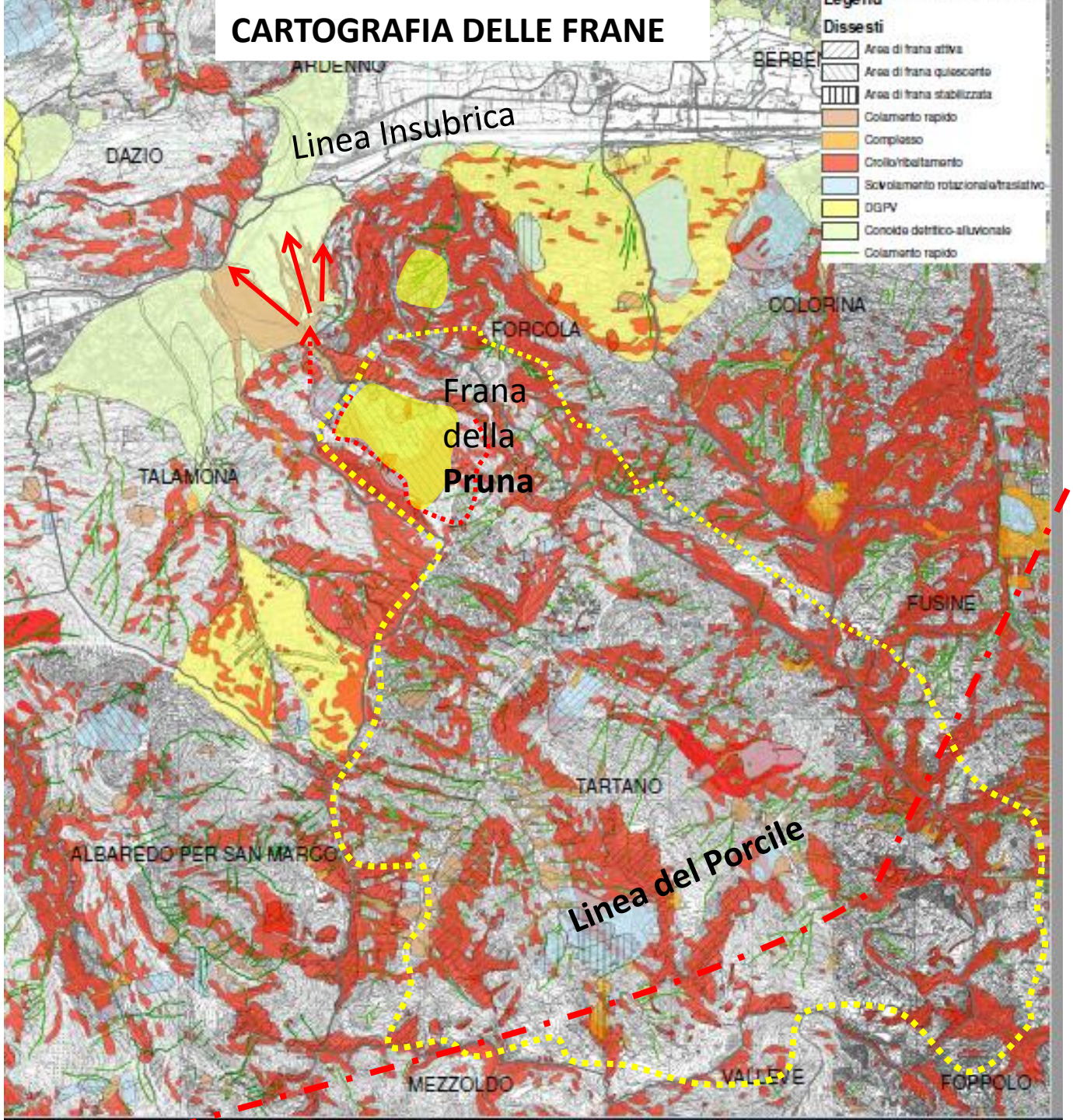
Aspetti geomorfologici e geologici che determinano le condizioni di instabilità: anzitutto la tettonica, che presenta la particolarità dell'incrocio nella zona di diversi importanti sistemi di dislocazioni connessi con la linea Insubrica (faglia trascorrente che percorre l'arco alpino dal Veneto alla zona di Ivrea) e con i sovrascorrimenti detti Linea del Porcile e Linea Orobica , che danno luogo alla sovrapposizione di importanti volumi di rocce metamorfiche .

Questi sistemi di dislocazioni sono accompagnati da **cataclasiti** che generano fasce di grande debolezza, anche perché danno luogo a un sistema di **circolazione idrica sotterranea che favorisce la franosità**

condizioni geologiche che sono alla base dello squilibrio idrogeologico



Parallelamente alla linea Insubrica e alla linea del Porcile, che sono le dislocazioni di maggiore interesse, si sviluppano fitti sistemi di fratture che interessano profondamente la compagine rocciosa del bacino del Tartano.
I maggiori movimenti franosi sono impostati sulle zone di roccia debole prodotte da questi sistemi di fratture.

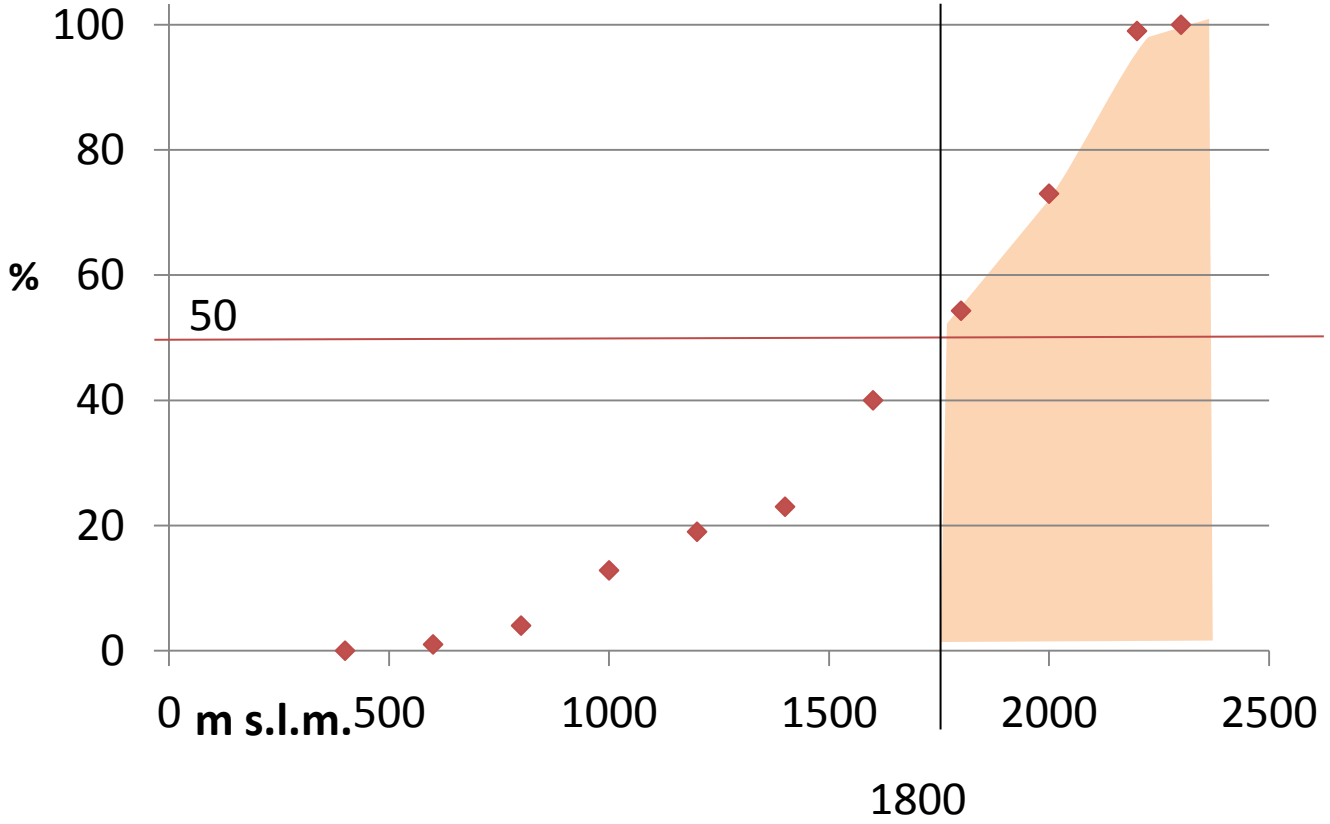


Le aree di roccia fratturata sono in rosso, in giallo le grandi frane
Le frecce indicano gli alvei percorsi dall'esondazione sulla conoide nel 1987
In giallo quattro profonde frane che colpiscono il versante meridionale all'incrocio fra Linea Insubrica e Linea del Porcile.

Fra esse è quella della **Pruna** che produsse l'alluvione del 1911

La predisposizione climatologica al dissesto è rafforzata dal fatto che **le aree più piovose sono quelle più elevate,che costituiscono oltre il 50% del bacino del Tartano**

Curva ipsografica: le quote più elevate di 1800 m s.l.m.occupano il 50% del bacino

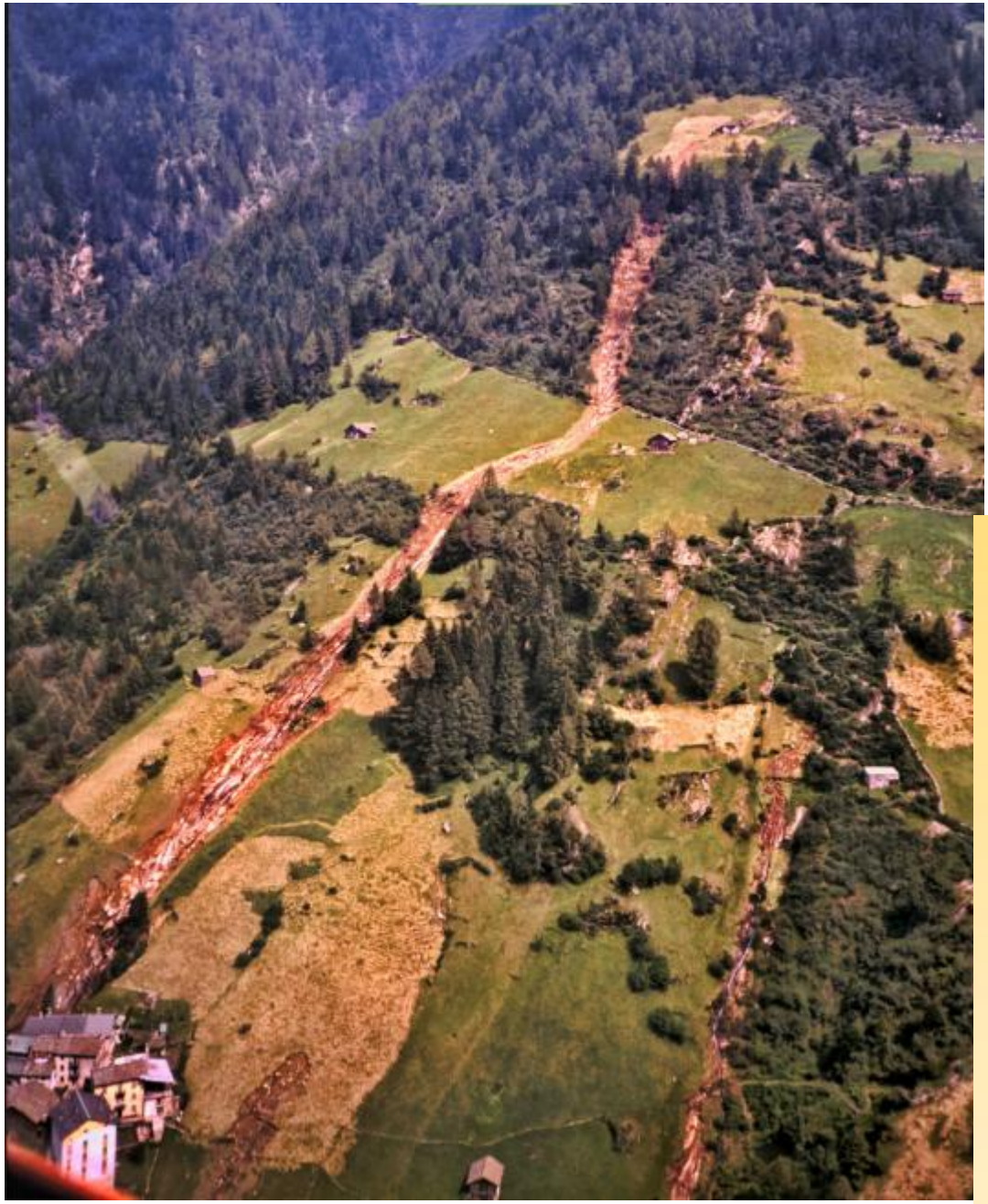


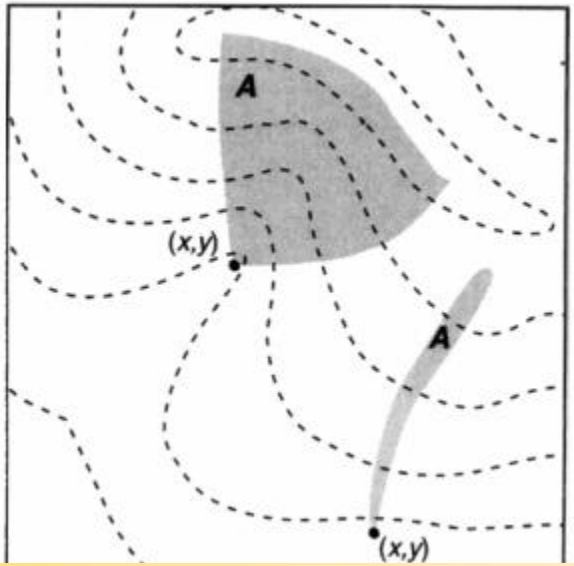
Settore

Orobie valtellinesi	24h (day)	17-19 luglio	13-25 luglio	1-31 luglio
stazione				
Lago di Scais (1500 m/slm)	305 (18)	479*	523	557
Armisa Ca' Pizzini (1041 m/slm)	265 (18)	410	463	492
Lago di Trona (1800 m/slm)				477,6
Pescegallo (1805 m/slm)				477
Campo Tartano (958 m/slm)	165 (19)	271	345,6	386
Diga Panigai (765 m/slm)	86 (18)	189	275	333,4
Vedello (1060 m/slm)	115 (18)	218	289	332
Aprica (1181 m/slm)	111 (19)	168	243	327
Lago Venina (1800 m/slm)	105 (18)	183	263	311
Lago Inferno (2100 m/slm)	128 (18)	279		

Fondovalle Valtellina				
stazione				
Ardenno (266 m/slm)	110 (19)	245		275,8
Sondrio (298 m/slm)	99 (19)	210		243*
Grosio (652 m/slm)				223
Semio (470 m/slm)	52 (19)	87,6*	139	197,6
Poschiavino (Tirano) (422 m/slm)	112 (19)	234		

Il **gradiente pluviometrico verticale** è stato molto elevato in occasione dell'evento del 1987, fatto aggravato dall'ampiezza delle aree detritiche che si trovano oltre i 1500 m





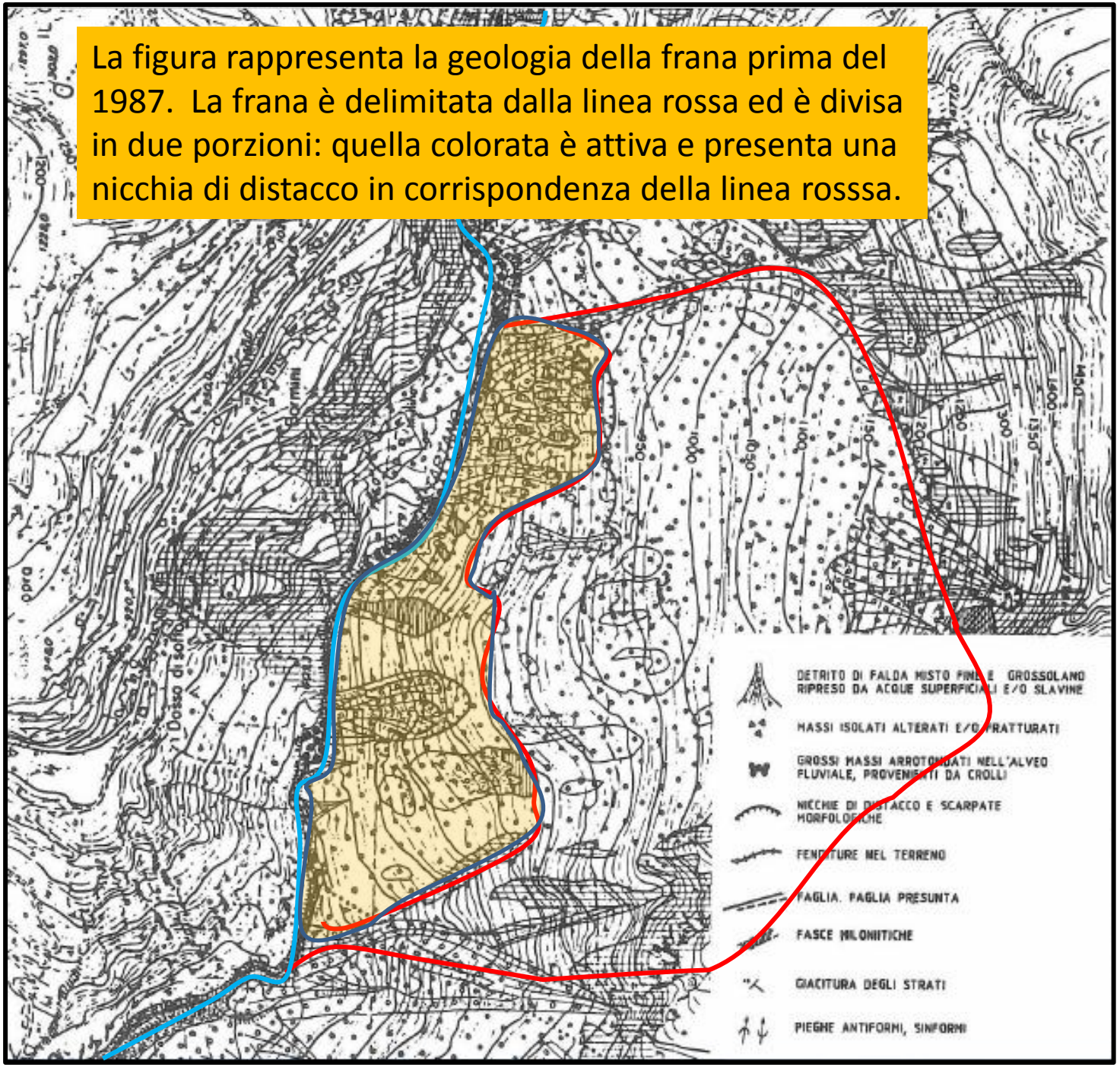
La grande prevalenza delle aree situate a quote alte, espone il bacino a eventi meteorologici come quello del 1987, caratterizzato da un elevato gradiente pluviometrico verticale.

Le acque di scorrimento superficiale , molto copiose,convergono verso le depressioni vallive già alle alte quote, convogliando verso il basso i detriti erosi .

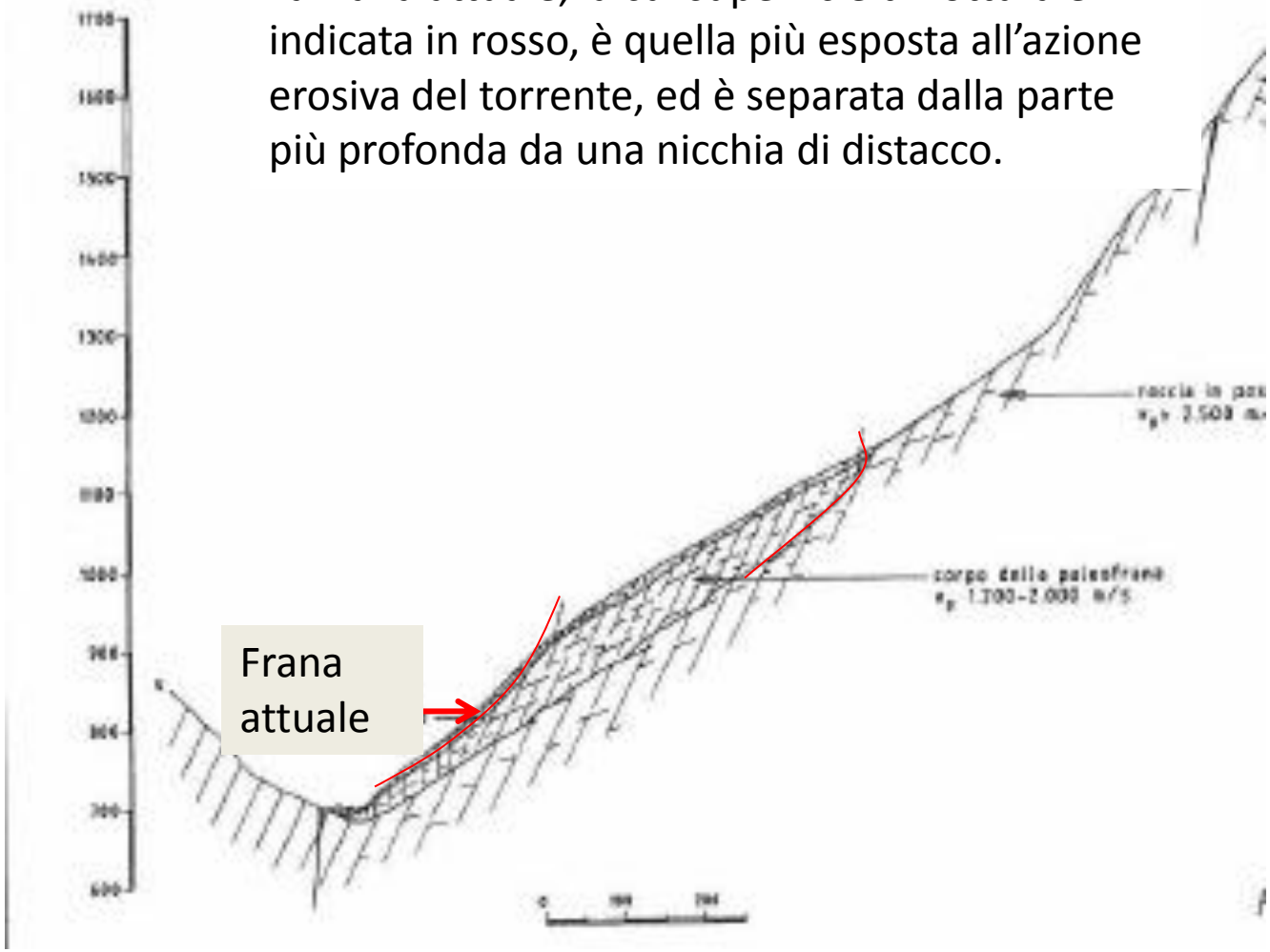
Geologia della frana della Pruna

Per prima cosa è stato necessario chiarire la natura del dissesto e i motivi dell'instabilità. Posizionando gli inclinometri si è notato che sussiste un lentissimo movimento della porzione più ampia che costituisce la parte alta del versante. Tale settore non dà preoccupazioni. Qualche rapido spostamento si verifica invece sul fronte in occasione delle precipitazioni. La geofisica permette di suddividere anche in profondità i due settori a comportamento diverso.

La figura rappresenta la geologia della frana prima del 1987. La frana è delimitata dalla linea rossa ed è divisa in due porzioni: quella colorata è attiva e presenta una nicchia di distacco in corrispondenza della linea rosssa.



La frana attuale, la cui superficie di rottura è indicata in rosso, è quella più esposta all'azione erosiva del torrente, ed è separata dalla parte più profonda da una nicchia di distacco.



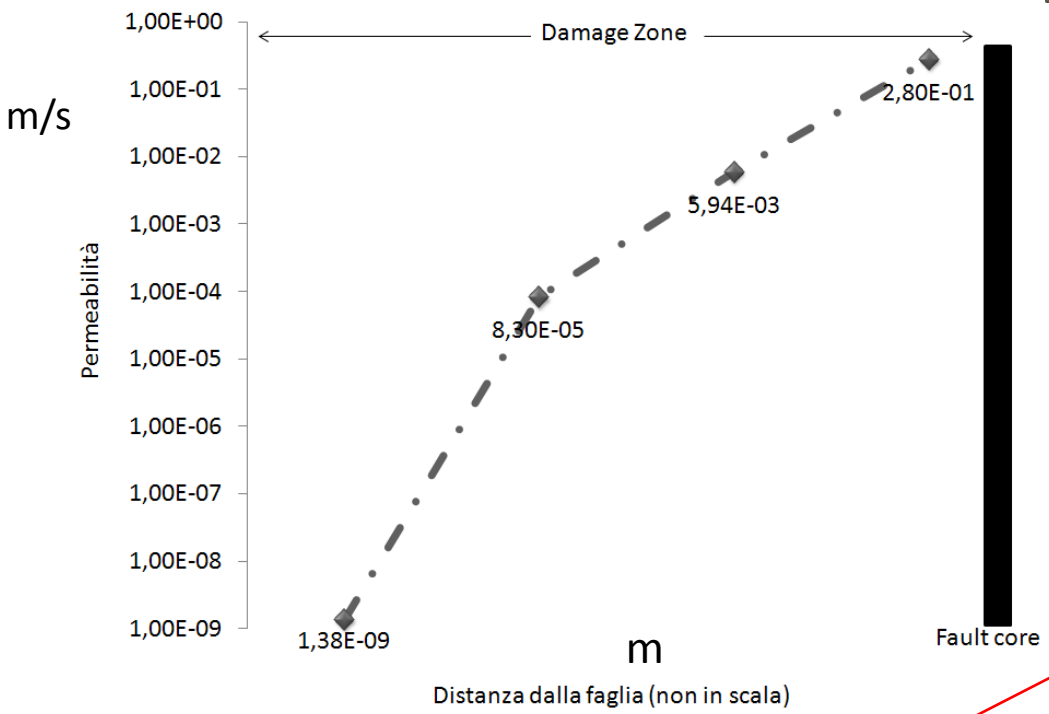
Le frana si presenta come un corpo roccioso diviso in due parti. Quella più profonda è una frana quiescente o stabilizzata, slittata verso valle di oltre 100 m , e separata dalla roccia in posto da un avvallamento riempito di detriti . Quella più superficiale e attiva è meno spessa ma più mobile, essendo riattivata dagli episodi pluviometrici maggiori.

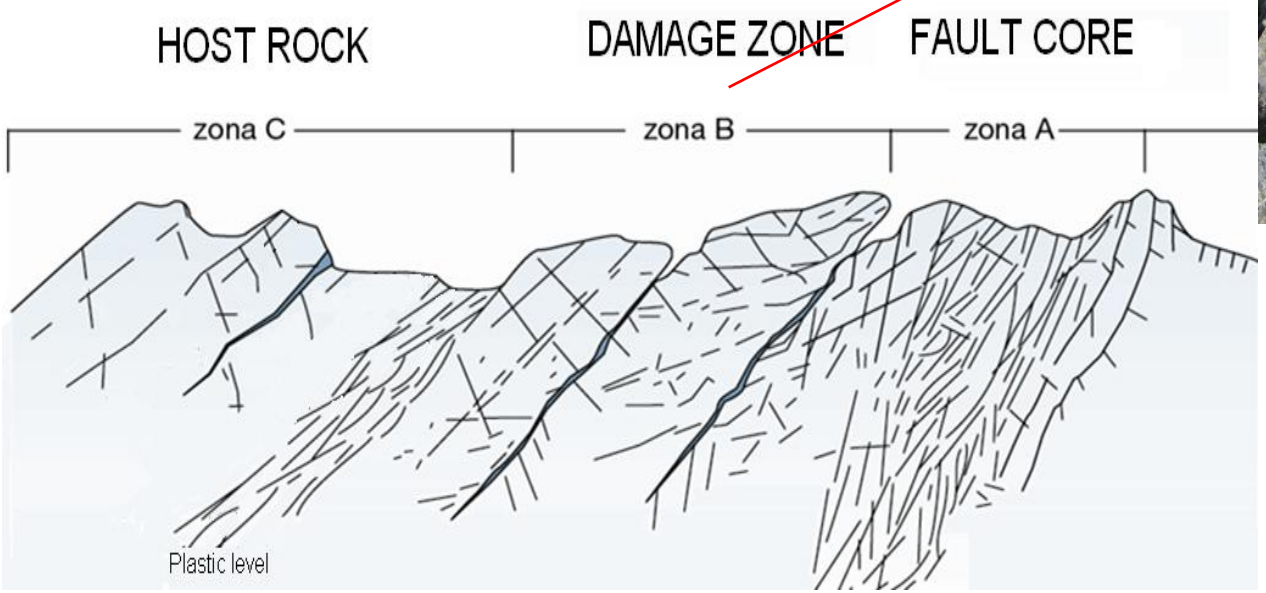
Le cause del movimento della frana

La ricostruzione geologico-strutturale, ponendo in evidenza il fatto che la massa rocciosa è solcata da sistemi di faglie con cataclasiti che si intersecano con grande frequenza , chiarisce che la circolazione idrica avviene attraverso le zone di frattura (damage zones) che circondano il nucleo della faglia, costituito dalle cataclasiti poco permeabili. **Superfici di rottura parallele al versante** favoriscono lo slittamento dei blocchi prismatici separati dalle discontinuità descritte.

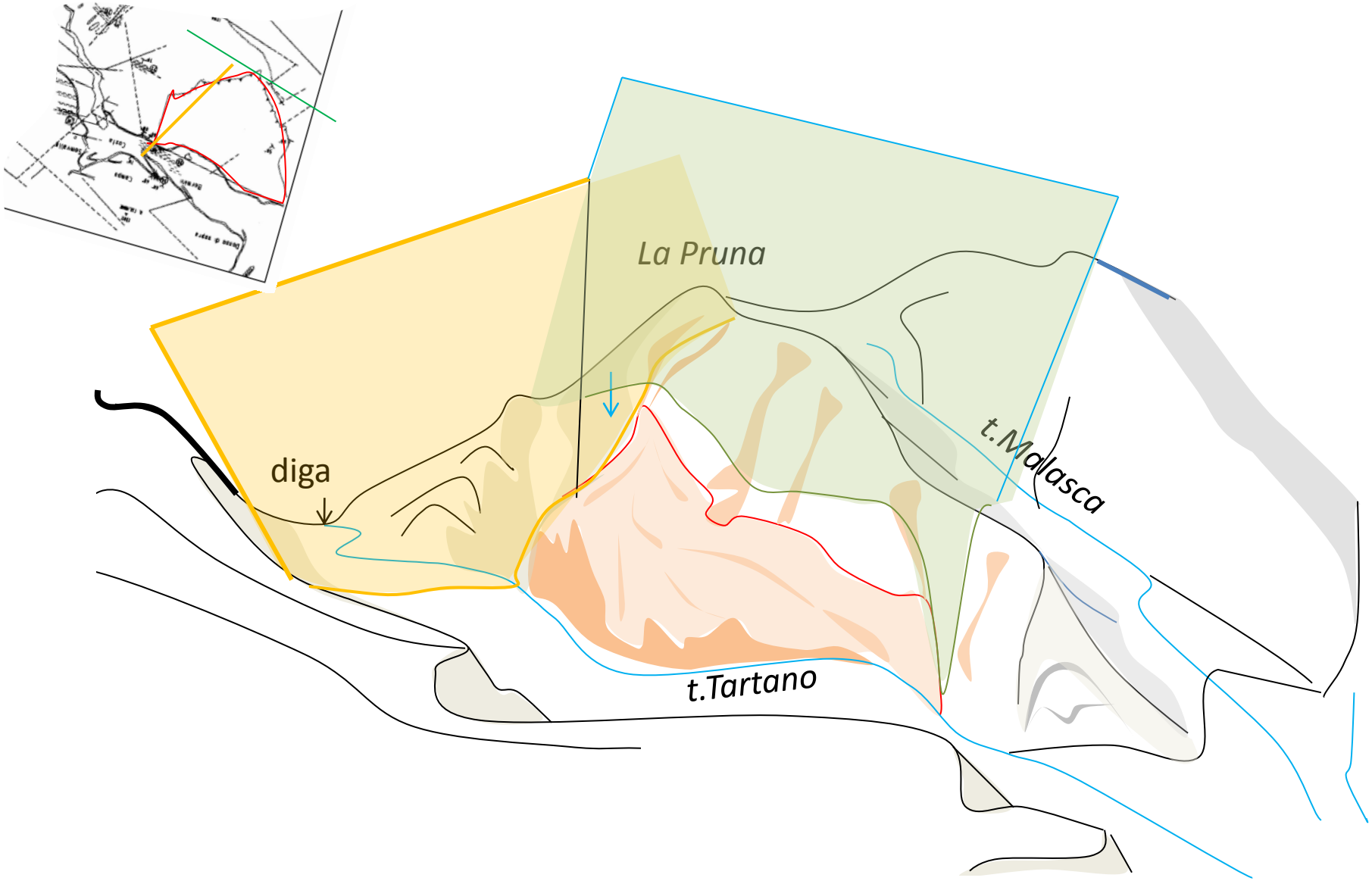
Dato che acque sotterranee agiscono in modo particolarmente efficace sulle **superfici di debolezza disposte su piani ortogonali alla cadente piezometrica**, come effettivamente si verifica nel corpo di frana , come indica il diagramma strutturale che riassume le condizioni rilevate, il versante risulta particolarmente esposto al dissesto.

Si sottolinea che la distribuzione delle permeabilità negli ammassi fratturati, descritti dalla figura successiva, è tale da favorire grandemente la circolazione nelle zone di frattura (damage zones) . La circolazione idrica è a tutti gli effetti **canalizzata** lungo queste fasce, limitate dalle cataclasiti impermeabili.

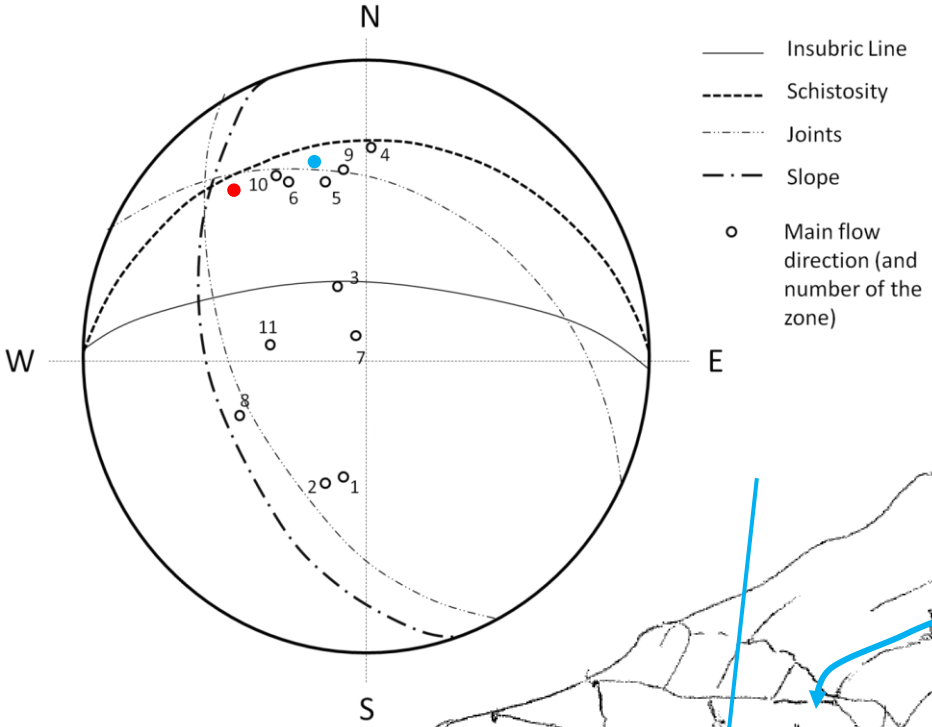


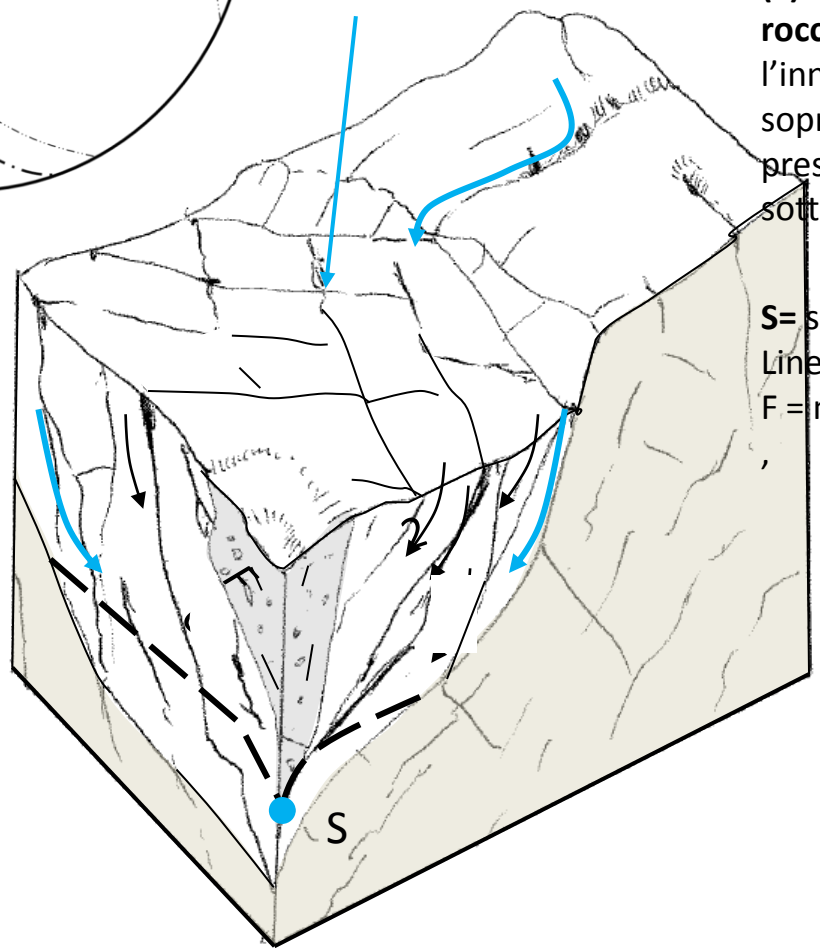


La frequenza delle zone di faglia rende instabile l'ammasso roccioso, in quanto si combinano gli effetti **dell'aumento di permeabilità** nella fascia di roccia fratturata **(DZ)** e della scarsa resistenza della **zona di faglia**



I sistemi di discontinuità principali si intersecano in modo da favorire la convergenza delle acque di infiltrazione verso il centro del versante in frana





La convergenza del flusso idrico lungo fratture verso la zona satura limitata alla base dalla roccia più compatta e meno permeabile aggrava le condizioni di stabilità dell' ammasso roccioso.
La presenza di **fasce di cataclasiti (F) all'interno dell'ammasso roccioso lungo le fratture** favorisce l'innesco di movimenti franosi soprattutto dove agisce la pressione esercitata dalle acque sotterranee.

S= sorgente
Linea a tratti: livello piezometrico
F = nucleo di faglia con cataclasiti
,

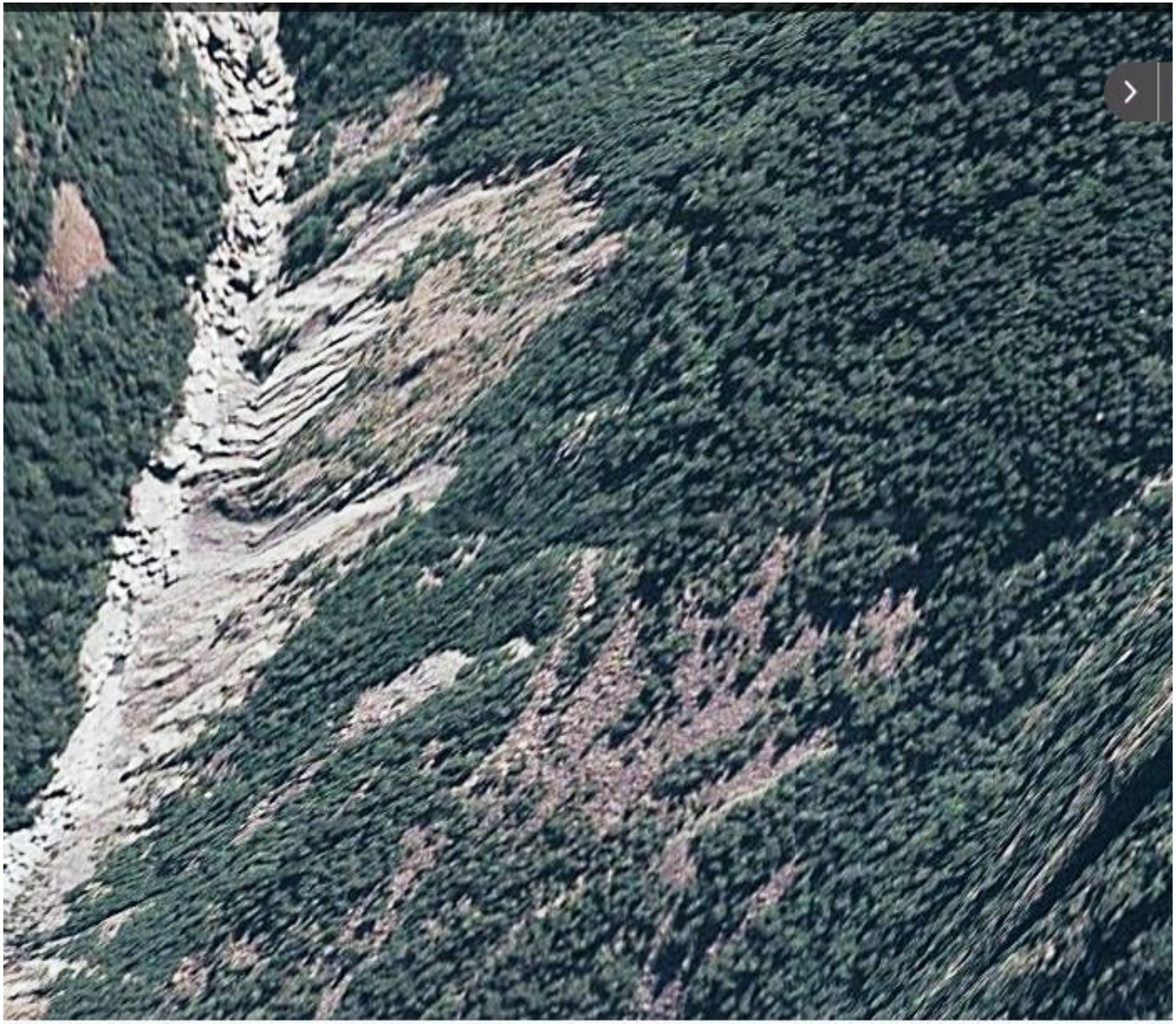
L’accumulo di detrito alla base della frana avviene nei periodi di scarse precipitazioni. Quando invece le piogge sono elevate e le portate del torrente sono più forti, avviene lo scalzamento del detrito e il suo trasporto verso valle .

Lo studio idrogeologico ha portato a ricostruire uno schema di inizio ed evoluzione dei movimenti franosi nelle rocce dell’area, caratterizzata dall’intersezione di importanti sistemi di faglie accompagnate da cataclasiti e da zone di frattura più permeabili.
Si può concludere che i versanti sono intrinsecamente soggetti al dissesto e che la fattibilità delle opere dipende in larga misura dal bilancio fra i volumi di detrito di frana che affluiscono al fondovalle e i volumi che il t.Tartano può asportare. Al momento attuale , come dimostrano le foto successive, gran parte della massa detritica è stata asportata, ed è quindi da prevedere che la canalizzazione dell’apice della conoide non incontrerà problemi .
Tuttavia un accurato monitoraggio dei dissesti in atto dovrà controllare se vi è la possibilità che ingenti masse di detrito di frana possano riprendere a confluire sul fondo valle. Il buon funzionamento del progetto sarà dunque condizionato dall’accuratezza delle previsioni che si potranno effettuare tramite il sistema di controllo.

2003

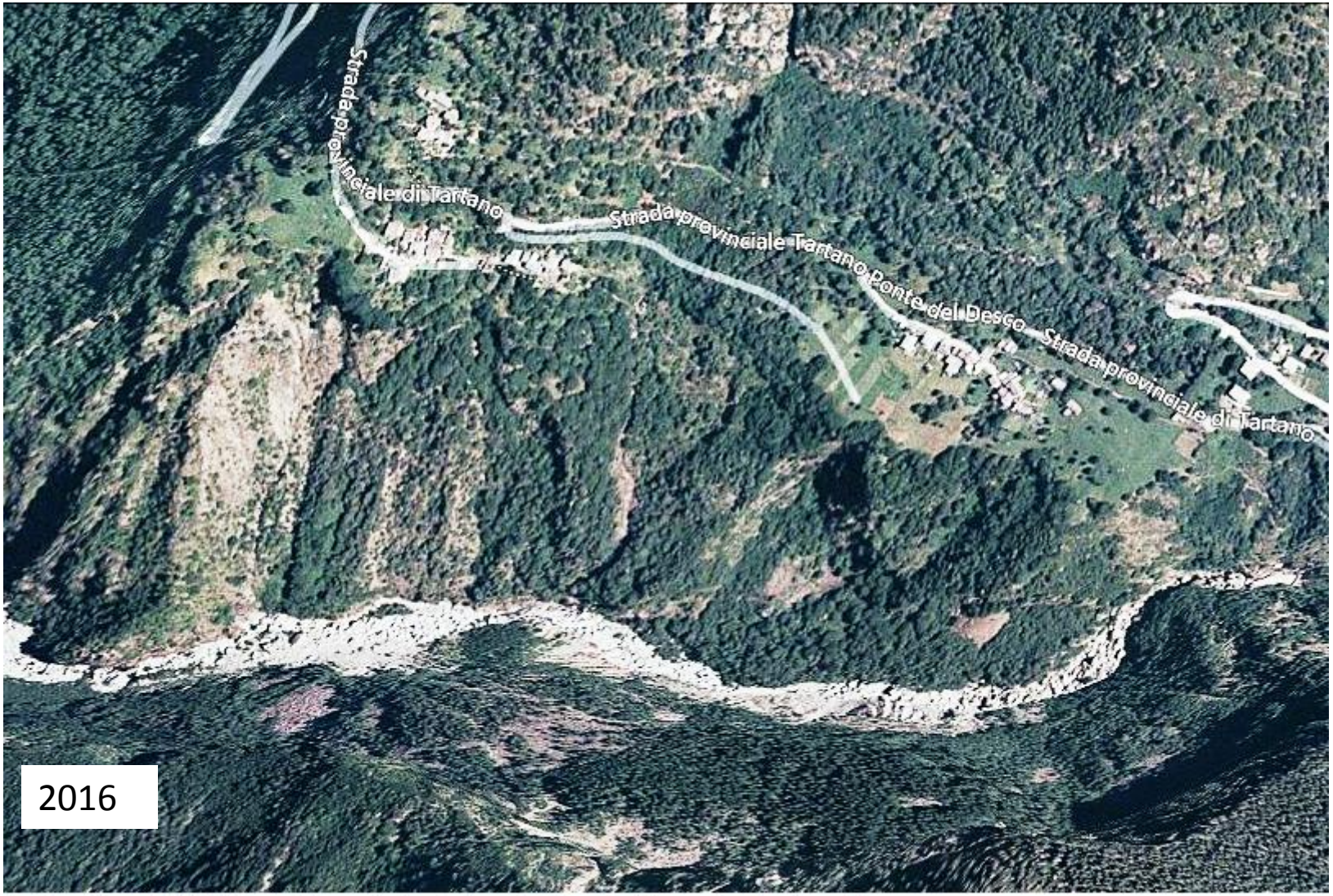
I coni detritici al piede del versante erano continui e mostravano solo rari affioramenti di roccia

Dopo il 2010 emergono gli affioramenti di roccia fratturata e alterata sotto la coltre detritica che costituiscono il corpo della frana più superficiale



La roccia sul fondovalle al piede della frana è ormai affiorante per la progressiva erosione della coltre detritica meno stabile. Le foto successive mostrano anche i degrado delle pareti rocciose sul versante opposto a quello della frana della Pruna.

La linea rossa tratteggiata può essere l'affioramento di una zona di frattura parallela al versante settentrionale, che giustifica i dissesti che si manifestano sul fianco settentrionale della valle in questo tratto

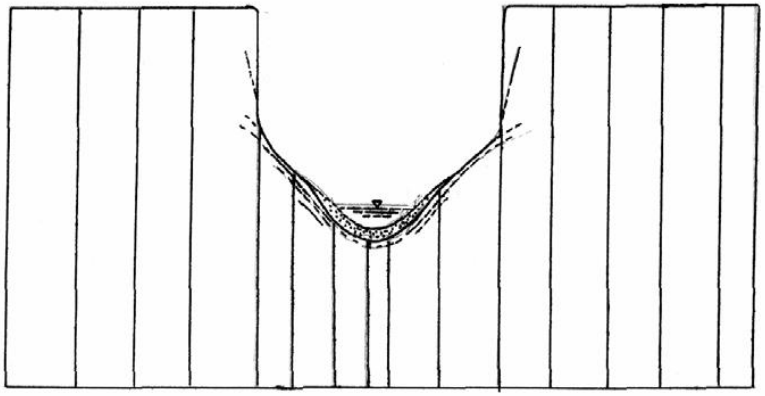


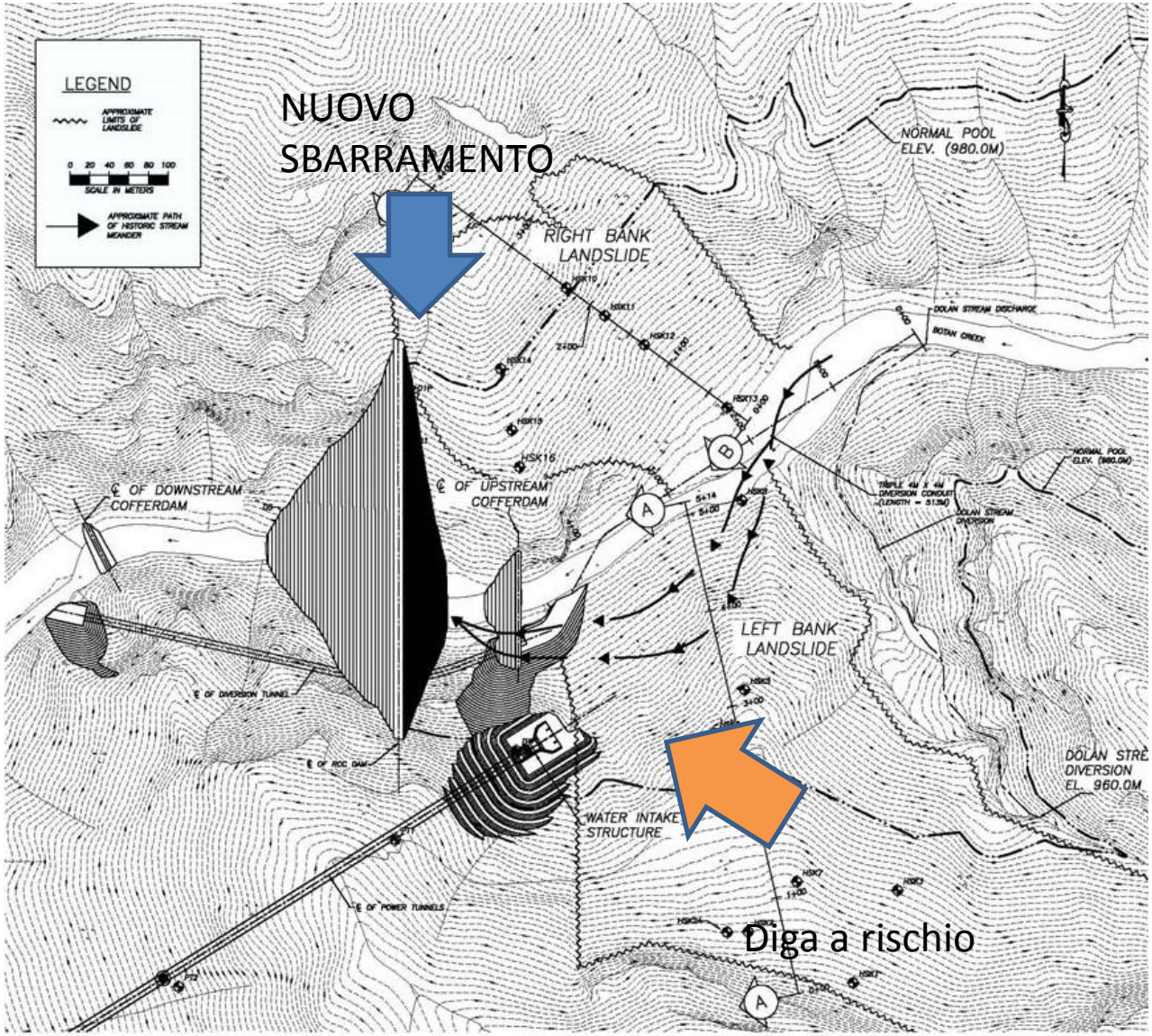
La foto evidenzia l’estensione del degrado negli anni del medesimo versante .

Studi idrogeologici per la stabilità dei versanti dei serbatoi artificiali

Un **primo tipo di inconveniente** è dovuto alla presenza di discontinuità parallele al versante nella zona di imposta della diga

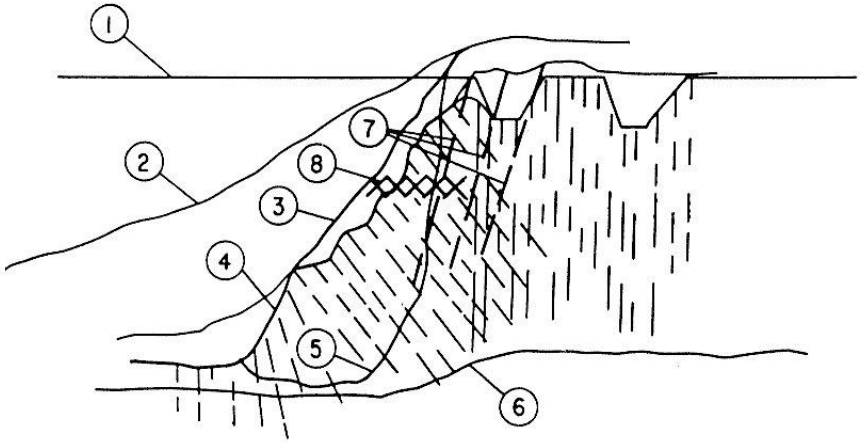
Nello schema e nella fotografia, si nota come i giunti di versante seguano la morfologia della parete,favorendo le filtrazioni verso l'esterno





In alcune circostanze, a questa filtrazione fa seguito l’instabilità della parete, in conseguenza delle elevate pressioni dell’acqua nei giunti

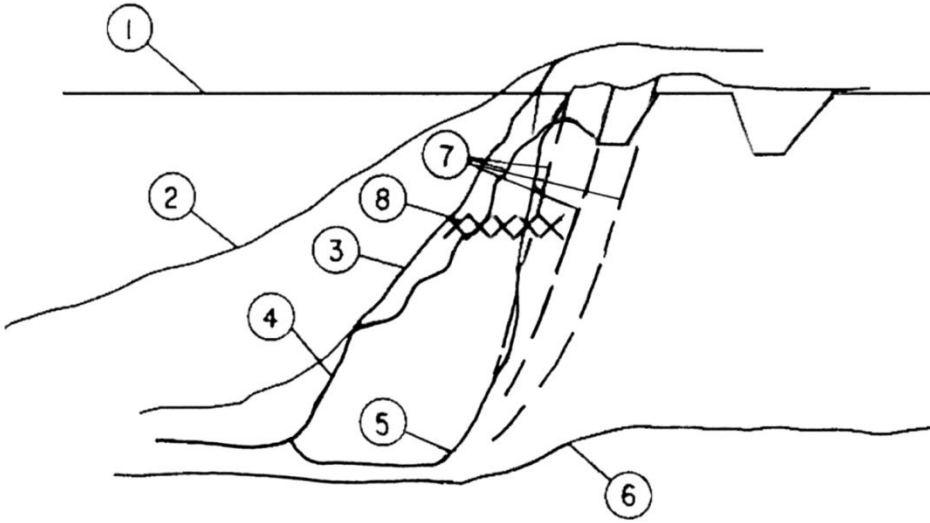
La foto mostra come le filtrazioni d’acqua lungo le discontinuità ne producano l’allargamento e favoriscano l’aumento delle perdite fino al cedimento dello sbarramento.



Right Abutment Detail.

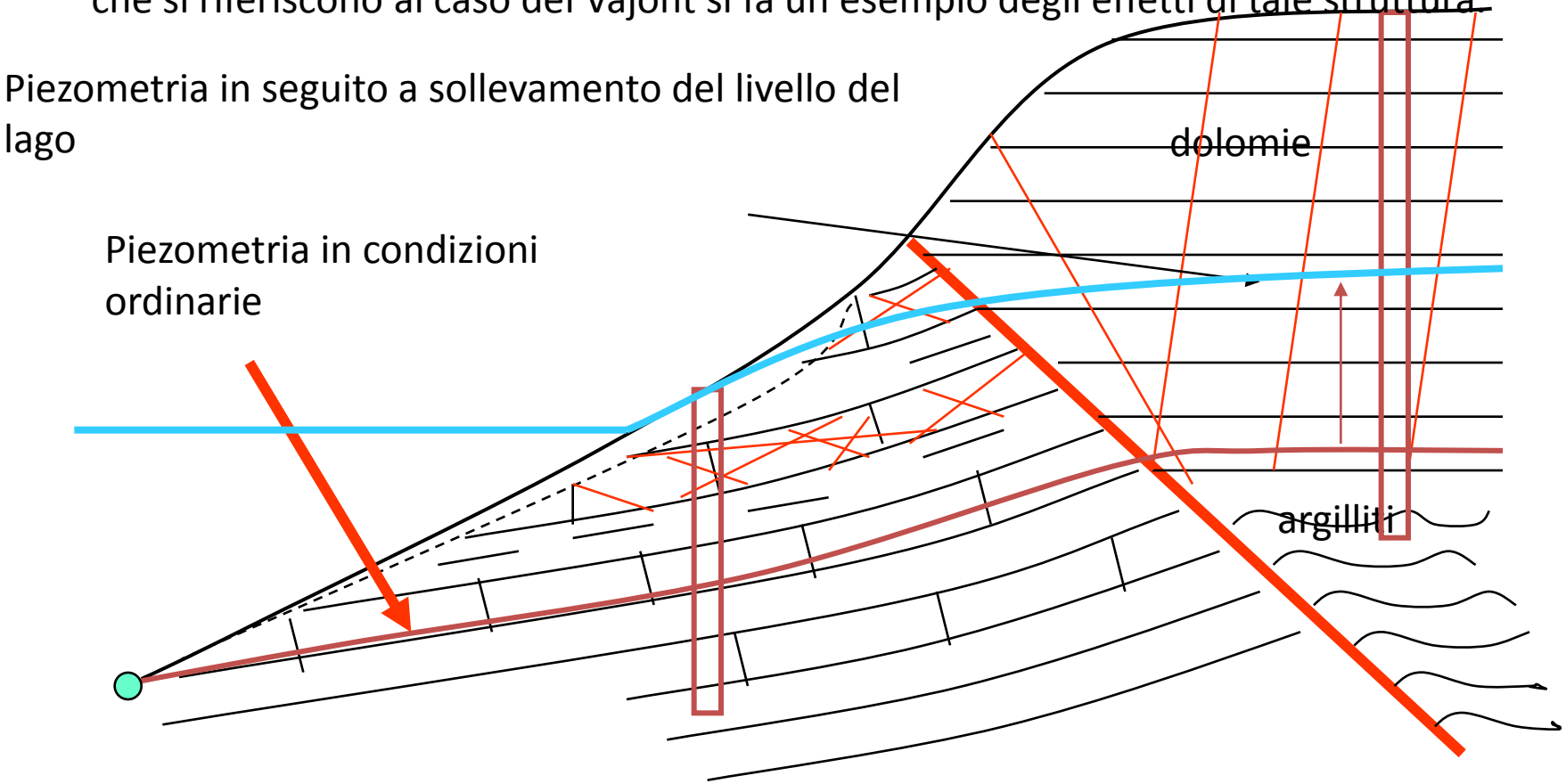
Plan :
(A) Embankment.
(B) Spillway.
(C) Canal outlet.
(D) Road.
(E) September 3, 1965, leakage and slough.
(F) Open cracks.

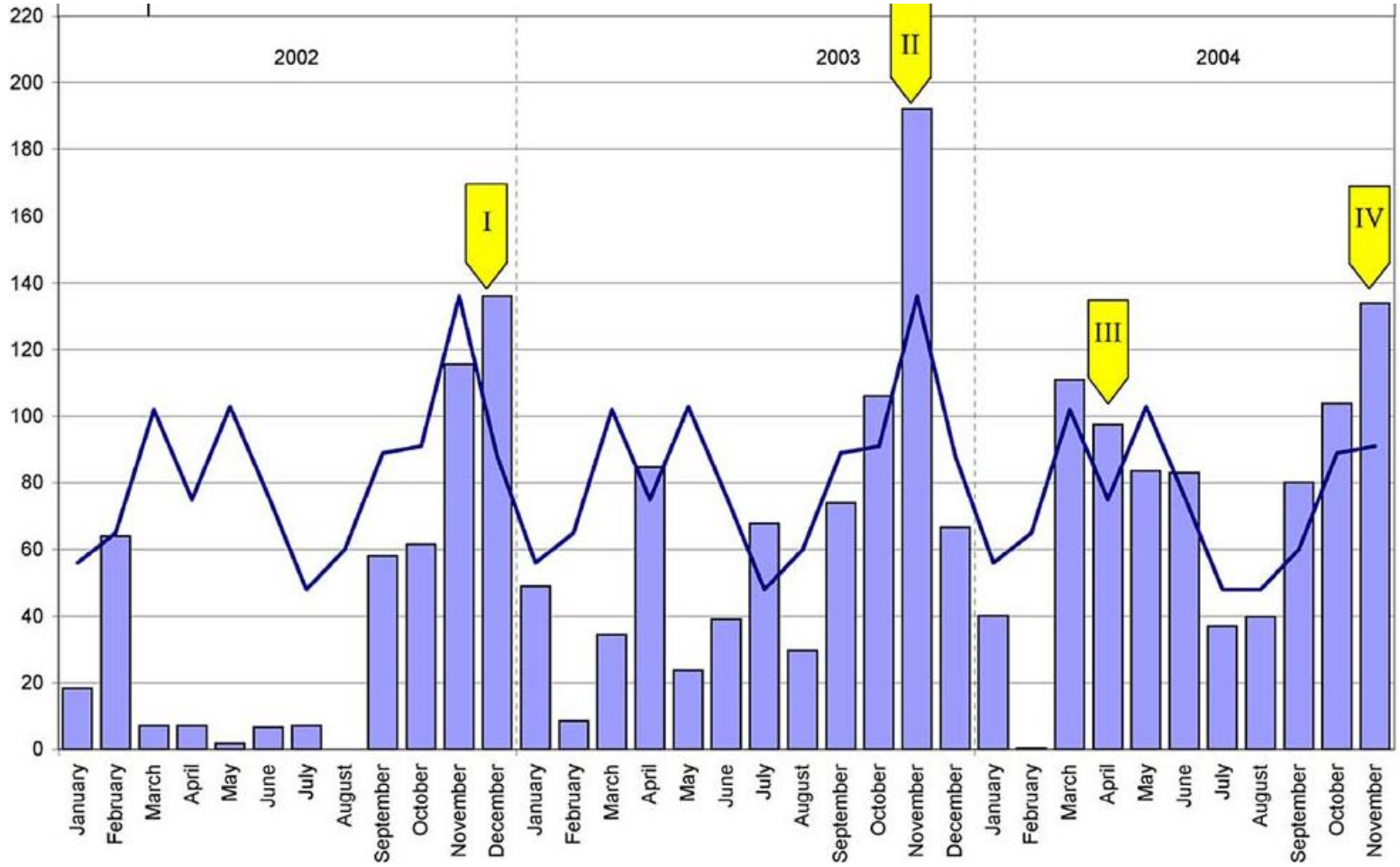
Section :
(1) Dam crest.
(2) Downstream abutment slope.
(3) Abutment slope at dam centerline.
(4) Bedrock surface at dam centerline.
(5) Upstream abutment slope.
(6) Lower limit of grout acceptance.
(7) Open cracks.
(8) Approximate location of leak.



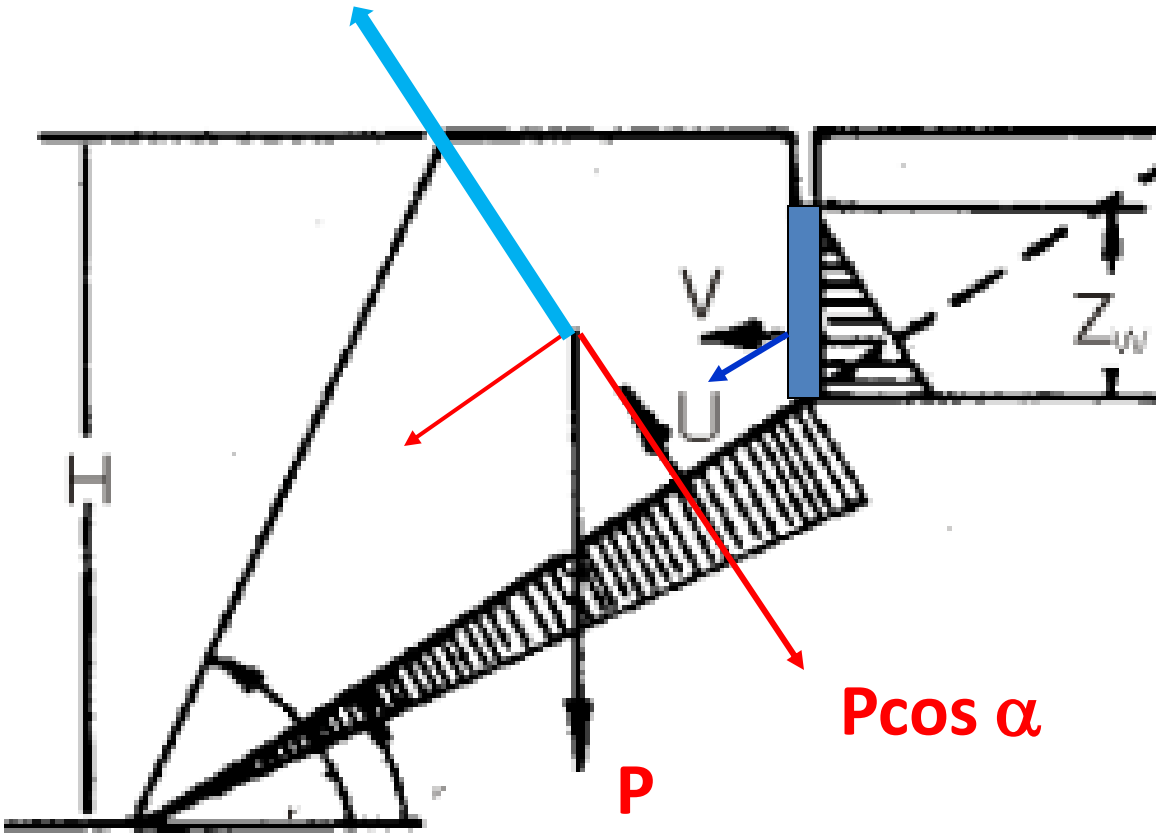
Le figure mostrano come avvengano le filtrazioni lungo la spalla della diga quando questa è interessata da fratture aperte parallelel al versante

Un **secondo tipo di inconveniente** è dato dalla vulnerabilità di alcune strutture idrogeologiche al sollevamento del livello piezometrico , ad esempio per adeguamento della falda all'innalzamento del livello nel serbatoio. Nelle slides che si riferiscono al caso del Vajont si fa un esempio degli effetti di tale struttura



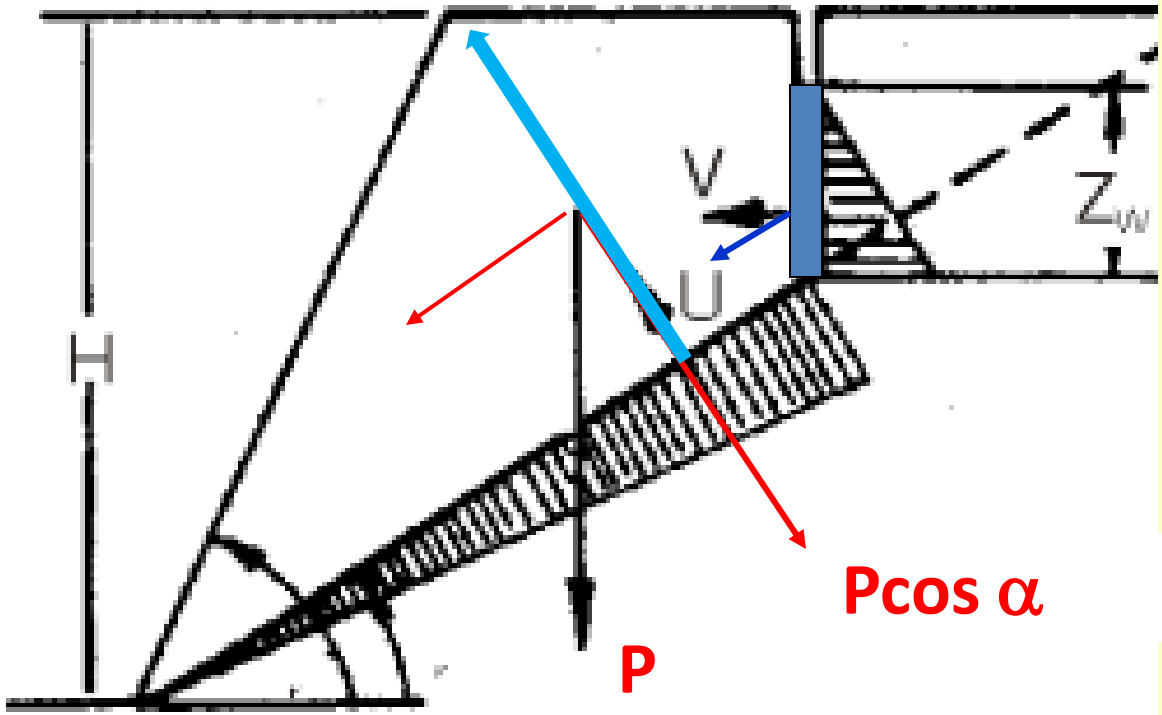


Tale fatto si manifesta nella corrispondenza fra riattivazione delle frane (in giallo) e sollevamento della piezometria (linea blu)



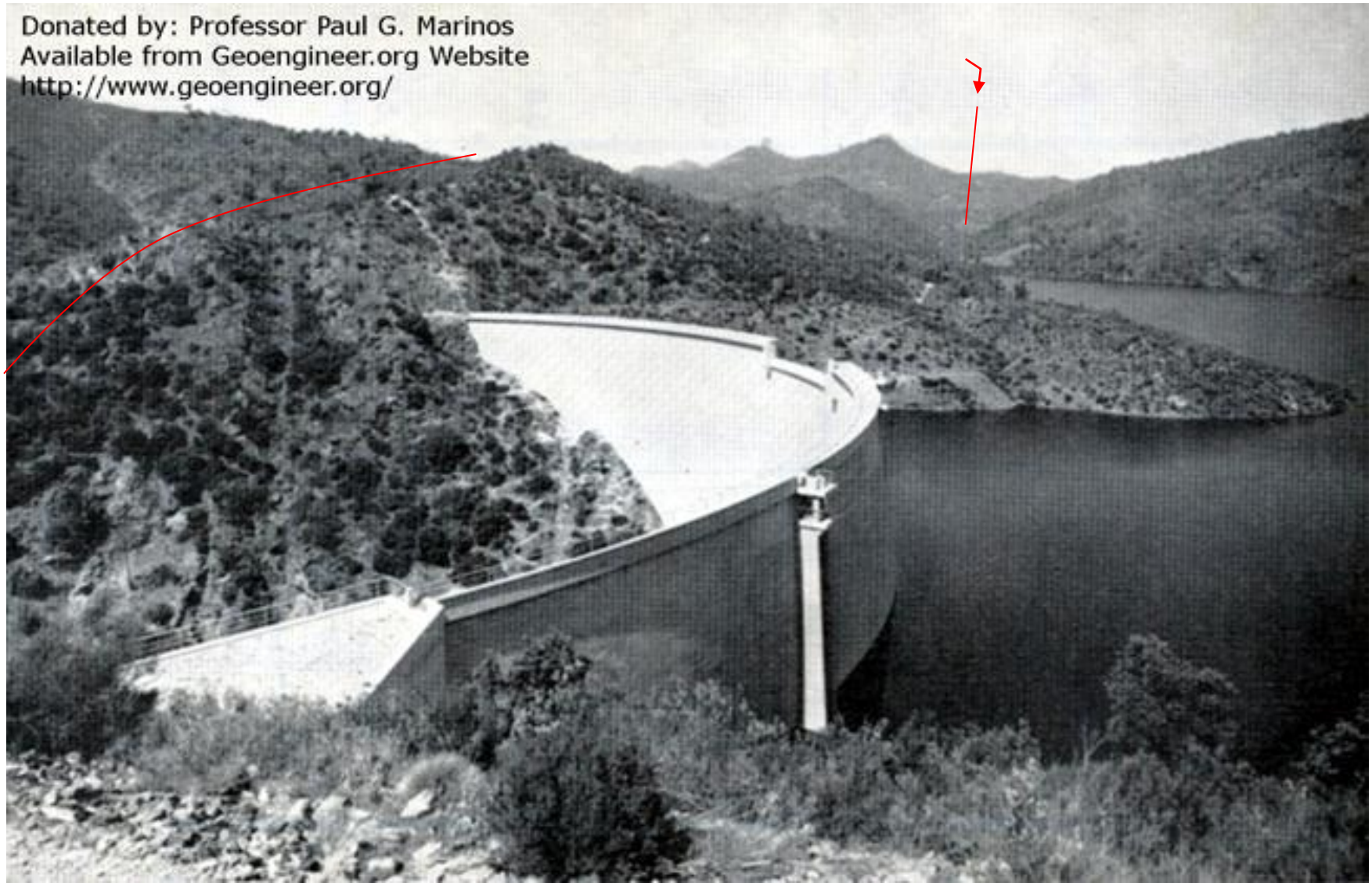
Se U eguaglia o è maggiore di Pcosa, il blocco diviene sicuramente instabile.

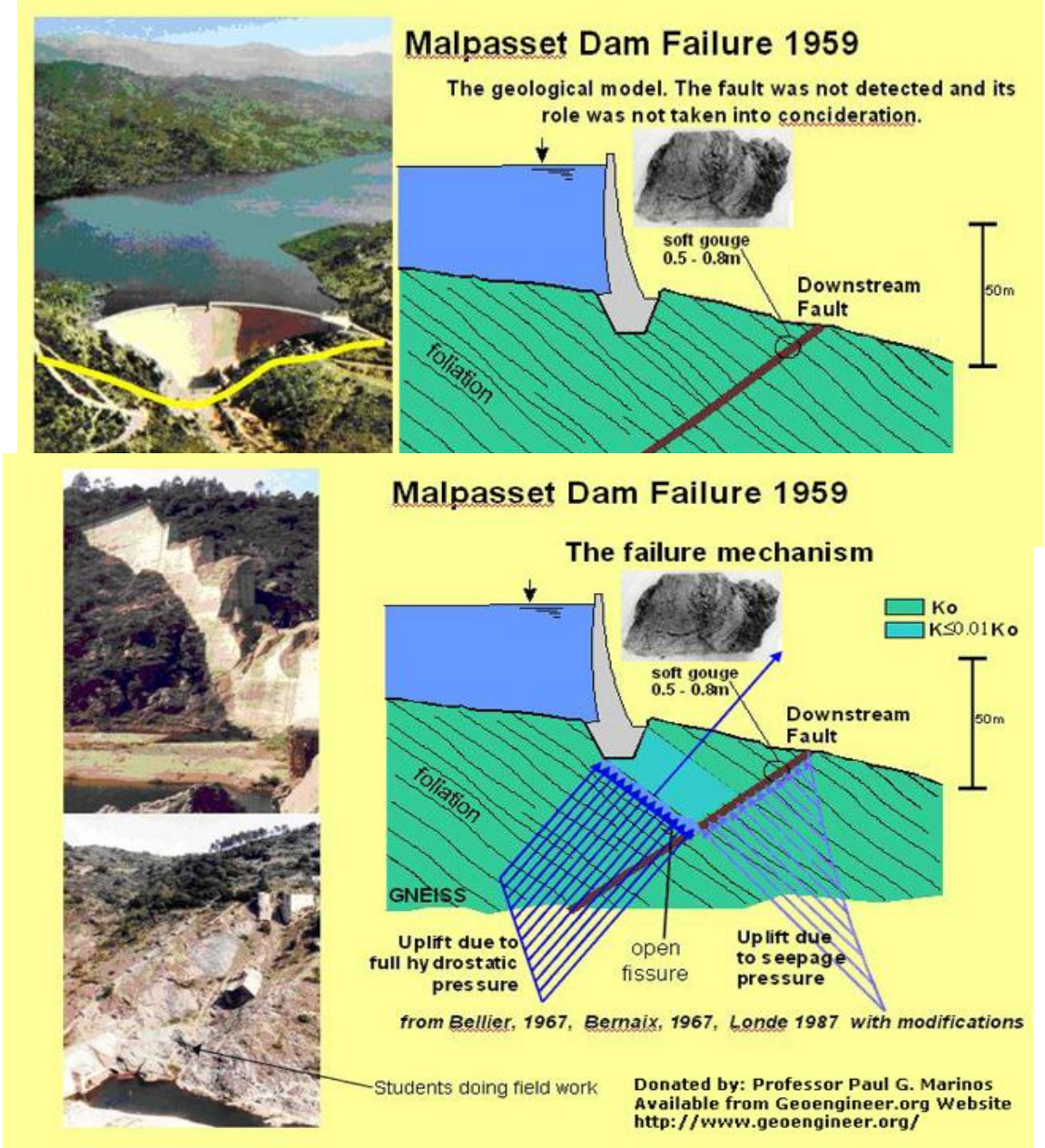
$$FS = \frac{cS + P(\cos\alpha - U - V\,\mathrm{sen}\,\alpha)\,\mathrm{tg}\,\phi}{P\,\mathrm{sen}\,\alpha + V\cos\alpha}$$



L'azione dell'acqua è fondamentale, in quanto la spinta che essa esercita lateralmente (freccia blu = Vcos α) e da sotto (U) favorisce le forze che tendono a destabilizzare il blocco instabile . Se **U** eguaglia o è maggiore di **Pcosa,** il blocco diviene sicuramente instabile.

Un **terzo tipo di problema** nasce quando la pressione dell'acqua che filtra sotto la diga produce il sollevamento dei terreni di fondazione a valle dello sbarramento. Nella foto è rappresentato lo sbarramento di Malpasset dove una grande faglia (la cui traccia è indicata in rosso) passa poco a valle della diga





Si nota comne le acque del serbatoio a elevata pressione si infiltrino da monte sotto la diga seguendo le superfici di discontinuità della roccia , e risalgano lungo la zona difrattura della faglia, le cui poco permeabili cataclasiti canalizzano le acque verso l'alto. Si determina così una sottospinta sul blocco di fondazione della diga sufficiente a produrre il cedimento

Lato destro

Upstream plane
from joints and
schistosity
Downstream
fault plane
Remnants of
the dam in
Donated by: Professor Paul G. Marinos

Cataclasiti della faglia rilevate dopo Il disastro ,avvenuto poco prima di quello del Vajont

Anche la frana del Vajont presenta aspetti idrogeologici di primo piano

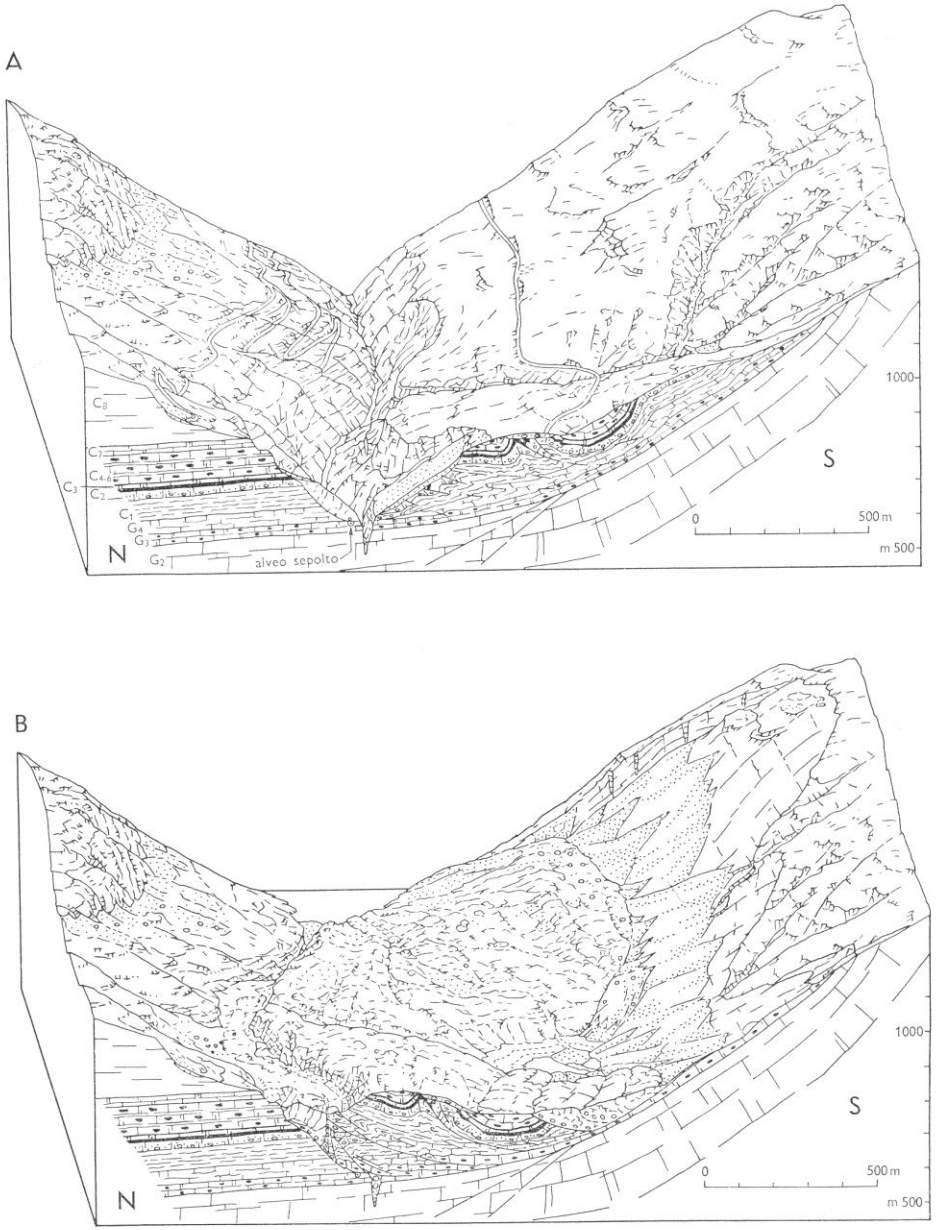
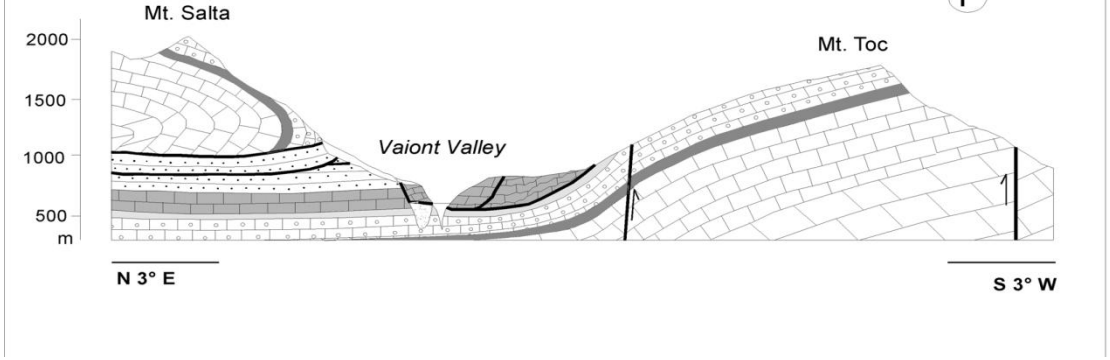
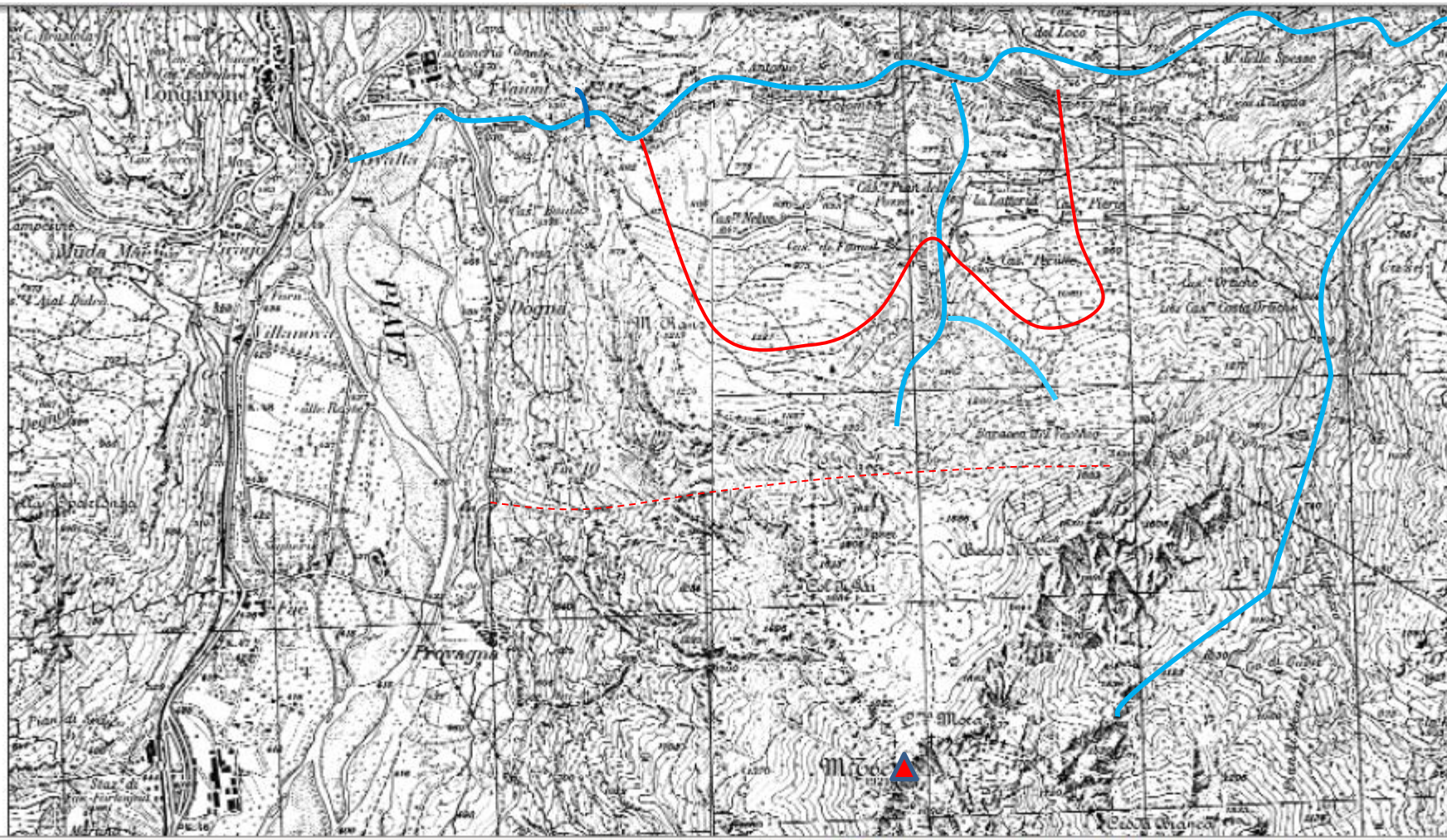


Fig. 236 – La media valle del Vajont prima (*A*) e dopo (*B*) la frana del 1963 (secondo L. Trevisan [51]).

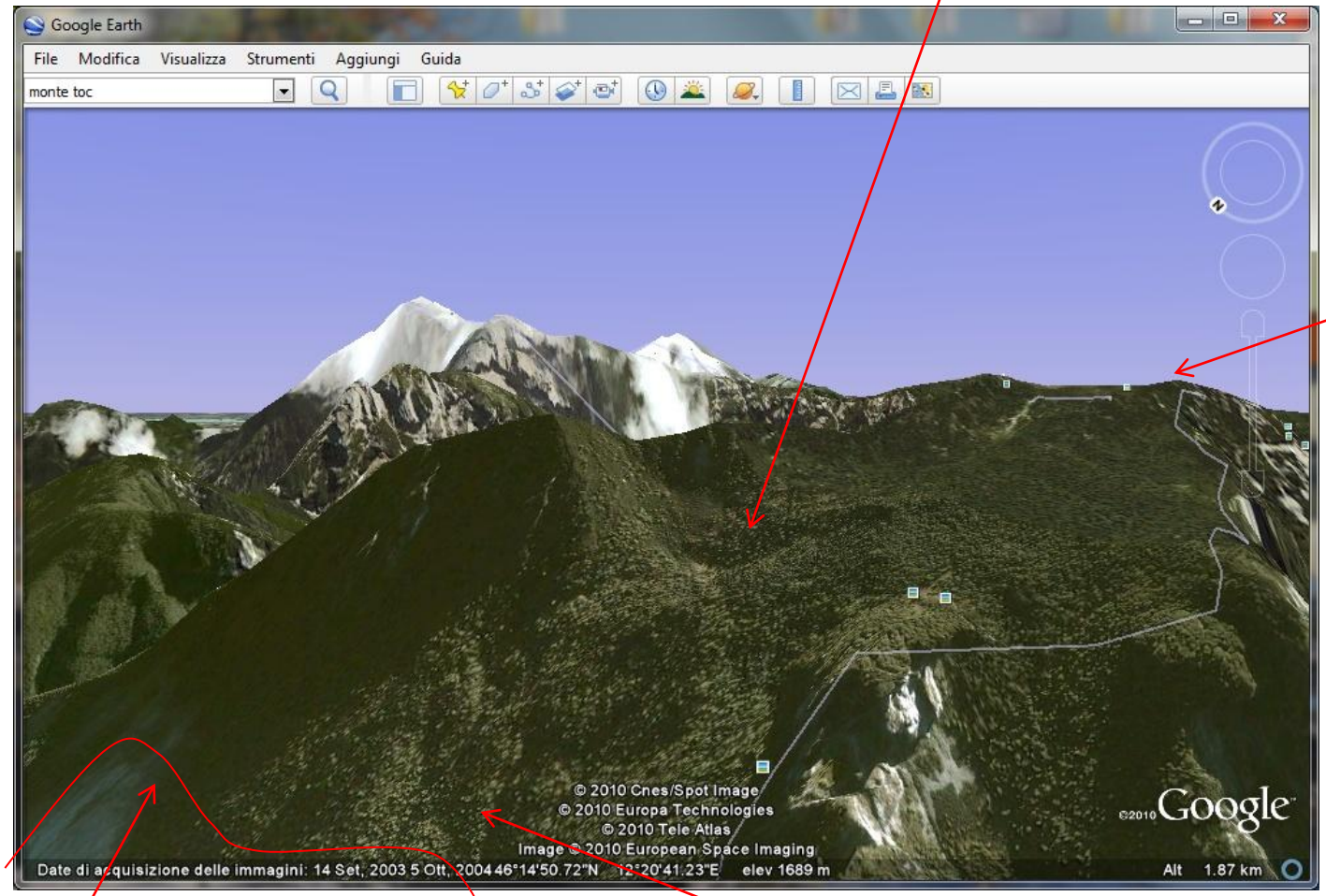
(Nel testo la spiegazione delle sigle).


Mt. Salta
Mt. Toc
Vaiont Valley
2000
1500
1000
500
m
N 3° E
S 3° W


Longarone
Vajont
Pogna
Provagna
Area sconosciuta | Modalità protetta: disattivata

Particolarmente evidente l'altipiano carsico che sovrasta la zona di frana, dal quale nasceva un corso d'acqua (t.Massalezza)

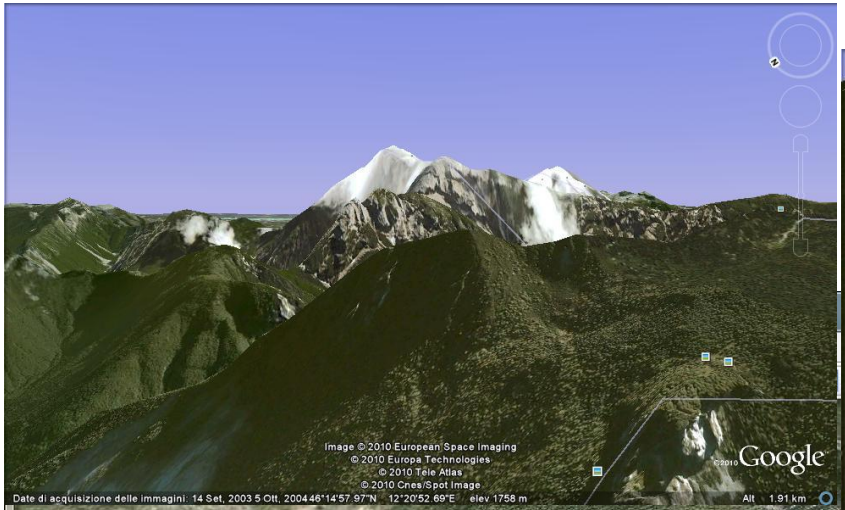
doline

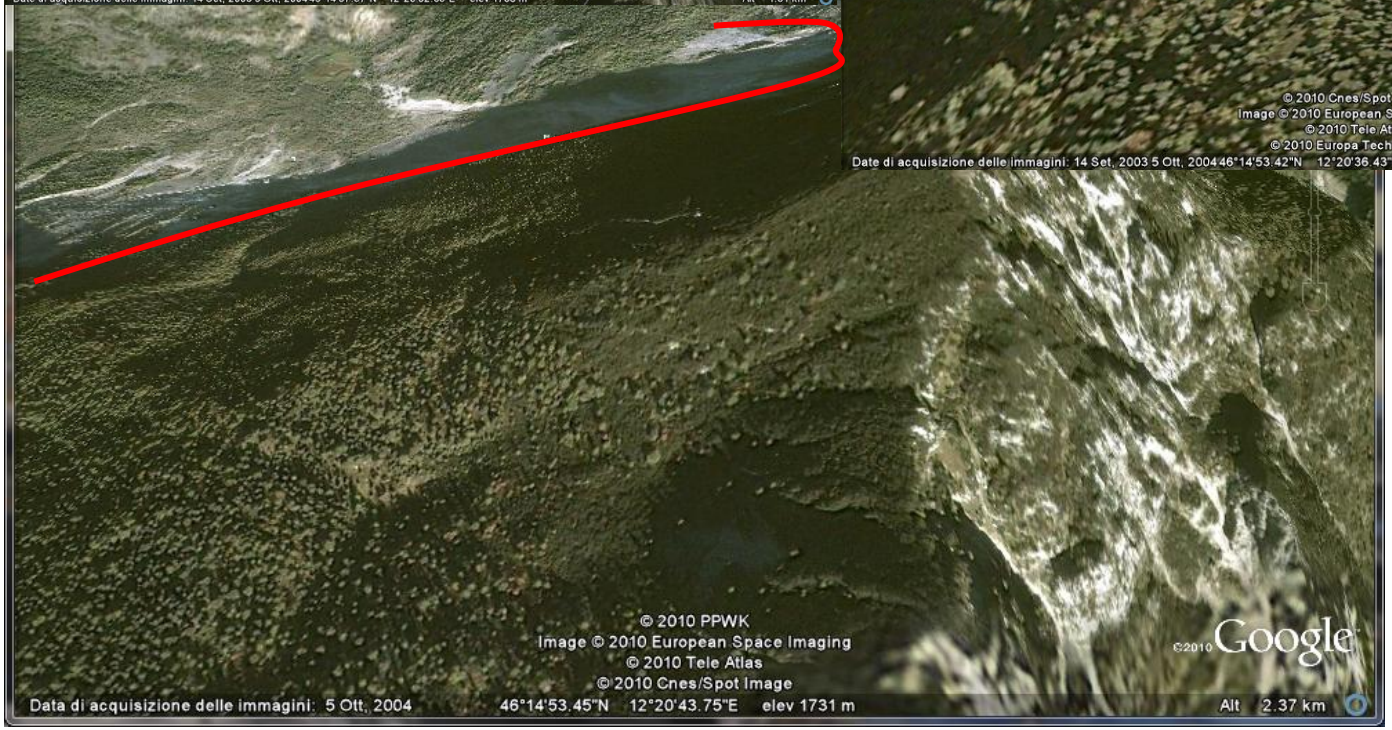


M.Toc

t.Massalezza

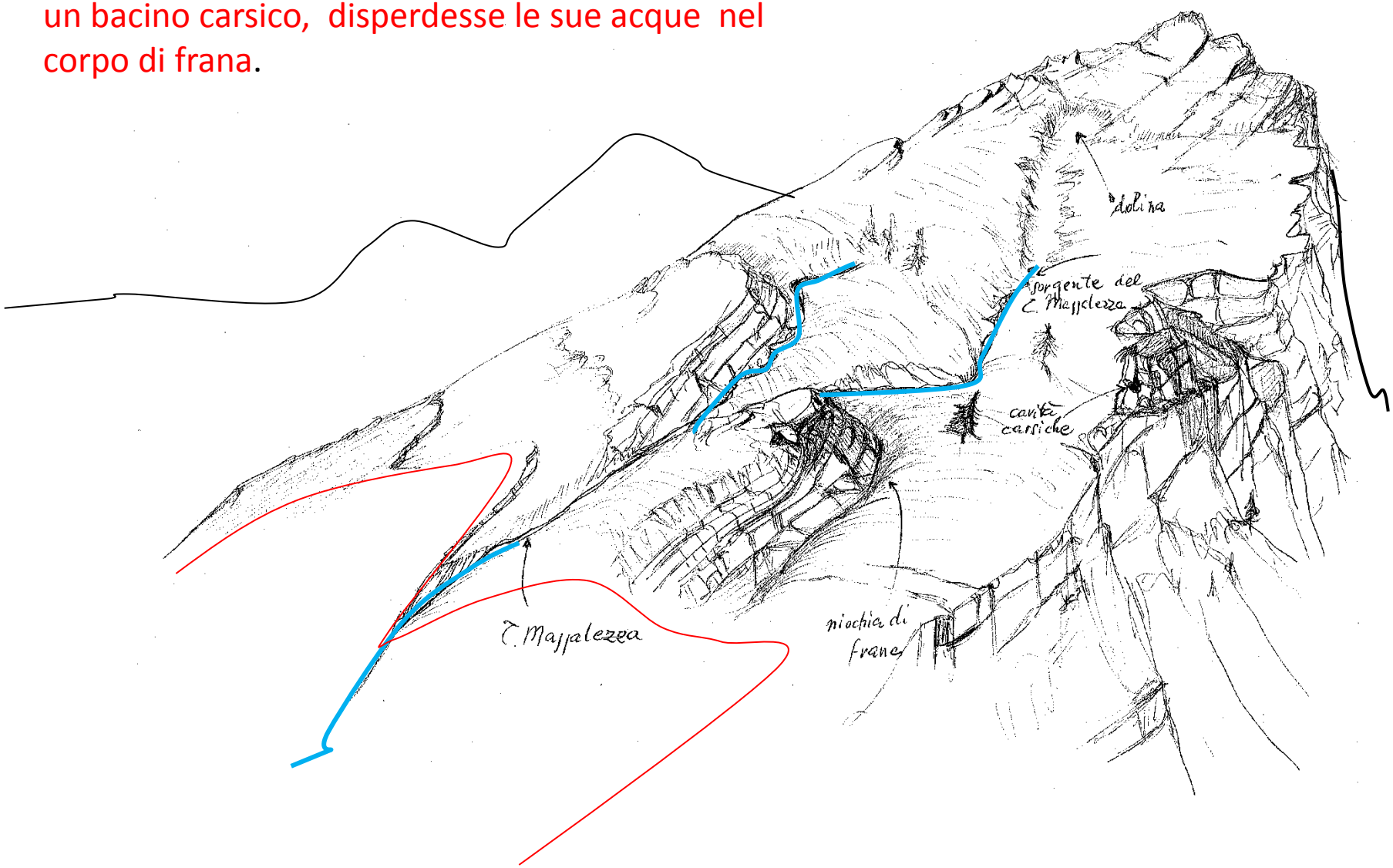
Nicchia della frana

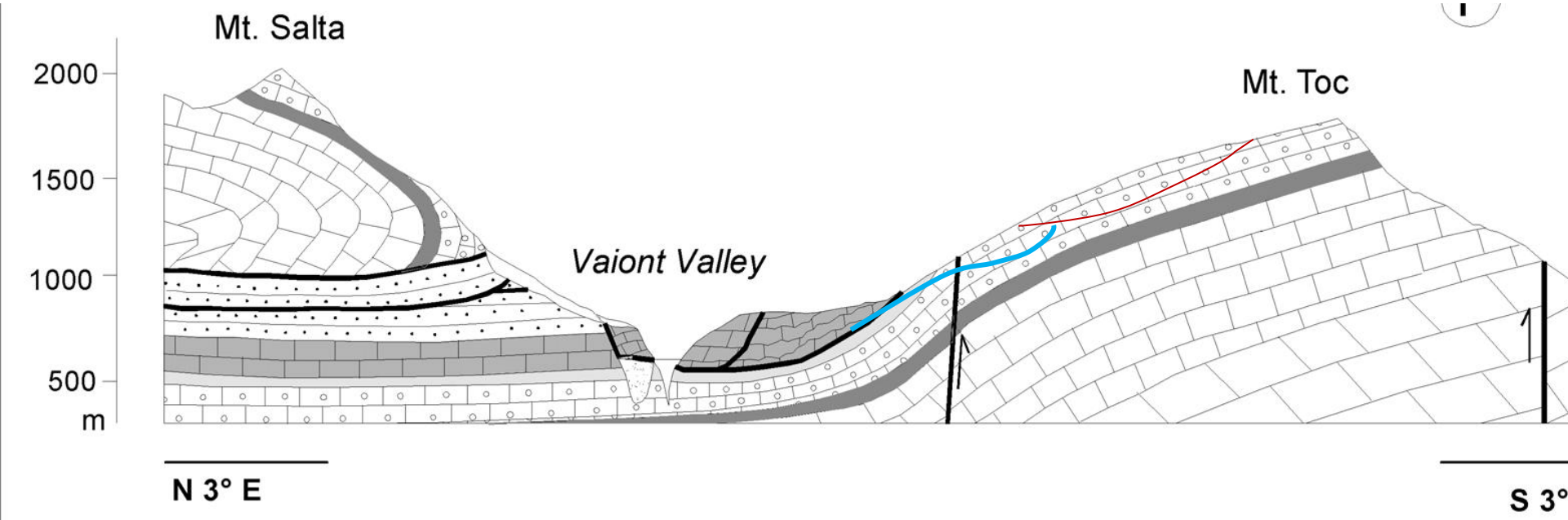




Alcuni aspetti dell'altipiano carsico ripresi da Google E.

La figura indica come il t.Massalezza alimentato da un bacino carsico, disperdesse le sue acque nel corpo di frana.





Dalla filtrazione nell'apparato carsico (segnato in rosso) il torrente riceveva in continuità acque che scaricava nel corpo di frana, reso permeabile da un ampio stato di fratturazione dell'ammasso roccioso. Si era così in presenza di un corpo idrico sotterraneo abbastanza continuo da trasmettere a tutto il versante gli aumenti di pressione generati dalle variazioni di livello nel serbatoio artificiale.

Monitoraggio

La sicurezza del bacino deve essere garantita dall'osservazione in continuo degli eventi, in particolare della velocità si spostamento dei capisaldi nei settori esposti alle frane e delle piezometria. Questa può essere riferita alla velocità massima che il movimento può assumere al piede del versante in caso di frana, data da relazioni teoriche quali ad esempio quella di **Slingerland e Voight (1979)**

$$v_s = v_0 + [2gs(\sin\alpha - \tan j_s \cos\alpha)]^{1/2}$$

v_s = velocità calcolata per una massa che scende lungo un piano inclinato
v_0 = velocità iniziale(0 ms-1)
g = accelerazione di gravità (9.81 ms-2)
s = distanza di spostamento della massa (es.450 m)
α = angolo di inclinazione della sup. di rottura (es.40°)
j_s = angolo di frizione dinamica, che tiene conto della pressione dei pori e della scabrezza, compreso fra 0.25 $\pm$ 0.15 (Slingerland e Voight ,1979). Con i numeri dell'esempio, la velocità al termine della discesa è 230 km/h.

Questa relazione fornisce un'indicazione teorica per valutare quanto la velocità di movimento registrata dagli inclinometri sia prossima a quella di collasso del versante.

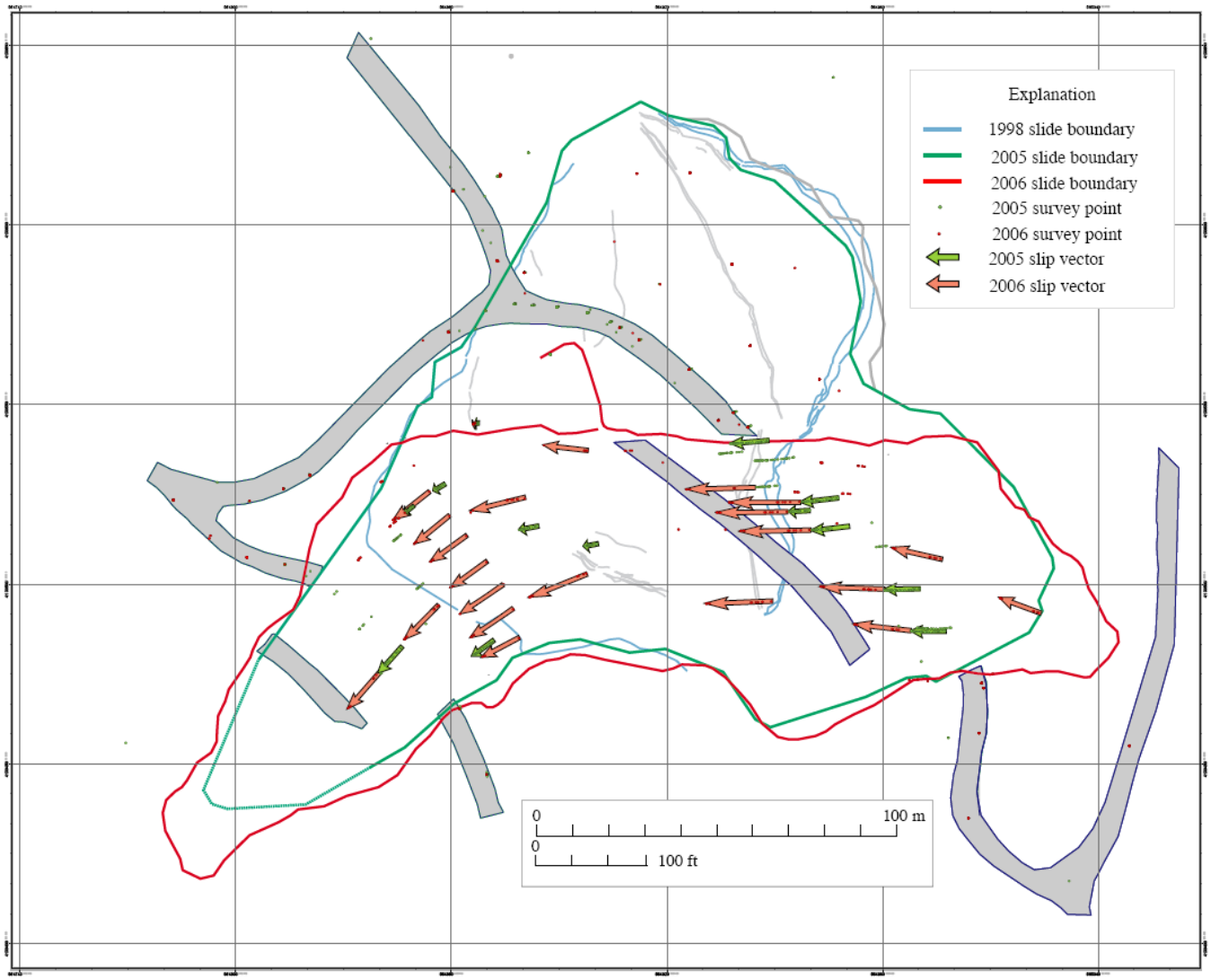


Figure 3. Landslide displacement field

Esempio di cartografia della velocità di moto di una frana

CONCLUSIONI

Si possono trarre conclusioni che riguardano sia la sicurezza degli invasi artificiali, sia quello delle opere civili in generale.

La sicurezza dei progetti è garantita dal dettaglio degli studi geologici di base (rilevamento geologico, geostrutturale e geomeccanico) eseguiti e dal monitoraggio degli eventi significativi.

Particolare attenzione è da riservare a :

Storia degli dinamica dei versanti :importanza della tettonica e dell'alterazione per le proprietà tecniche degli ammassi rocciosi ;fratture di versante ed erosione sotterranea; analisi geomorfologica dei versanti e identificazione dei movimenti in atto.

Ricostruzione della circolazione idrica sotterranea, in relazione con le variazioni piezometriche , che in alcuni casi (es. i serbatoi artificiali) assumono fondamentale importanza.

Si osserva da questi esempi che un sistematico approfondimento degli aspetti idrogeologici avrebbe reso possibile evitare che la realizzazione di queste infrastrutture incontrasse problemi che hanno reso necessari costosi studi e interventi.