

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea magistrale in Scienze Forestali e Ambientali

Studio del fenomeno franoso che insiste sul versante
a monte dell'abitato di Siror: verifiche di stabilità ed
elaborazione dei dati di monitoraggio

Relatore
Prof. Vincenzo D'Agostino
Correlatore
Dott.ssa Giulia Bossi

Laureando: Davide Parisi
Matricola n. 1056187

ANNO ACCADEMICO 2015/2016

Sommario

1. Introduzione	3
2. Classificazione dei movimenti franosi	5
2.1. Stato di attività di una frana	8
2.2. Morfologia di una frana	10
2.3. Dimensioni e velocità di una frana	11
2.4. Cause predisponenti ed innescanti	13
3. Pericolosità e rischio	15
3.1 Zonazione della pericolosità da frana	20
4. Descrizione dell'area di studio	23
4.1 Comune di Siror	23
4.2 Inquadramento geologico	24
4.3 Indagini geognostiche: stratigrafie	25
4.4 Prove geotecniche	28
5. Approfondimenti conoscitivi e monitoraggio della frana	35
5.1 Indagini geofisiche: ERT, MASW, H/V	35
5.2 Monitoraggio piezometrico	37
5.3 Monitoraggio inclinometrico	39
5.4 Monitoraggio topografico ottico	43
5.5 Interferometria satellitare	49
5.6 Confronto tra le diverse metodologie di monitoraggio	53
6. Modellazione della frana	55
6.1 Analisi all'equilibrio limite	55
6.2 Il metodo di Morgenstern & Price	59
6.3 Modellazione preliminare della frana di Siror	60
6.4 Creazione del modello con il software Slope	61
7. Proposte di possibili interventi	67
7.1 Gestione delle acque profonde per il controllo del movimento franoso	67
7.2 Nuovi elementi per il monitoraggio	69
8. Conclusioni	71
Bibliografia	73
Allegati	75

1. Introduzione

Il presente lavoro di tesi ha come scopo lo studio dei movimenti franosi che interessano il versante soprastante l'abitato di Siror. L'interesse per questa frana, è dovuto al fatto che essa grava direttamente sul centro abitato di Siror, danneggiando le case e costituendo una seria fonte di pericolo.

Una volta inquadrata la zona dal punto di vista geologico e strutturale grazie alle relazioni tecniche prodotte dal Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento, che dal 2004 sta studiando e monitorando l'area, il primo obiettivo è stato quello di definire spazialmente il corpo di frana e ricostruirne la geometria mediante DTM (Digital Terrain Model).

Si è proceduto, quindi, all'esame dei dati forniti dalle indagini geognostiche quali stratigrafie ed inclinometrie, per definire la geometria del corpo di frana in profondità e stimarne il volume.

Poiché si è visto che la frana è soggetta ad un movimento lento ma continuo si è cercato di capire quali sono i fattori che determinano tale comportamento. Le analisi inclinometriche e topografiche hanno permesso di determinare localmente direzione, velocità ed entità degli spostamenti superficiali e profondi della frana.

Alla luce dei risultati ottenuti sono state valutate nuove modalità di monitoraggio per garantire un miglior controllo del fenomeno.

Infine sono state effettuate delle proposte per degli eventuali interventi di mitigazione da attuare per la riduzione della pericolosità connessa al fenomeno franoso in oggetto.

Per l'analisi di stabilità, condotta con un metodo all'equilibrio limite, è stato utilizzando Slope, software della GeoStru.

2. Classificazione dei movimenti franosi

Una frana è definita come un “movimento di roccia, detrito e/o terra lungo un versante, sotto l’influenza della gravità” (Varnes, 1958; Cruden, 1991; Crozier, 1999). Con questa definizione ci si riferisce per lo più al processo (*landslide process*) piuttosto che all’oggetto, questo per non limitare la definizione agli aspetti descrittivi, ma poterla usare in contesti applicativi ed interpretativi.

Le frane si manifestano in natura in maniere molto differenti e questo ha permesso che negli anni si sviluppassero numerose classificazioni a partire da quella di Varnes (1978) successivamente rivista da Carrara, D’Elia e Semenza (1987) e da Cruden e Varnes (1996).



Figura 1: frana di circa 150 m³ sulla S.S. n. 249 Gardesana orientale, nel territorio comunale di Nago Torbole (TN) (fonte: Protezione Civile Trentino)

Il sistema di classificazione più impiegato per descrivere i movimenti franosi è quello proposto da Varnes. In primo luogo si distingue la tipologia del movimento, ovvero la dinamica con cui avvengono i fenomeni di instabilità, poi la natura dei materiali coinvolti. I movimenti vengono raggruppati in 5 tipologie principali: crolli, ribaltamenti, scivolamenti, espansioni laterali, colate. I materiali sono suddivisi in due tipologie: rocce e terreni, quest’ultimi, a loro volta, vengono distinti in terreni grossolani (detriti) e terreni prevalentemente fini.

1. **Frane per crollo** (Figura 2): possono verificarsi in roccia, in detrito, e meno frequentemente in terreni limosi-sabbiosi parzialmente cementati come il loess. Si definisce crollo il distacco e la successiva caduta di una massa di materiale da un pendio molto ripido o da una scarpata. Il distacco si verifica lungo superfici di frattura preesistenti quando la



Figura 2: schema frana per crollo

resistenza al taglio non riesce più a controbilanciare il peso dei blocchi ai lati della frattura. Quando la massa raggiunge il versante procede mediante movimenti di rimbalzo o rotolamento. Le principali cause di frane per crollo sono crioclastismo, sismi e scalzamento alla base del versante.

2. **Frane per ribaltamento** (*Figura 3*): si realizzano in roccia o, più raramente, in detrito. Questa tipologia di frane è caratterizzata dalla rotazione di un blocco di roccia, o di detrito, attorno ad un punto a causa della forza di gravità, della pressione esercitata dai blocchi adiacenti e dall'acqua nelle fratture. Questa frana può trasformarsi in una frana per crollo o per scorrimento, nel caso in cui il materiale non venga rallentato dalla presenza di ostacoli sul suo percorso.

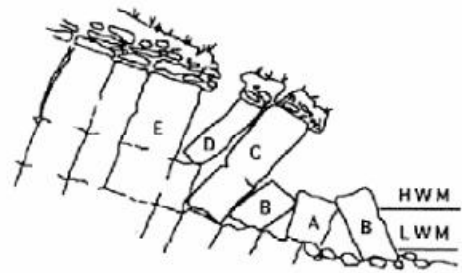


Figura 3: schema frana per ribaltamento

3. **Frane per scivolamento** (*Figura 4*): questa tipologia individua le frane in cui si ha il movimento di una massa lungo una o più superfici, quando viene superata la resistenza al taglio all'interno della massa. Queste frane si distinguono ulteriormente per la geometria delle superfici di movimento.

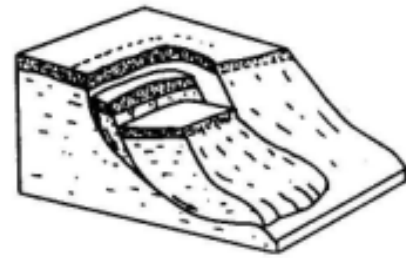


Figura 4: schema frana per scivolamento

- a) **Frane per scivolamento traslazionale:** possono avvenire in roccia, in terreno e in detrito. Il movimento ha luogo in corrispondenza di fratture, superfici di stratificazione, superfici di contatto tra strati con diverse proprietà geotecniche.
- b) **Frane per scivolamento rotazionale:** possono verificarsi in terreno, in detrito e in rocce tenere. Questa tipologia di frane si manifesta per rottura progressiva ed il movimento delle masse si verifica lungo una superficie curva, concava verso l'alto. Inoltre le masse subiscono un movimento rotazionale rispetto a un asse parallelo al versante.

4. **Frane per espansione laterale** (*Figura 5*): hanno luogo in materiali a comportamento rigido sovrapposti a materiali a comportamento plastico. Il movimento di espansione laterale avviene con la generazione di fratture, di trazione e di taglio; tale meccanismo di fratturazione è progressivo.

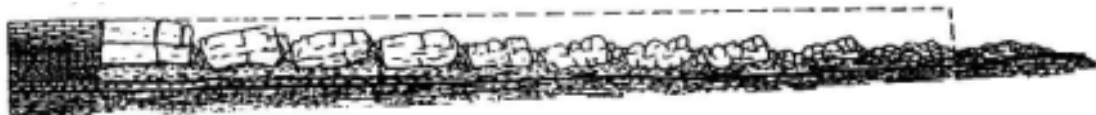


Figura 5: schema frana per espansione laterale

5. **Frane per colamento** (*Figura 6*): possono manifestarsi in roccia o in materiale disciolto. Quelle che si verificano in roccia possono portare al coinvolgimento di interi versanti. Il substrato roccioso effettua dei movimenti estremamente lenti, continui, simili a quelli di un fluido a elevata viscosità. Tali movimenti avvengono in corrispondenza di rocce con una fratturazione pervasiva oppure che derivano da deformazioni plastiche relazionate al piegamento delle rocce o al rigonfiamento di porzioni del versante. Invece, nelle frane per colamento in terreni e in detriti i singoli granuli che compongono i corpi di frana si muovono gli uni rispetto agli altri, con una velocità che dipende dal contenuto d'acqua e dalla granulometria del materiale. Cause scatenanti delle colate di detrito sono principalmente piogge intense, in aree prive di vegetazione. I colamenti di terreni possono avere quantità d'acqua e velocità differenti: maggiore è il contenuto d'acqua, maggiore è la velocità della colata e minore è la densità del materiale.



Figura 6: schema frana per colamento

Vengono definite **complesse** (*Figura 7*) le frane i cui movimenti sono una combinazione nello spazio e nel tempo di due o più tra le tipologie movimento appena descritte. La maggior parte delle frane ha un movimento di tipo complesso, ma spesso si riesce ad individuare una tipologia di movimento predominante che permette di classificarle utilizzando le tipologie descritte in precedenza.

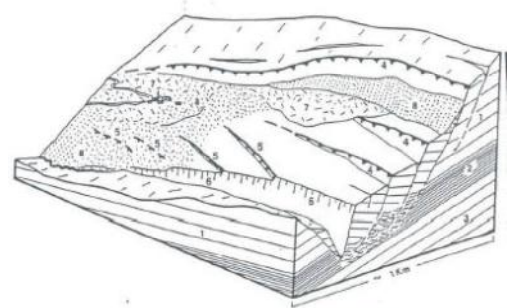


Figura 7: schema frana complessa

2.1. Stato di attività di una frana

Lo stato di attività di una frana viene definito sulla base di quanto stabilito dal WP/WLI (*Working Party on World Landslide Inventory*). Di seguito e in *Figura 8* sono riportate le definizioni che vengono utilizzate.

- **Frana attiva** (*active*): al momento dell'osservazione è in movimento.
- **Frana sospesa** (*suspended*): al momento non è attiva, ma nell'ultimo ciclo stagionale si è mossa.
- **Frana riattivata** (*reactivated*): dopo un periodo di inattività, è tornata in movimento.
- **Frana inattiva** (*inactive*): si è mossa l'ultima volta prima dell'ultimo ciclo stagionale. Le frane inattive sono a loro volta distinte in:
 - frana quiescente (*dormant*): le cause che hanno scatenato il movimento lo possono innescare nuovamente;
 - frana naturalmente stabilizzata (*abandoned*): non può più essere influenzata dalle cause originarie perché sono state naturalmente rimosse;
 - frana artificialmente stabilizzata (*stabilized*): è stata stabilizzata da misure di stabilizzazione artificiali;
 - frana relitta (*relict*): si è sviluppata in condizioni geomorfologiche o climatiche considerevolmente diverse da quelle attuali.

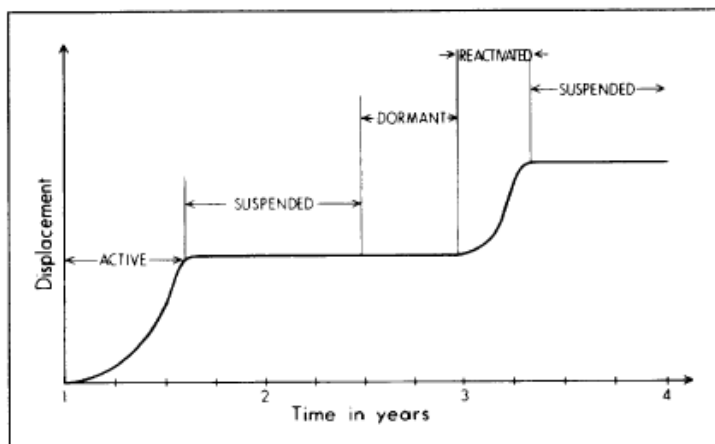


Figura 8: movimento di una frana nei diversi stati di attività (da *Landslides*, T.R.B., 1996)

Per la descrizione completa di una frana e per la comprensione dell'andamento del movimento, il WP/WLI consiglia di analizzare la “distribuzione di attività” e lo “stile di attività”.

La distribuzione di attività indica la direzione di movimento e permette di prevedere l'evoluzione nello spazio della frana. In base alla distribuzione di attività una frana può essere:

- **in avanzamento**, se la superficie di rottura si estende nella direzione del movimento, coinvolgendo aree sempre maggiori verso valle;
- **retrogressiva**, se la superficie di rottura si sposta nella direzione opposta al senso del movimento, coinvolgendo aree sempre maggiori verso monte e spostando la corona di frana;
- **multi-direzionale**, se la superficie di rottura si estende in più direzioni;
- **in diminuzione**, se il materiale spostato diminuisce nel tempo;
- **confinata**, se è presente una scarpata ma non è visibile la superficie di scorrimento al piede, dove sono osservabili solo deformazioni;
- **costante**, se il materiale spostato continua a muoversi senza variazioni rilevanti del volume di materiale coinvolto e della superficie di rottura, il movimento avviene con gradualità e costantemente nel tempo;
- **in allargamento**, se la superficie di rottura si estende su uno o su entrambi i lati della frana.

Lo stile di attività descrive il contributo che i diversi tipi di movimento danno al fenomeno franoso. In base allo stile di attività una frana può definirsi:

- **complessa**, se è caratterizzata da più movimenti successivi;
- **composita**, se si ha una combinazione simultanea di più movimenti diversi;
- **successiva**, se si verificano movimenti successivi dello stesso tipo ed i materiali coinvolti e le superfici di rottura rimangono distinti;
- **singola**, se si ha lo spostamento di un'unica massa secondo un'unica tipologia di movimento;
- **multipla**, se lo stesso tipo di movimento si ripete più volte, coinvolgendo masse già dislocate in precedenza.

2.2. Morfologia di una frana

I termini di caratterizzazione morfologica di una frana in lingua inglese derivano da quelli proposti da Varnes nel 1978, utilizzati anche dal Dizionario Geologico dell'Edizione nord-americana (Bates e Jackson, 1987). La terminologia in lingua italiana, riportata nella *Tabella 1*, è stata proposta da Spagna nel 1990. I termini sono elencati in ordine numerico, a partire dal “coronamento” procedendo verso il basso, seguendo il movimento fino al “piede”, retrocedendo poi lungo un percorso sotterraneo per finire sui “fianchi”. In parentesi è stato inserita la traduzione di ogni termine in lingua inglese.

Tabella 1: morfologia di una frana

1	Coronamento (<i>crown</i>)	Il materiale rimasto in posto praticamente non disturbato e adiacente alle parti più alte della scarpata principale.
2	Scarpata principale (<i>main scarp</i>)	Una superficie ripida del terreno non dislocato posta al margine superiore del corpo di frana e formata a seguito del moto di scorrimento del materiale staccatosi dal terreno indisturbato
3	Punto sommitale (<i>top</i>)	Il punto più alto di contatto fra il materiale dislocato (13) e la scarpata principale (2).
4	Testata (<i>head</i>)	Le parti superiori del corpo di frana, lungo il contatto fra il materiale dislocato e la scarpata principale (2).
5	Scarpata secondaria (<i>minor scarp</i>)	Una superficie generalmente ripida sul materiale dislocato della frana, prodottasi per movimenti differenziali all'interno del corpo di frana.
6	Corpo di frana principale (<i>main body</i>)	La parte di materiale dislocato che ricopre la superficie di rottura (10) tra la scarpata principale (2) e l'unghia della superficie di rottura (11).
7	Piede (<i>foot</i>)	La parte del corpo di frana che è scorsa al di là dell'unghia della superficie originaria del terreno
8	Punto inferiore (<i>tip</i>)	Il punto dell'unghia (9) situato a maggior distanza dal punto sommitale della frana.
9	Unghia della frana (<i>toe</i>)	Il margine, generalmente arcuato, del materiale di frana dislocato alla maggiore distanza dalla scarpata principale (2).
10	Superficie di scorrimento (<i>slip surface</i>)	La prosecuzione della scarpata principale (2) al di sotto della massa di materiale dislocato.
11	Unghia della superficie di rottura (<i>toe of rupture surface</i>)	L'intersezione, a volte sepolta, fra la parte inferiore della superficie di rottura (10) di una frana e la superficie topografica originaria.
12	Superficie di separazione (<i>surface of separation</i>)	La parte della superficie topografica originaria mascherata dal piede (7) della frana.
13	Materiale dislocato (<i>displaced material</i>)	Materiale spostato dalla sua posizione originaria sul versante a causa del movimento franoso.
14	Zona ribassata (<i>zone of depletion</i>)	L'area della frana nella quale il materiale dislocato (13) viene a trovarsi a quota più bassa di quella della superficie topografica originaria.
15	Zona di accumulo (<i>zone of accumulation</i>)	L'area della frana nella quale il materiale dislocato (13) viene a trovarsi a quota più elevata rispetto a quella della superficie topografica originaria.
16	Nicchia di distacco (<i>depletion</i>)	Il volume, virtuale, posto al di sopra della scarpata principale e compreso fra la massa ribassata (17) e la superficie topografica originaria.
17	Massa ribassata (<i>depleted mass</i>)	Parte della massa dislocata ricoprente la superficie di scorrimento (11) ma che viene a porsi a quota inferiore a quella della superficie topografica originaria.
18	Corpo di accumulo (<i>accumulation</i>)	Parte del volume di materiale dislocato (13) che viene a trovarsi fra la superficie originaria del pendio e quella di neoformazione conseguente al fenomeno di frana.
19	Fianco (<i>flank</i>)	Margine laterale della frana. È da preferire l'indicazione dell'orientazione geografica ma se si usa la destra e la sinistra il riferimento è quello della frana vista dal coronamento.

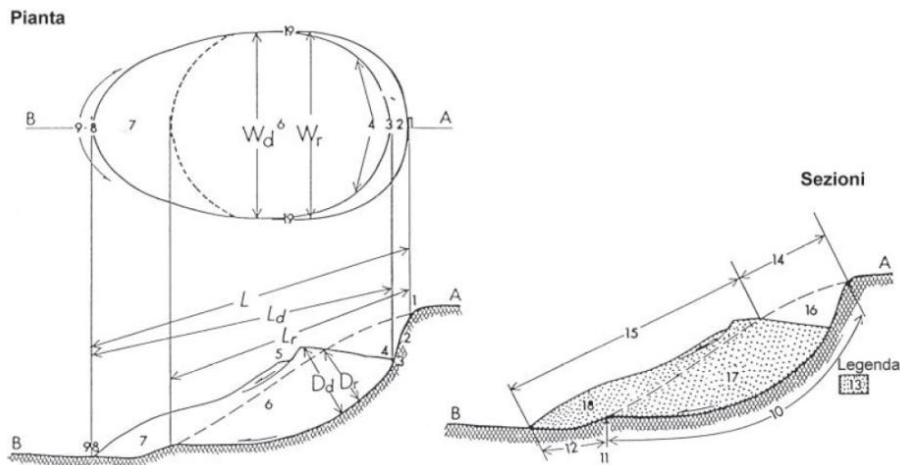


Figura 9: nomenclatura per i corpi di frana. Con tratteggio incrociato è rappresentato il terreno indisturbato; l'area punteggiata mostra l'estensione del materiale dislocato (13)

2.3. Dimensioni e velocità di una frana

Per definire le dimensioni di un movimento franoso si adotta la terminologia raccomandata dal WP/WLI nel 1993, come indicato in *Figura 9*.

L_r = lunghezza della superficie di rottura: distanza fra l'unghia della superficie di rottura e il coronamento.

L_d = lunghezza dell'ammasso di frana: distanza fra il punto inferiore e il punto sommitale.

L = lunghezza totale: distanza fra il coronamento e l'unghia frontale della frana.

W_r = larghezza della superficie di scorrimento: massima distanza fra i fianchi della frana, misurata perpendicolarmente alla lunghezza L_r .

W_d = larghezza del corpo di frana: massima larghezza della massa dislocata, in direzione perpendicolare alla lunghezza L_d .

D_r = profondità della superficie di rottura: profondità massima della superficie di scorrimento corrispondente alla distanza fra la superficie di rottura e la superficie topografica originaria, misurata perpendicolarmente a quest'ultima.

D_d = profondità del corpo di frana: massima profondità della massa dislocata misurata in direzione perpendicolare alla sua lunghezza L_d .

Poiché risulta difficile compiere una stima del volume coinvolto nel movimento, generalmente, si effettuano considerazioni morfologiche sulla zona di distacco e sul deposito di frana. In questo modo si possono distinguere le frane profonde, che generalmente coinvolgono volumi considerevoli, dalle frane superficiali, che generalmente coinvolgono volumi ridotti.

Per valutare l'intensità (I) di un fenomeno franoso si considerano le dimensioni e la velocità della frana. Fell (1994), ad esempio, definisce diverse classi di intensità di una frana sulla base del volume di massa spostata (*Tabella 2*).

Tabella 2: scala di intensità delle frane basata sulla massa spostata (da Fell, 1994)

Intensità (I)	Descrizione	Volume (m³)
2	Estremamente piccola	$< 5 \cdot 10^2$
2,5	Molto piccola	$5 \cdot 10^2 \div 5 \cdot 10^3$
3	Piccola	$5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^4$
4	Media	$5 \cdot 10^4 \div 2,5 \cdot 10^5$
5	Mediamente grande	$2,5 \cdot 10^5 \div 10^6$
6	Molto grande	$10^6 \div 5 \cdot 10^6$
7	Estremamente grande	$> 5 \cdot 10^6$

Cruden e Varnes nel 1994 hanno definito una scala di intensità delle frane basata sulla relazione tra le velocità di spostamento e i danni prodotti a persone o cose, come mostrato nella *Tabella 3*. Ricordiamo che, nonostante ci sia uno stretto legame tra velocità e tipo di frana, ogni tipo di frana può procedere secondo un ampio intervallo di velocità, in base alle differenze di inclinazione del versante, del contenuto in acqua del materiale trasportato e della presenza di ostacoli come la copertura boschiva.

Tabella 3: scala di intensità delle frane basata sulla velocità e sul danno prodotto (da Cruden e Varnes, 1994, Australian Geomechanics Society, 2002)

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.

2.4. Cause predisponenti ed innescanti

Nella maggior parte dei casi l'instabilità di un versante è il risultato dell'azione simultanea di differenti elementi che, attraverso complesse influenze reciproche, pregiudicano la stabilità del versante stesso. Per questo non esiste una relazione diretta tra cause innescanti e frane.

In base all'approccio di indagine le cause si possono distinguere tra interne ed esterne al versante oppure tra predisponenti ed innescanti.

Tra le **cause interne** ci sono:

- processi che avvengono all'interno del versante e che provocano una diminuzione della resistenza al taglio dei materiali. Es. la saturazione dei terreni, le sovrappressioni interstiziali;
- proprietà dei terreni che conferiscono al versante una resistenza al taglio relativamente bassa. Es. la presenza di litologie deboli, di materiali fratturati;
- caratteristiche morfologiche del versante che possono favorire situazioni di instabilità. Es. l'elevata acclività, l'alta energia del rilievo;

Tra le **cause esterne** si trovano:

- processi che determinano una modificazione della geometria del versante, con particolare riferimento all'aumento della pendenza. Es. l'erosione al piede di un versante per cause naturali o antropiche;
- processi che inducono situazioni di stress o variazioni delle proprietà fisiche nei materiali che costituiscono un versante,. Es. terremoti, moti di filtrazione delle acque sotterranee.

Si definiscono **cause predisponenti** gli elementi geologici, idrogeologici, morfologici, intrinseci e statici che predispongono all'instabilità un versante, facilitando l'azione di altri processi. Tra le cause predisponenti si possono includere:

- accumuli di frana preesistenti: hanno caratteristiche meccaniche inferiori rispetto alla roccia in posto e possono dare origine a nuovi movimenti. La gran parte delle frane attive si sviluppa in contesti di questo tipo. Prima della riattivazione si può misurare con appositi strumenti un'accelerazione dei movimenti, rendendo possibile la previsione di questi eventi. Per questo motivo le paleofrane sono oggetto di studi per la progettazione di reti e sistemi di monitoraggio;

- depositi superficiali: sciolti, poco addensati o poco coesivi, di origine detritica, colluviale o residuale;
- fattori antropici: disboscamento, realizzazione di opere edilizie, alterazioni morfologiche dei versanti, apertura di cave e miniere, abbandono del territorio montano per l'esodo rurale (mancata manutenzione, processi distruttivi naturali ritornano a prevaricare);
- rocce tenere: poco cementate e/o intensamente fratturate e/o recanti livelli plastici ad assetto sfavorevole rispetto ai pendii, lungo i quali si possono determinare scivolamenti. Intere porzioni di versante possono scivolare in blocco e successivamente disarticolarsi;
- reticolo idrografico in disequilibrio: quindi in erosione, che determina versanti eccessivamente acclivi in rapporto ai caratteri di resistenza delle rocce che li costituiscono.

Per **cause innescanti** si definiscono, invece, gli elementi interni o esterni al versante che producono un'immediata instabilità del versante stesso, aumentando gli sforzi e riducendo la resistenza al taglio. Tali cause si suddividono a loro volta tra scatenanti, determinanti o immediate. Le principali cause innescanti sono le precipitazioni ed i terremoti.

Abbiamo già detto come in realtà i fenomeni franosi siano il risultato di un'interazione complessa tra elementi differenti, dunque in realtà è difficile inquadrare l'azione di un fattore all'interno di un'unica categoria di cause. Infatti, a parte l'azione della forza di gravità che è da considerarsi come una costante, una stessa causa può rientrare in una o nell'altra categoria in base alle sue caratteristiche e alle condizioni di stabilità del versante.

3. Pericolosità e rischio

Negli ultimi anni numerosi ricercatori e commissioni scientifiche hanno lavorato per definire i concetti di rischio e pericolosità, ma spesso rimangono dei dubbi sul loro uso e sulla scelta delle grandezze necessarie per misurarli. Queste incertezze sono spesso dovute al fatto che i termini assumono sfumature differenti o significati simili quando tradotti da una lingua ad un'altra. Per osservare il tentativo di trovare una standardizzazione dei termini, prendiamo in esame le definizioni date dai più importanti esperti e dalle Commissioni ed Enti, nelle diverse lingue.

Secondo lo “*United States Geological Survey*” (USGS - Servizio Geologico degli Stati Uniti, 1977) si definisce **pericolo geologico** “qualsiasi processo o evento potenziale che costituisce una minaccia per la salute, la sicurezza ed il benessere di una collettività o per l'economia di una qualsiasi popolazione”. Stando a questa definizione, un terremoto o una frana che avvengono in un'area desertica non costituiscono pericolo geologico.

Nel rapporto UNESCO di Varnes e IAEG (1984) lo stesso concetto assume un significato differente e la **pericolosità** (*hazard*) viene definita come “probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo si verifichi in un dato periodo di tempo ed in una data area”.

Da questa seconda definizione risulta molto evidente il cambiamento di prospettiva: un evento è pericoloso indipendentemente dalla presenza dell'uomo o delle sue attività ed infrastrutture. Questa definizione è ormai ampiamente accettata ed utilizzata, ma si adatta meglio ad alcuni eventi, i terremoti per esempio, rispetto che ad altri, le frane. Infatti, nella definizione non si fa riferimento alle dimensioni del fenomeno e all'intensità, che ne influenzano il comportamento e le potenziali conseguenze.

Per risolvere questo problema, Einstein (1988) suggerisce di usare il termine “*danger*”, che possiamo tradurre in italiano come pericolo o intensità, per individuare il fenomeno potenzialmente distruttivo e il termine “*hazard*” per far riferimento alla sua imprevedibilità. Con il termine **pericolo** si intendono le proprietà meccaniche e geometriche dell'evento, compresa la sua localizzazione nello spazio, mentre per **pericolosità** si intende la probabilità di occorrenza del fenomeno.

Fell (1994) introduce nella definizione di pericolosità una grandezza che tenga conto del potere distruttivo di un evento, la **magnitudo** (intensità). Per lui la **pericolosità** è il risultato del prodotto tra la probabilità di occorrenza e la magnitudo.

Per quanto riguarda l'Italia, si utilizza la definizione di pericolosità data da Canuti e Casagli (1996) a partire dalla terminologia del rapporto UNESCO di Varnes (1984). Con il termine **pericolosità**, legato ai concetti di probabilità e tempo di ritorno, si intende la “probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo di determinata intensità si verifichi in un dato periodo di tempo ed in una data area”. L'**intensità** è definita come “la severità geometrica e meccanica del fenomeno potenzialmente distruttivo”, esprimibile sia su una scala relativa, sia in relazione a velocità, volume o energia. Alcuni esperti (Crescenti, 1998) hanno sottolineato la difficoltà di interpretazione ed utilizzo di questa definizione, soprattutto per i non addetti ai lavori, poiché il termine pericolosità viene spesso associato all'intensità di un evento, oltre che alla probabilità che l'evento accada. Per questo motivo, anche in Italia, si è introdotto il concetto di **pericolosità** (*hazard*) definito come “funzione dell'intensità e della frequenza di accadimento di un certo evento potenzialmente distruttivo in una certa area del territorio” (Panizza, 2001):

$$H = f(I ; F)$$

dove:

H = pericolosità (*hazard*)

I = intensità del fenomeno franoso

F = frequenza di accadimento.

Analizzando queste definizioni di pericolosità osserviamo che tutte si basano su tre concetti fondamentali: la localizzazione spaziale, l'intensità o magnitudo ed la frequenza o ricorrenza (Cardinali et al., 2002). Applicando questi concetti all'analisi di eventi franosi possiamo concludere che uno studio di pericolosità di frana per una certa area deve poter individuare dove avverrà, quanto sarà grande e veloce e quale sarà il suo tempo di ritorno.

Con il concetto di **rischio** si intende una “misura della probabilità di conseguenze sfavorevoli sulla salute, sulle proprietà e sulla società, derivanti dall'esposizione ad un fenomeno pericoloso (*hazard*) di un certo tipo e di una certa intensità, in un certo lasso di tempo ed in una certa area” (Smith, 2004). Dunque, per eseguire una valutazione del rischio si devono prendere in considerazione i seguenti concetti:

- **Elementi a rischio** (*element at risk*, E): la popolazione, i beni, le attività economiche, i servizi pubblici ed i beni ambientali presenti in una data area esposta ad un determinato pericolo e dunque predisposti a subire danni.
- **Esposizione al rischio** (*exposition*, E_S): probabilità che un elemento si trovi esposto ad un fenomeno potenzialmente pericoloso in un certo punto e in un certo istante. Essa

dipende dalla possibilità dell'elemento stesso di spostarsi o dal fatto di essere un elemento statico.

- **Probabilità d'impatto** (*impact probability*, P_i): prodotto tra la pericolosità e l'esposizione degli elementi a rischio. Nel caso di elementi statici come, ad esempio, un edificio, poichè il valore dell'esposizione è uguale a 1, probabilità d'impatto e pericolosità coincidono.
- **Valore degli elementi a rischio** (*worth of element at risk*, W): valore economico degli elementi a rischio, espresso in termini monetari o in termini di numero di unità esposte ed è funzione del tipo di elemento: $W = f(E)$.

Di seguito sono elencate le diverse modalità con cui è possibile calcolare questo parametro.

- 1) Calcolo di un valore discreto dei singoli elementi: si definisce il valore degli elementi a rischio come somma del valore discreto dei singoli elementi, usando valutazioni di tipo assicurativo oppure attribuendo dei costi relativi ad ogni tipologia, senza però ottenere una valutazione assoluta. Utilizzo di funzioni di utilità (Einstein, 1988): in pratica, anziché attraverso un valore discreto, gli elementi a rischio sono caratterizzati da un costo sociale o individuale espresso da una funzione.
 - 2) Utilizzo di funzioni di utilità (Einstein, 1988) che esprimono un costo sociale o individuale degli elementi a rischio.
 - 3) Utilizzo di formule empiriche per il calcolo di un valore numerico complessivo.
 - 4) Stima qualitativa del valore complessivo di una certa area: si suddivide il territorio in diverse zone urbanistiche e si stabilisce per ciascuna un valore relativo. Questo è il metodo più usato nella pianificazione di bacino in Italia.
- **Vulnerabilità** (*vulnerability*, V): “grado di danneggiamento e/o perdita di un elemento a rischio determinato dall'occorrenza di un fenomeno potenzialmente pericoloso di una data intensità”. Per effettuare una valutazione della vulnerabilità è necessario capire quali sono le relazioni tra il movimento franoso e l'elemento a rischio. Questa grandezza varia tra 0 (nessuna perdita) e 1 (perdita totale) ed è esprimibile attraverso una funzione che dipende sia dalle caratteristiche degli elementi che dell'intensità del fenomeno: $V = f(E ; I)$.

Per esempio, la vulnerabilità della vita umana e quella delle proprietà sono molto differenti: mentre una casa può avere la stessa vulnerabilità nei confronti di una frana veloce e di una lenta, le persone avranno una vulnerabilità maggiore di fronte ad un evento veloce, poiché difficilmente possono mettersi in salvo (Fell, 1994).

Per valutare la vulnerabilità si può procedere con due approcci differenti:

- 1) Approccio quantitativo: attraverso un calcolo molto complesso a causa delle molteplici variabili in gioco (intensità del fenomeno, aspetto costruttivo e strutturale dell'elemento, posizione dell'elemento rispetto al fenomeno, presenza di eventuali protezioni) si ottiene un numero compreso tra 0 e 1.
- 2) Approcci euristici: esprimono una stima qualitativa o semi-quantitativa della vulnerabilità mediante delle classi. Questi procedimenti, molto presenti nella letteratura sull'argomento, si basano su stime soggettive (Fell, 1994) o sull'utilizzo di matrici.

Per prudenza, negli studi preliminari, si tende a porre $V = 1$, ipotizzando la completa distruzione dell'elemento colpito dalla frana.

- **Danno potenziale** (*potential worth of loss*, W_L): “costo totale dei danneggiamenti e/o perdite subite a seguito dell'occorrenza di un fenomeno potenzialmente pericoloso”: $W_L = V \cdot W$. La quantità delle perdite è legata alle caratteristiche dell'elemento a rischio (valore e vulnerabilità) e all'intensità del fenomeno (vulnerabilità), mentre non dipende dalla pericolosità del fenomeno stesso.

Nel caso di un fenomeno naturale come una frana, solitamente si distingue **rischio specifico** (R_S) e **rischio totale** (R). Canuti e Casagli (1996) hanno definito il rischio specifico come “il grado di perdita attesa (insieme degli elementi colpiti) quale conseguenza di un particolare fenomeno naturale di una data intensità”. Tale valore si esprime in termini di probabilità annua, ed è funzione della pericolosità e della vulnerabilità: $R_S = f(H ; V)$.

Invece, per rischio si intende “il valore atteso delle perdite umane, dei feriti, dei danni alle proprietà e delle interruzioni delle attività economiche dovuti ad un certo fenomeno naturale”, e si esprime come costo annuo o quantità di unità perse per anno: $R = f(H ; W)$.

È possibile valutare in maniera quantitativa il rischio mediante formule matematiche che coinvolgono anche i concetti di pericolosità e di conseguenze dell'evento sugli eventuali elementi a rischio:

$$R_S = H \cdot E_S \cdot V = P_i \cdot V$$

$$R = R_S \cdot W = P_i \cdot W_L$$

dove:

R = rischio totale

R_S = rischio specifico

H = pericolosità

E_S = esposizione al rischio degli elementi a rischio

V = vulnerabilità

P_i = probabilità di impatto = $H \cdot E_S$

W = valore degli elementi a rischio

W_L = danno potenziale

Per effettuare queste stime è necessario lavorando su più fronti e mettendo in gioco abilità inerenti a discipline differenti. Infatti, sono necessarie competenze tecnico-scientifiche per determinare la pericolosità, competenze socio-economiche per valutare la vulnerabilità e i valori dei possibili danni, competenze politiche per effettuare stime dei rischi e per la gestione e la pianificazione del territorio.

Questi calcoli ci permettono di capire dove possiamo agire per mitigare il rischio da frana,

In particolare, possiamo

I calcoli appena analizzati diventano fondamentali per capire quali operazioni possiamo eseguire per ridurre il rischio da frana; tali operazioni possono essere suddivise in cinque differenti classi:

- 1) operazioni che riducono la pericolosità: per esempio soluzioni ingegneristiche che permettono di diminuire la frequenza e/o la grandezza dei fenomeni franosi;
- 2) operazioni che diminuiscono la vulnerabilità: per esempio il consolidamento dei beni a rischio e realizzazione di opere di protezione che rendano minore il coinvolgimento dell'elemento a rischio;
- 3) operazioni che riducono il numero degli elementi a rischio: per esempio la delocalizzazione dei beni esposti in aree non interessate dal fenomeno pericoloso;
- 4) operazioni che innalzano le soglie di rischio accettabile: per esempio la predisposizione di sistemi di allerta, l'educazione e l'informazione;

- 5) operazioni che aumentano le soglie di rischio tollerabile: per esempio la condivisione delle perdite attraverso sistemi di assicurazione, aiuti e compensazioni.

3.1 Zonazione della pericolosità da frana

Per rappresentare le informazioni sulla pericolosità ed il rischio di frana di una determinata regione vengono comunemente utilizzate delle mappe tematiche, sulle quali si raggruppano i differenti gradi di pericolosità o rischio da frana. Questo tipo di rappresentazione è chiamata zonazione. Varnes nel 1984 ha dato una definizione ufficiale di questa procedura: *“The term zonation refers to the division of land into homogenous areas or user defined domains and the ranking of these areas according to their degrees of actual or potential hazard from landslides”*.

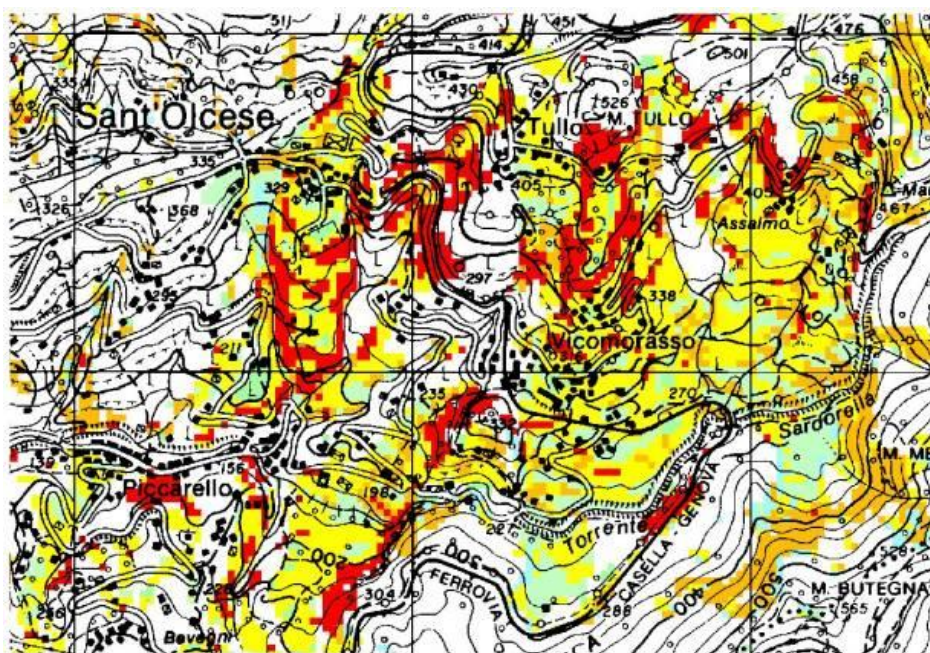


Figura 10: esempio di mappa del pericolo di frana

Questa modalità di rappresentazione della pericolosità da frana costituisce lo strumento più adeguato ai fini della pianificazione territoriale. Infatti, esso contiene informazioni sull'attuale stato di instabilità della regione rappresentata, ma, allo stesso tempo, ne descrive in senso probabilistico la predisposizione all'instabilità.

Le carte di pericolosità rivestono un ruolo fondamentale a livello di pianificazione del territorio, poiché esse prevedono effetti normativi di grande rilevanza. Infatti, sulle zone individuate, a seconda del grado di pericolosità, vengono imposti vincoli e limitazioni d'uso.

Per quanto riguarda la realizzazione di queste carte di pericolosità da frana, il crescente sviluppo delle capacità di calcolo dei computer e l'uso del software GIS sono stati determinanti. In particolare, l'utilizzo del software GIS presenta numerosi vantaggi:

- esecuzione di calcoli su un numero elevato di variabili e tabelle;
- possibilità di incrociare o sovrapporre dati territoriali (*map overlay*);
- opportunità di verificare i risultati ed eventualmente correggere i dati in entrata: l'utente ha la possibilità di massimizzare i risultati attraverso la funzione "*trial and error*", facendo lavorare il modello per molte volte fino a raggiungere i risultati previsti.

I metodi di zonazione della pericolosità da frana sono molteplici, ma si possono suddividere in due tipologie:

- metodi qualitativi: sono soggettivi e producono una zonazione della pericolosità di tipo descrittivo. Per esempio: gli inventari delle frane, le carte di pericolosità derivate dalla cartografia geomorfologica e i metodi di sovrapposizione di carte tematiche indicizzate (indicizzazione delle cause);
- metodi quantitativi: sono basati su parametri oggettivi ed in teoria sono riproducibili (stessi risultati in situazioni differenti); inoltre forniscono stime numeriche della probabilità che in una certa zona si verifichi un fenomeno franoso. Per esempio: i modelli statistici e i modelli deterministici.

4. Descrizione dell'area di studio

L'area presa in esame per questo studio è localizzata in sinistra idrografica del torrente Cismon, nel Comune di Siror.

4.1 Comune di Siror

Siror (m 765 s.l.m.) è il comune che si trova più a nord nella Valle di Primiero (Trentino orientale) e dista 102 km dal capoluogo di regione Trento (*Figura 11*). La popolazione residente è di 1288 abitanti (Istat 2013). Il territorio comunale si estende per 75 km², in parte nel Parco naturale di Paneveggio Pale di San Martino, e comprende il paese di San Martino di Castrozza (1450 m s.l.m.), celebre località turistica ai piedi delle Dolomiti.

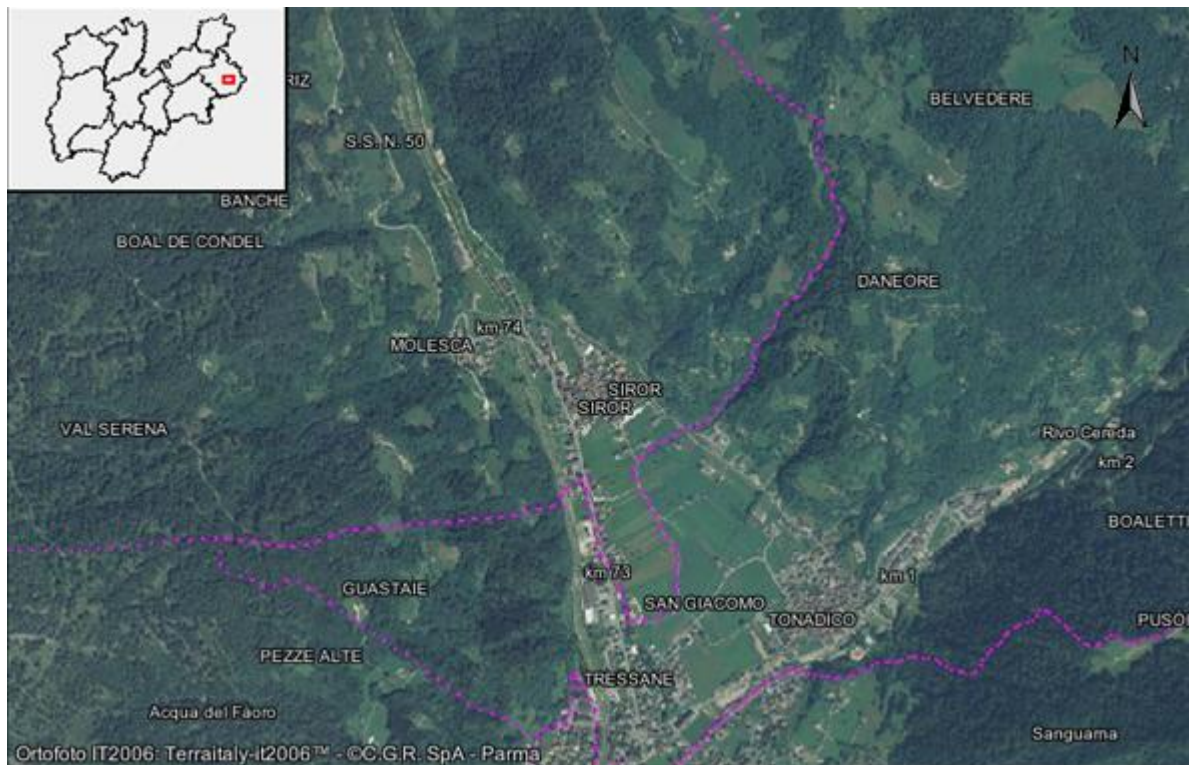


Figura 11: mappa dell'area di studio (tratta dal Portale Geocartografico Trentino)

La *Tabella 4* riassume le principali caratteristiche del Comune di Siror.

Tabella 4: tabella di inquadramento del Comune di Siror

Nome	Descrizione
Coordinate:	46°11'19"N - 11°49'53"E
Altitudine	765 m s.l.m.
CAP	38054
Superficie	75 km ²
Distanza da Trento	102 km
Abitanti	1288 (al 2013)
Frazioni	Nolesca, una parte di San Martino di Castrozza e Passo Rolle
Confina con	Tonadico, Transacqua, Mezzano, Imer, Canal San Bovo, Predazzo, Canale d'Agordo (BL).
Codice ISTAT	022174
Codice catasto	I760
Nome degli abitanti	Siroreri

4.2 Inquadramento geologico

L'area in esame si situa in prossimità del piede del versante che delimita in sinistra idrografica la valle del torrente Cismon.

La definizione schematica della tipologia dei terreni e del substrato roccioso, vede la presenza di depositi alluvionali di fondovalle su cui si colloca la maggior parte dell'abitato di Siror e depositi di prevalente origine gravitativa lungo i versanti montuosi; il substrato roccioso che affiora con discontinuità solamente lungo i versanti è costituito da rocce metamorfiche, in prevalenza filladi quarzifere e micascisti del basamento cristallino.

L'area di studio si colloca nella porzione distale di un evidente accumulo di frana (*Figura 12*) di età incerta ma sicuramente posteriore al termine dell'ultima glaciazione (≈ 10.000 anni fa) della quale, sino ad oggi, non è stato segnalato alcun movimento; è da segnalare però che il versante immediatamente a Nord (loc. Sparpanic) è da tempo oggetto di monitoraggio da parte del Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento per la presenza di evidenze di dissesti in atto, ed i risultati sino ad oggi raccolti hanno confermato l'esistenza di movimenti che presentano una velocità di deformazione di circa 2 cm/anno.

I depositi gravitativi presenti sui versanti hanno struttura estremamente grossolana con la presenza di massi anche ciclopici frammisti a ciottoli e ghiaia in matrice sabbioso limosa; la litologia dei clasti è quasi unicamente filladica.

Sul versante immediatamente a monte di alcune abitazioni lesionate, ubicate ai margini dell'abitato, è segnalata la presenza di emergenze idriche.

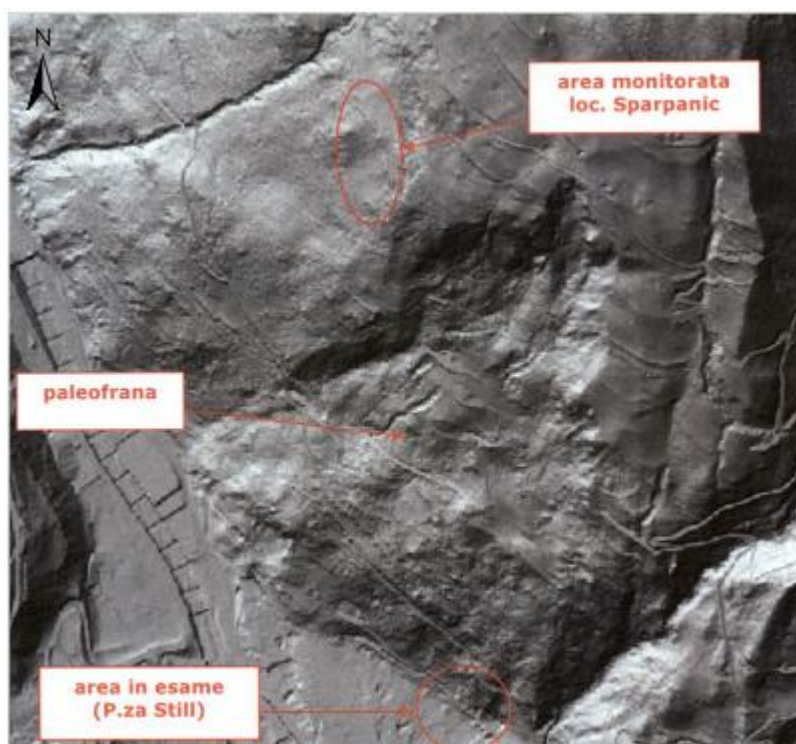


Figura 12: ubicazione area di studio, area monitorata in loc. Sparpanic e paleofrancha

4.3 Indagini geognostiche: stratigrafie

Per individuare la tipologia dei materiali coinvolti nel movimento franoso nonché quelli costituenti il substrato sono stati realizzati 5 sondaggi geognostici la cui ubicazione è riportata nella *Figura 13*.

Quattro di questi sondaggi sono stati attrezzati con inclinometro mentre quello posto più a valle (n° 4435), è stato attrezzato con piezometro. Le stratigrafie dei sondaggi geognostici eseguite dal Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento, di seguito descritte, sono riportate negli allegati (*Allegato 1, Allegato 2, Allegato 3*).

Nella *Tabella 5* sono elencati i sondaggi con le relative profondità.

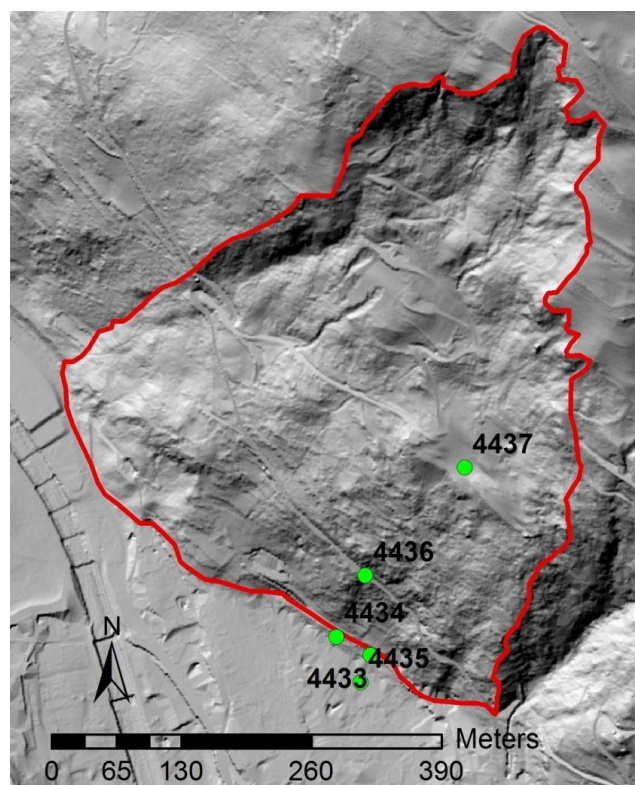


Figura 13: ubicazione sondaggi geognostici

Tabella 5: sondaggi stratigrafici

sondaggio (ID)	4433	4434	4435	4436	4437
profondità [m]	35	30	30	78	102
bedrock [m]	34	-	-	43	71
prof. falda [m]	-	-	28	-	56
inclinometro	incl. 309	incl. 308	piezometro	incl. 323	incl. 332
data	06/09/2012	11/09/2012	05/09/2012	31/07/2013	28/01/2015

L'esame delle stratigrafie, riportate in *Allegato 1*, consente di osservare come i depositi indagati siano in termini generali molto grossolani, costituiti da un'alternanza di livelli ghiaiosi e ciottolosi con, subordinati, livelli sabbiosi.

Il **sondaggio 4433** (*Allegato 1*), situato lungo la stradina comunale a quota 776 m s.l.m., ha una profondità di 35 m. In questo caso il foro ha raggiunto il substrato roccioso, rappresentato da filladi molto fratturate, ad una profondità di circa 34 m. Il materiale che si osserva è "ghiaia di natura calcarea con sabbia e limo" intervallato da brevi strati (< 0,5 m) a granulometria inferiore di "sabbia con limo". Questo sondaggio è stato attrezzato con l'inclinometro numero 309. La superficie di scivolamento è stata rilevata dall'inclinometro a 7 m, localizzata in un sottile strato sabbioso.



Figura 14: lavori di realizzazione del foro lungo la strada comunale

Il **sondaggio 4434** (*Allegato 1*), anch'esso situato lungo la stradina comunale a quota 777 m s.l.m., ha una profondità di 30 m. Questo foro non ha raggiunto il substrato roccioso. Il materiale che si osserva è "ghiaia di natura calcarea con ciottoli e sabbia" con la presenza, alla profondità di circa 5 m, di uno strato di 2 m di trovante. Questo sondaggio è stato attrezzato con l'inclinometro numero 308. La superficie di scivolamento è stata rilevata dall'inclinometro a 7 m, ovvero nello strato di transizione tra il trovante e la ghiaia.

Il **sondaggio 4435** (*Allegato 1*), situato in piazza Still a quota 768 m s.l.m., ha una profondità di 30 m. Questo foro non ha raggiunto il substrato roccioso. Il materiale che si osserva è "ghiaia con sabbia e limo" con la presenza di brevi strati a granulometria inferiore di "sabbia con limo". Questo sondaggio è stato attrezzato con un piezometro.

Il **sondaggio 4436** (*Allegato 2*), situato un po' più a monte dei precedenti, ad una quota di 823 m s.l.m., ha una profondità di 78 m. La stratigrafia si discosta in maniera piuttosto evidente da quanto riscontrato nei precedenti sondaggi: il terreno è composto quasi totalmente da filladi (compatte, fratturate e molto fratturate) intervallate da strati a granulometria fine, composti da sabbie e ghiaie.

Come si nota dalle stratigrafie e in *Figura 15*, è presente uno strato di “sabbia fine limosa con ghiaia” situato tra i 36 e i 43 m, proprio dove è rilevata la superficie di scivolamento (37,5 m). Questo sondaggio è stato attrezzato con l'inclinometro numero 323.



Figura 15: stratigrafia del sondaggio numero 4436 alla profondità di 35-40 m

Il **sondaggio 4437** (*Allegato 3*), situato ancora più a monte dei precedenti, ad una quota 909 m s.l.m., ha una profondità di 102 m. La stratigrafia mostra un'alternanza di strati composti di “ghiaia di natura filladica” con filladi (da compatte a fratturate). Alla profondità della superficie di scivolamento (58,5 m) è presente uno strato di “ghiaia di natura filladica con scarso limo” ed un breve strato di trovante (da 59 a 59,5 m). Questo sondaggio è stato attrezzato con l'inclinometro numero 332.



Figura 16: stratigrafia del sondaggio numero 4437 alla profondità di 55-60m

La scelta dei punti dove sono stati eseguiti i sondaggi è forse discutibile dato che essi sono posizionati praticamente tutti a ridosso del punto inferiore (*tip*) della frana. Per poter meglio analizzare il comportamento dei terreni, sarebbe opportuno avere una distribuzione omogenea su tutta la superficie.

4.4 Prove geotecniche

Tutte le prove geotecniche sono state effettuate per il sondaggio 4436, ubicato poco a monte dell'abitato di Siror. Dal sondaggio sono stati estratti 3 campioni a diverse profondità, tutte e 3 comunque prossime alla superficie di scivolamento ($\approx 37,5$ m).

campione 1: 36,40 - 37,00 m

campione 2: 37,50 - 38,00 m

campione 3: 38,50 - 39,00 m

Tabella 6: prove geotecniche effettuate (fino al 25/02/2015)

N° certif.	CERTIFICATO	Sigla certificato	Sondaggio	Campione	Profondità
3144	DETERMINAZ. MASSA VOLUMICA DEI GRANULI SOLIDI	GS3414	323	1	36,40-37,00 m
3145	GRANULOM. COMPLETA PER VAGLIATURA E SEDIMENTAZIONE	AE3014	323	1	36,40-37,00 m
3146	DETERMIN. DEI LIMITI DI LIQUIDITA' E DI PLASTICITA'	SCL0615	323	1	36,40-37,00 m
3147	TAGLIO DIRETTO SU RIMANEGGIATO CON RICOSTITUZ. PROVINO	TDR2114	323	1	36,40-37,00 m
3148	DETERMINAZ. MASSA VOLUMICA DEI GRANULI SOLIDI	GS3914	323	2	37,50-38,00 m
3149	GRANULOM. COMPLETA PER VAGLIATURA E SEDIMENTAZIONE	AE3114	323	2	37,50-38,00 m
3150	DETERMIN. DEI LIMITI DI LIQUIDITA' E DI PLASTICITA'	SCL0515	323	2	37,50-38,00 m
3151	TAGLIO DIRETTO SU RIMANEGGIATO CON RICOSTITUZ. PROVINO	TDR2214	323	2	37,50-38,00 m
3152	DETERMINAZ. CONTENUTO IN ACQUA E MASSA VOLUMICA DEI GRANULI SOLIDI	GS3314	323	3	38,50-39,00 m
3153	GRANULOM. COMPLETA PER VAGLIATURA E SEDIMENTAZIONE	AE2914	323	3	38,50-39,00 m
3154	DETERMIN. DEI LIMITI DI LIQUIDITA' E DI PLASTICITA'	SCL2714	323	3	38,50-39,00 m
3155	TAGLIO DIRETTO SU RIMANEGGIATO CON RICOSTITUZ. PROVINO	TDR2014	323	3	38,50-39,00 m
3156	TRIASSIALE CONSOLIDATA DRENATA (CD)	TCD0614	323	3	38,50-39,00 m
3157	PERMEABILITA' IN CELLA TRIASSIALE	PT1814	323	3	38,50-39,00 m
3158	PERMEABILITA' IN CELLA TRIASSIALE	PT1914	323	3	38,50-39,00 m
3159	PERMEABILITA' IN CELLA TRIASSIALE	PT2014	323	3	38,50-39,00 m

Di seguito sono riportati i principali risultati delle prove geotecniche effettuate secondo la numerazione indicata in *Tabella 6*.

3144 Massa volumetrica dei granuli solidi a 20°C: $G_s = 2,82$ g

3145 Percentuale passante al setaccio da 63 micron: 31,00 %

Coefficiente di uniformità: $C_u = D_{60}/D_{10} = 672,41$

Coefficiente di curvatura: $C_c = D_{30}^2/(D_{10} \cdot D_{60}) = 0,15$

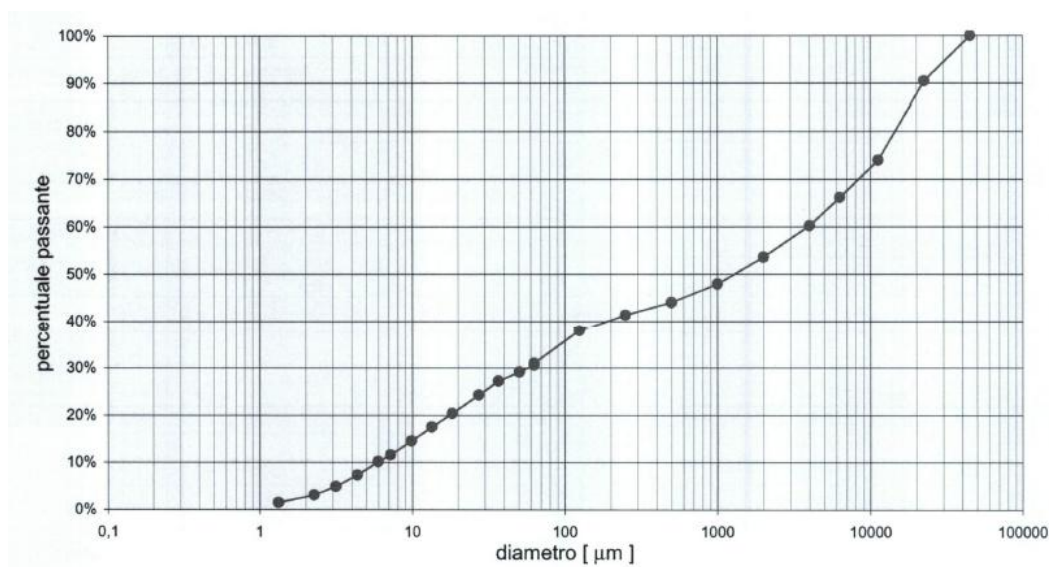


Figura 17: curva granulometrica

3146 Limite di liquidità = 32,6 % Limite di plasticità = 20,9 % Indice di plasticità = 12

3147 Per la prova di taglio diretto sono stati utilizzati 3 provini (A, B e C) ricostituiti con materiale essiccato passante al setaccio da 850 micron. Per tutte le prove è stata impostata una velocità di rottura V_f di 0,00833 mm/min.

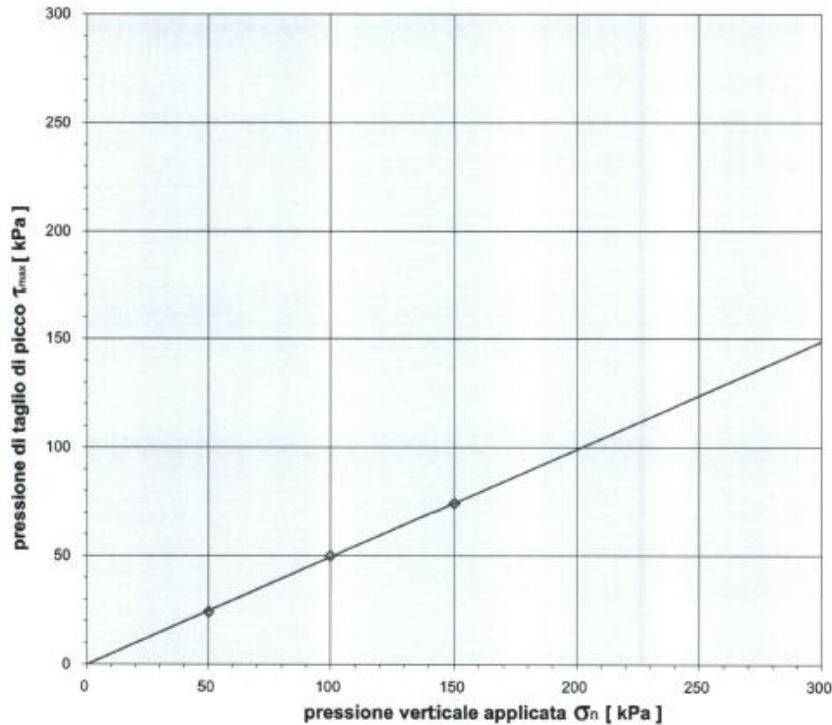


Figura 18: proposta di interpretazione involuppo di rottura

Tabella 7: risultati della prova di taglio

	Tempo di consolidazione t_{100} [min]	Pressione verticale applicata σ_n [kPa]	Pressione di rottura di picco T_{max} [kPa]	Deformazione rottura Δ_s [mm]
Provino A	1,44	50	24,177	6,303
Provino B	1,96	100	50,069	6,676
Provino C	1,00	150	74,166	6,629

Coesione $C' = 0,0$ kPa

Angolo $\phi' = 26,4^\circ$

3148 Massa volumetrica dei granuli solidi a 20°C: $G_s = 2,77$ g

3149 Percentuale passante al setaccio da 63 micron: 20,06 %

Coefficiente di uniformità: $C_u = D_{60}/D_{10} = 950,00$

Coefficiente di curvatura: $C_c = D_{30}^2/(D_{10} \cdot D_{60}) = 2,74$

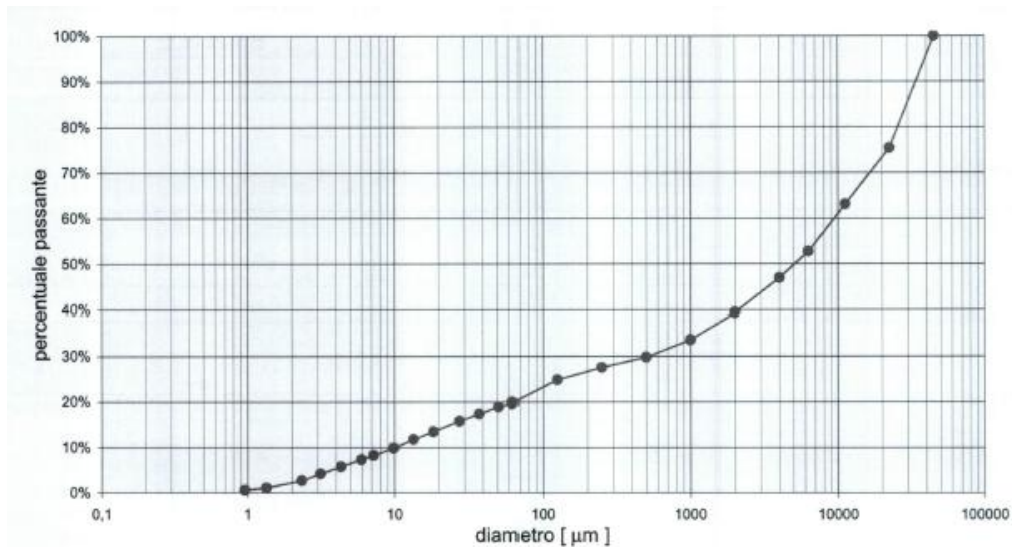


Figura 19: curva granulometrica

3150 Limite di liquidità = 30,5 % Limite di plasticità = 20,3 % Indice di plasticità = 11

3151 Per la prova di taglio diretto sono stati utilizzati 3 provini (A, B e C) ricostituiti con materiale essiccato passante al setaccio da 850 micron. Per tutte le prove è stata impostata una velocità di rottura V_f di 0,00833 mm/min.

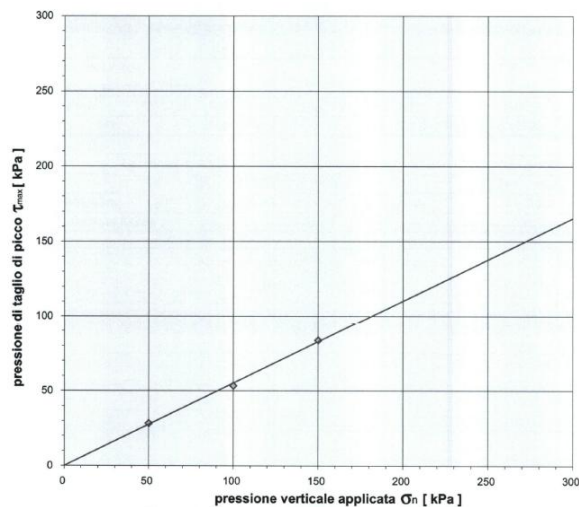


Figura 20: proposta di interpretazione involuppo di rottura

Tabella 8: risultati della prova di taglio

	Tempo di consolidazione t_{100} [min]	Pressione verticale applicata σ_n [kPa]	Pressione di rottura di picco T_{max} [kPa]	Deformazione rottura Δ_s [mm]
Provino A	1,96	50	28,345	6,164
Provino B	1,44	100	53,407	7,327
Provino C	1,21	150	83,611	7,744

Coesione $C' = 0,0$ kPa Angolo $\phi' = 28,9^\circ$

3152 Contenuto in acqua $w = 12,3\%$ Massa volumetrica dei granuli solidi a 20°C : $G_s = 2,78$ g

3153 Percentuale passante al setaccio da 63 micron: 32,26 %

Coefficiente di uniformità: $C_u = D_{60}/D_{10} = 245,61$

Coefficiente di curvatura: $C_c = D_{30}^2/(D_{10} \cdot D_{60}) = 0,30$

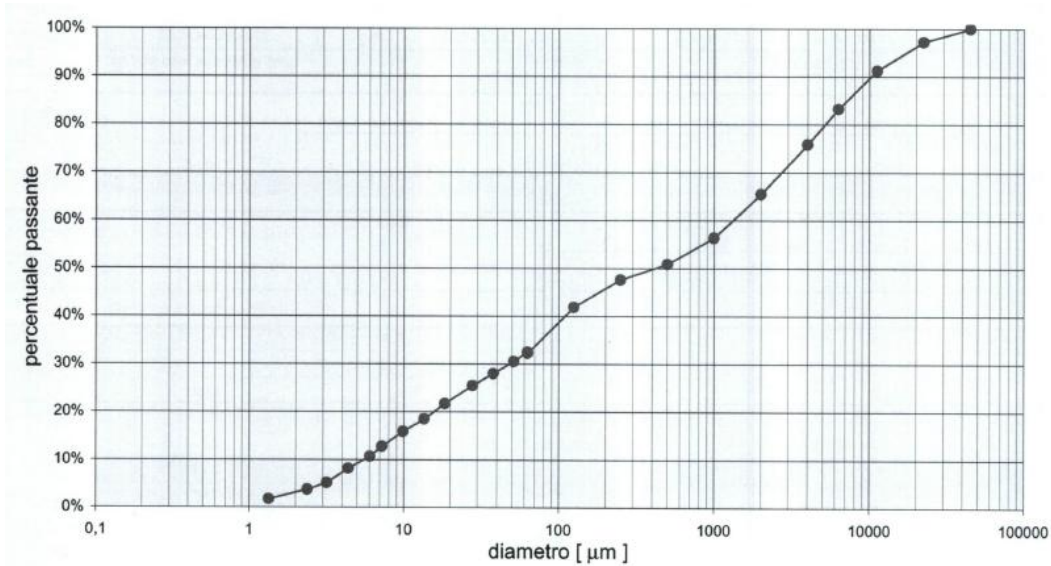


Figura 21: curva granulometrica

3154 Limite di liquidità = 34,8 % Limite di plasticità = 26,3 % Indice di plasticità = 9

3155 Per la prova di taglio diretto sono stati utilizzati 3 provini (A, B e C) ricostituiti con materiale essiccato passante al setaccio da 850 micron. Per tutte le prove è stata impostata una velocità di rottura V_f di 0,00833 mm/min.

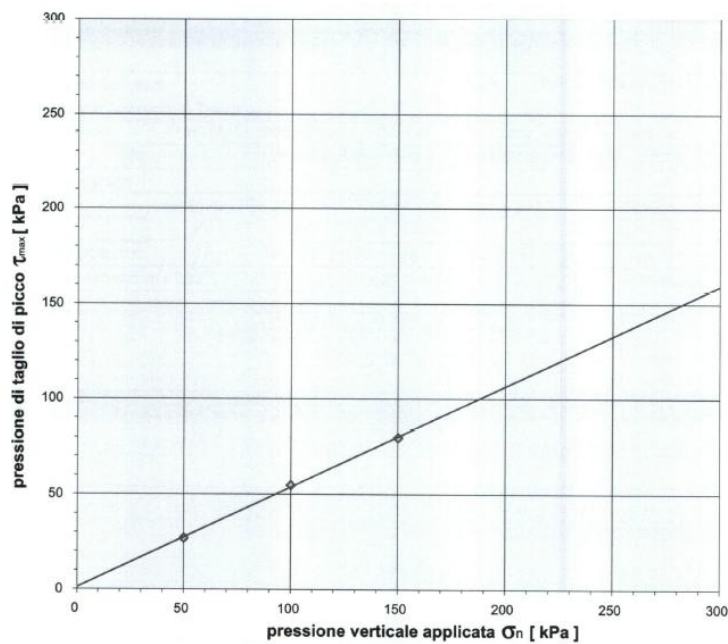


Figura 22: proposta di interpretazione involucro di rottura

Tabella 9: risultati della prova di taglio

	Tempo di consolidazione t_{100} [min]	Pressione verticale applicata σ_n [kPa]	Pressione di rottura di picco T_{max} [kPa]	Deformazione rottura Δ_s [mm]
Provino A	1,00	50	26,44	5,997
Provino B	1,00	100	54,798	6,910
Provino C	1,00	150	79,722	6,483

Coesione $C' = 1,1$ kPa

Angolo $\phi' = 27,8^\circ$

5. Approfondimenti conoscitivi e monitoraggio della frana

Come precedentemente accennato, il versante soprastante l'abitato di Siror, è oggetto di studio da parte del Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento dal 2004. Durante questi anni sono state condotte numerose indagini di carattere geologico, geomorfologico e strutturale per definire la geometria della zona instabile e sono stati installati vari sistemi di monitoraggio finalizzati a ricostruire la cinematica dei movimenti gravitativi in atto.

Il monitoraggio oggetto del presente studio, condotto dai tecnici del Servizio Geologico e realizzato con la collaborazione del Comune di Siror, riguarda il versante in sinistra orografica del torrente Cismon, per la parte immediatamente a nord dell'abitato di Siror.

Si riporta, di seguito, una breve descrizione delle indagini effettuate e dei sistemi di monitoraggio adottati con particolare riguardo a quelli che hanno fornito dati utili ai fini del presente studio.

5.1 Indagini geofisiche: ERT, MASW, H/V

Nelle fasi di studio del movimento gravitativo che insiste sull'abitato di Siror sono state effettuate un'indagine ERT, un'indagine MASW e tre analisi H/V. La loro ubicazione è riportata nella *Figura 23*.



Figura 23: ubicazione indagini geofisiche

La tomografia elettrica (ERT, *Electrical Resistivity Tomography*) è un metodo di indagine impiegato insieme ad altri metodo geofisici per analizzare strutture sepolte oppure per ricercare acque sotterranee. Con questo metodo si può analizzare la struttura resistiva del terreno, mostrando i differenti valori di resistività elettrica in base alla tipologia dei terreni e al loro contenuto in acqua; in questo modo si riesce a ricostruire sezioni bidimensionali di resistività.

Nell'indagine effettuata, l'esigua disponibilità di spazio ha limitato la lunghezza dell'indagine elettrica che è risultata di 47 m (distanza interelettrodica 1 m) e la profondità di indagine che è di poco superiore ai 7 m. La *Figura 24* rappresenta mediante differenti colori zone con resistività diversa. L'indagine ERT ha permesso di verificare come la porzione superiore del tratto indagato (escludendo il terreno vegetale) presenti valori di resistività molto elevati, sicuramente compatibili con la presenza di depositi gravitativi molto grossolani incontrati nei fori di sondaggio. A partire dai 3-4 m circa di profondità, in modo particolare nella seconda metà dello stendimento, si osserva la presenza di minimi resistivi che suggeriscono la presenza di livelli di circolazione idrica.

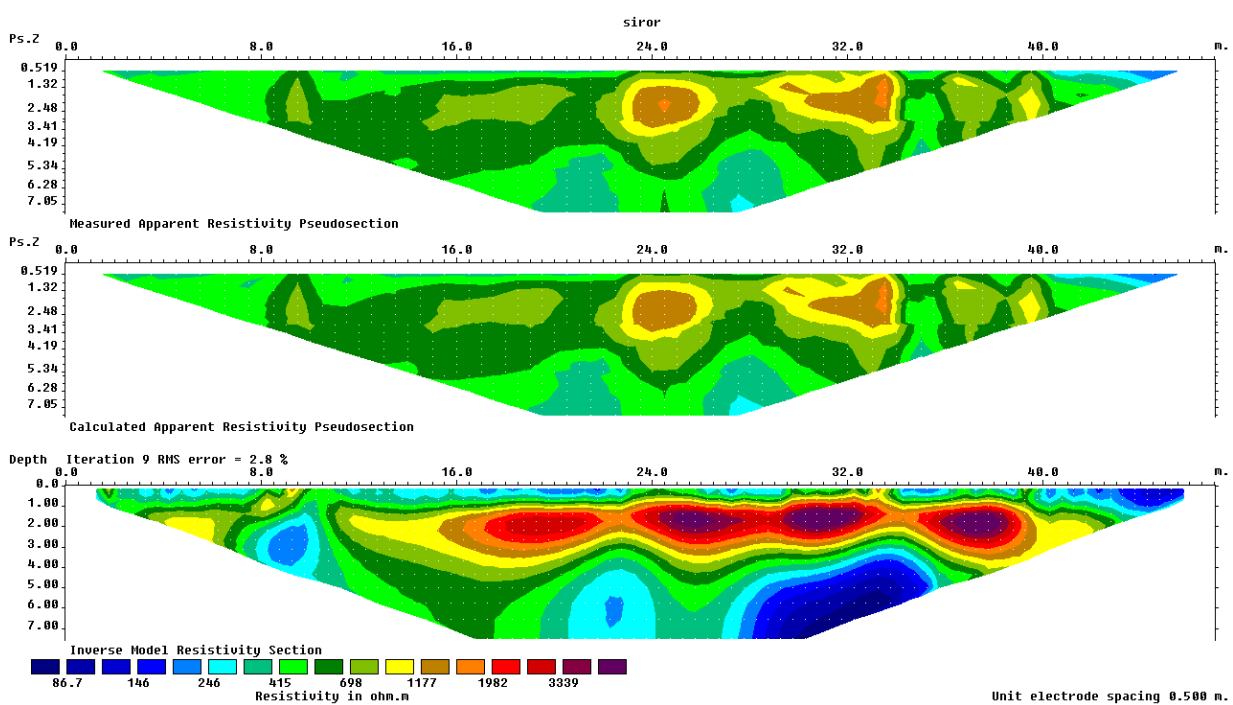


Figura 24: indagini ERT

Il metodo MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) è una metodologia di indagine non invasiva che misura le onde superficiali in corrispondenza di alcuni sensori posti in superficie, e da queste misure ottiene un profilo di velocità delle onde di taglio verticali.

Il metodo H/V valuta il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto; analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno. L'informazione tipica risultante dalle curve H/V è la frequenza di risonanza (f_0), il cui valore può essere connesso alla velocità delle onde di taglio (V_s) e allo spessore (H) degli strati soffici.

Dagli studi effettuati nella zona di Siror l'indagine MASW interpretata unitamente all'analisi H/V n° 3 ha consentito di osservare come in corrispondenza della piazza tra le abitazioni lo spessore della copertura quaternaria sia di circa 32 m e che le caratteristiche meccaniche dei depositi siano sicuramente discrete.

La velocità V_s del deposito è compresa tra un minimo di 240 m/s ad un massimo di 545 m/s, valori che consentono di escludere la presenza di livelli comprimibili come limi saturi o torbe, peraltro non rilevati neppure nel sondaggio meccanico.

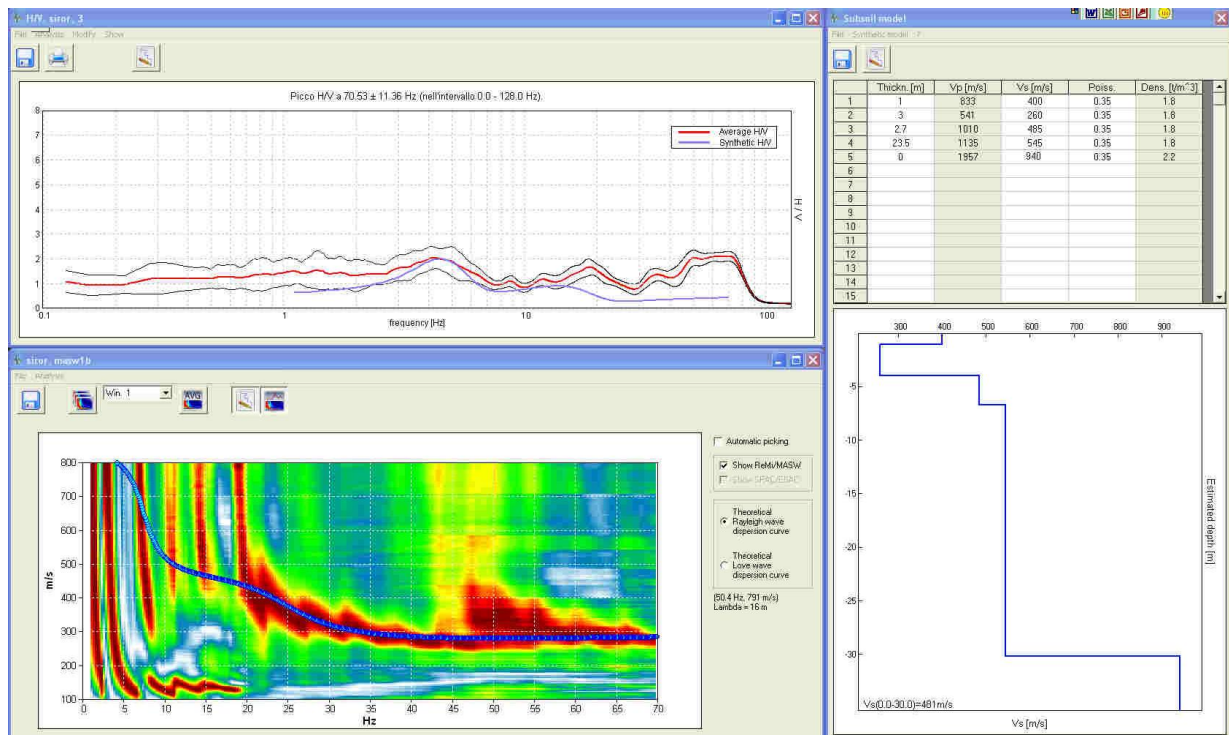


Figura 25: indagine MASW ed analisi H/V n° 3

5.2 Monitoraggio piezometrico

Il piezometro è lo strumento che permette di misurare la profondità a cui si trova una falda acquifera sotterranea; per effettuare la misura esso viene introdotto verticalmente nel terreno mediante un sondaggio.

Il piezometro a tubo aperto (*Figura 26*) è un tubo di materiale metallico o plastico, forato per tutta la lunghezza o solo nella parte finale, che viene impiegato per individuare una falda idrica in terreni omogenei con permeabilità elevata ($k > 10^{-5}$ m/s). Una volta che il piezometro è stato inserito nel foro trivellato nel terreno, lo spazio tra il tubo e la parete del foro viene riempito con materiale filtrante (sabbia o ghiaia).

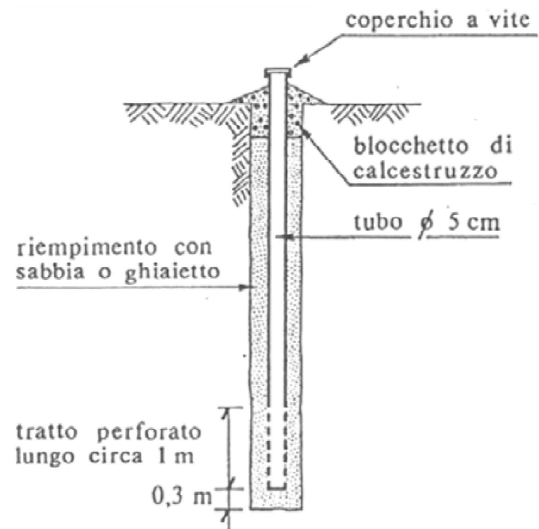


Figura 26: schema piezometro a tubo aperto

In superficie, si protegge la testa del piezometro costruendo un idoneo pozzetto, con chiusura a lucchetto.

Per misurare a quale profondità si trova la falda acquifera viene calata nel tubo un'apposita sonda elettrica legata ad un cavo graduato: quando la sonda raggiunge l'acqua emette un suono e l'operatore legge la misura della profondità della falda sul cavo graduato.

La misura delle pressioni neutre, ovvero della pressione dell'acqua nei pori del terreno, e dei livelli di falda è un aspetto fondamentale nell'analisi di stabilità dei versanti.

Nell'area di studio è stato inserito un piezometro nell'abitato di Siror, come riportato in *Figura 27*. Lo strumento ha una profondità di 28,3 m, acquisisce dati in continuo ma viene anche utilizzato per misure manuali.

I dati raccolti dal piezometro sono rappresentati in *Figura 28*. Il grafico mostra che l'acqua è stata rilevata a circa 28 m di profondità e le misure non hanno mai evidenziato variazioni di quota superiori ai 1 m.



Figura 27: ubicazione del piezometro

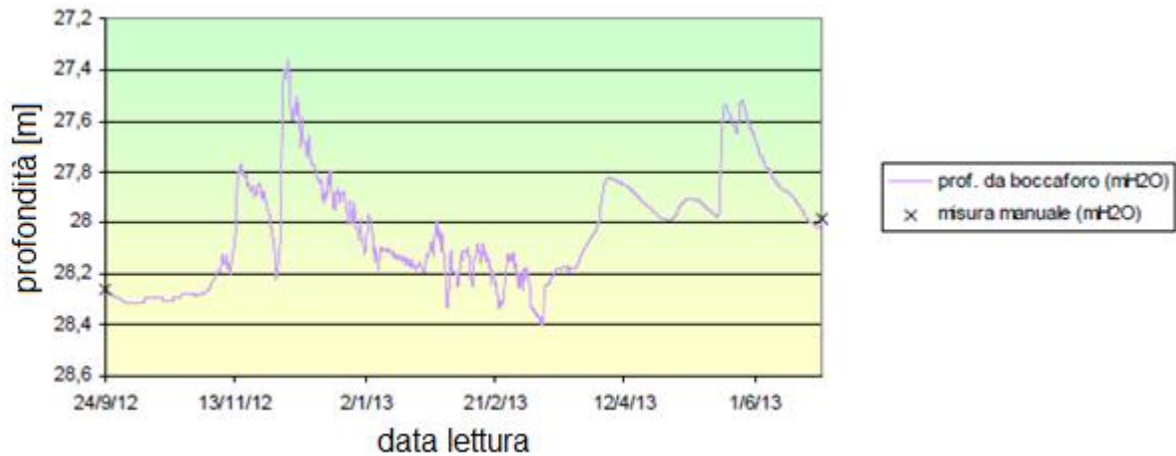


Figura 28: misura della falda (mH₂O)

5.3 Monitoraggio inclinometrico

L'inclinometro è uno strumento che permette di determinare e misurare deformazioni e spostamenti nel terreno, mediante una sonda inclinometrica che viene inserita in un tubo verticale collocato in un foro nel terreno.

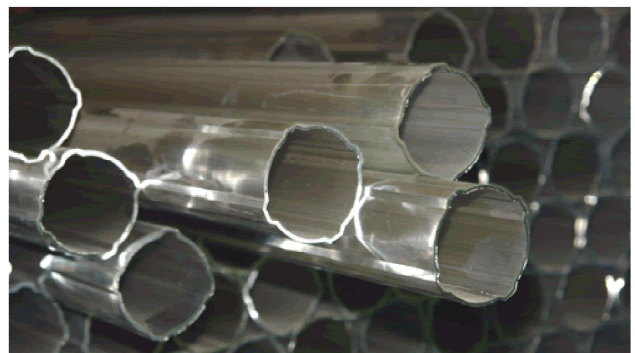


Figura 29: tubi inclinometrici di alluminio

Il tubo inclinometrico (Figura 29) possiede quattro guide in corrispondenza dei quattro quadranti, che consentono di orientare il tubo rispetto ai punti cardinali, permettendo di effettuare misure ripetibili. Il tubo può avere diametri diversi ed essere costituito di alluminio o pvc, in base alle proprietà del terreno nel quale vanno effettuate le misure.

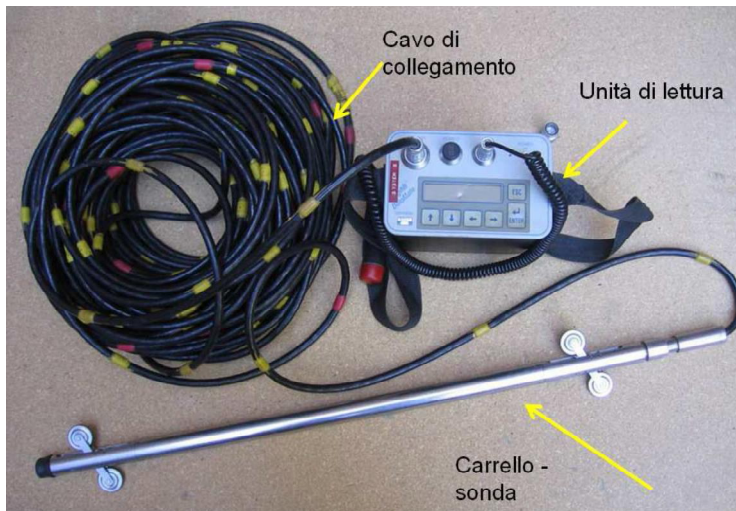


Figura 30: attrezzatura necessaria per un rilievo inclinometrico

La sonda inclinometrica (Figura 30) è composta da una struttura in acciaio inox sulla quale sono montati due carrelli con rotelle, necessari per far scorrere la sonda lungo il tubo inclinometrico. Nella sonda sono presenti due sensori servoaccelerometrici, posti su piani perpendicolari, uno parallelo alle scanalature di guida del tubo

inclinometrico e l'altro perpendicolare

ad esse, che permettono di effettuare misure di angoli rispetto alla verticale, lungo le due direzioni perpendicolari. La sonda è collegata mediante un cavo elettrico ad un'unità di lettura, una centralina portatile digitale che permette di leggere in tempo reali i valori delle misure effettuate e di salvare i dati acquisiti.

La centralina raccoglie i dati delle misure degli angoli di inclinazione del tubo rispetto alla verticale proiettati sui due piani tra loro perpendicolari, moltiplicati per una costante strumentale ($10.000 < K < 25.000$). I dati raccolti hanno la forma:

$$K \cdot \sin \theta + b$$

dove b rappresenta lo *zero offset*, ovvero un errore sistematico (diverso per i due sensori, ovvero per le due direzioni rispetto a cui vengono misurati gli angoli) a causa della non perfetta verticalità del tubo inclinometrico per difetti costruttivi e perdita di rettificazione.

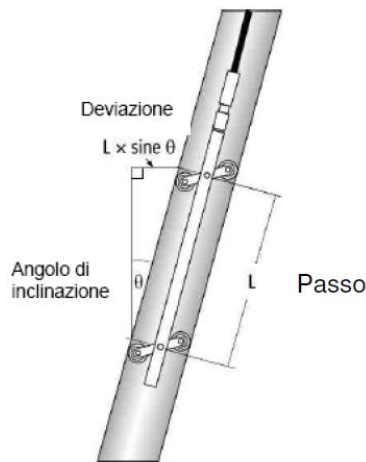


Figura 32: schema di una sonda inclinometrica

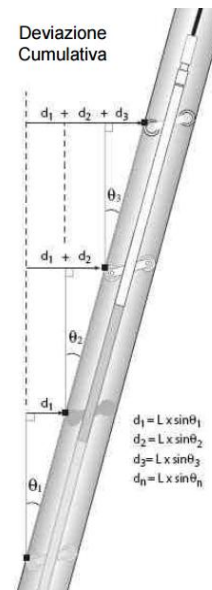


Figura 31: significato della deviazione cumulativa

Il *digit* è l'unità di misura che solitamente si utilizza per le misure effettuate con l'inclinometro. Il fattore di conversione da *digit* a millimetri è 0,01 mm/digit. Per passare da valori angolari a spostamenti si utilizza la funzione trigonometrica $L \cdot \sin \theta$, dove L è il passo della sonda (Figura 32).

Con il termine “deviazione incrementale” si definiscono gli spostamenti laterali del tubo che vengono calcolati alle diverse profondità mediante la seguente formula:

$$\text{deviazione incrementale [mm]} = \text{passo} \cdot (\text{differenza algebrica delle letture coniugate} / 2K)$$

dove per letture coniugate si intendono due letture effettuate alla stessa quota, con la sonda ruotata di 180°.

Per *deviazione cumulativa* si intende la somma delle successive deviazioni incrementali, in funzione della profondità (Figura 31).

Per quanto riguarda l'area di studio situata nel Comune di Siror nel 2012 sono stati installati 3 tubi inclinometrici e, successivamente, il monitoraggio è stato ampliato integrando con altri 2 tubi inclinometrici posizionati uno nel 2013 e l'altro nel 2015. In Figura 33 sono riportate le posizione dei tubi inclinometrici con l'identificativo della banca dati degli inclinometri.

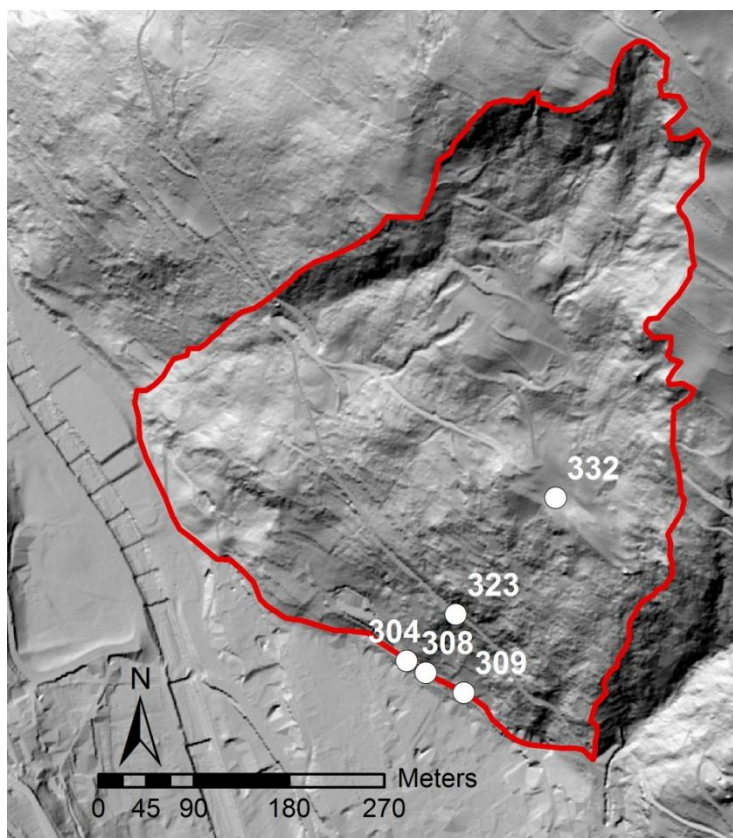


Figura 33: ubicazione sondaggi inclinometrici

Gli inclinometri ID 304, 308 e 309 sono stati posizionati nel 2012 in corrispondenza delle abitazioni danneggiate. I grafici presenti negli *Allegati da Allegato 6 a Allegato 14* riportano i dati rilevati fino al 27/01/2015. Tutte le misure inclinometriche di questi tubi mostrano una chiara superficie di scivolamento a circa 6-8 m di profondità ed una velocità di deformazione pressoché costante, pari a circa 8-10 mm/anno. La direzione di scivolamento è di circa 200° sud ovest, quindi coincidente con le direzioni dei vettori topografici.

I dati raccolti dal tubo inclinometrico ID 309 mostrano una variazione nella deformazione a partire dalla primavera 2014: si passa da uno spostamento medio di 5 mm/anno a uno di circa 17 mm/anno.

Nel 2013 è stato installato un ulteriore inclinometro (ID 323), più profondo dei precedenti, sulla strada che porta alla località Petina, con lo scopo di verificare il modello deformativo in atto. I grafici presenti negli *Allegati da Allegato 15 a Allegato 17* riportano i dati rilevati fino al 27/01/2015. In questo inclinometro è stato rilevato uno spostamento medio di circa 11 mm/anno con una direzione di spostamento prossima ai 200° sud ovest, coincidente con la massima pendenza del versante. In questo sondaggio si rileva una superficie di scivolamento a circa 37-38 m di profondità.

L'inclinometro con ID 332 è stato posizionato a gennaio 2015, e fin'ora è stata effettuata una sola lettura quindi i dati di spostamento medio annuo e azimut sono meno affidabili. I grafici presenti in *Allegato 18 e Allegato Allegato 19* mostrano che questo inclinometro ha rilevato uno spostamento di 0,42 mm in circa 2 mesi.

Tabella 10: principali caratteristiche degli inclinometri

	304	308	309	323	332
Coordinate	X: 718812 Y: 5118772	X: 718839 Y: 5118746	X: 718660 Y: 5118989	X: 718499 Y: 5119039	X: 718588 Y: 5119227
quota [m s.l.m.]	777	777	776	823	908
velocità scivolamento [mm/y]	8,96	8,04	9,91	11,3	7,43
profondità [m]	13	29	33,5	76	101
profondità scivolamento [m]	5,5	7	7	37,5	58,5
azimut [°]	212	202	190	200	250
prima lettura	05/09/2012	22/10/2012	22/10/2012	31/07/2013	28/01/2015
giorni lettura	861	814	814	545	54

5.4 Monitoraggio topografico ottico

Dal 2004 ad oggi possiamo distinguere quattro differenti fasi di indagine, che si differenziano per il progressivo aumento del numero di punti di monitoraggio.

Fase 1 Le prime misure di monitoraggio, tra il 2004 ed il 2010, riguardavano una quindicina di capisaldi distribuiti in un'area boscata molto circoscritta (meno di 1 ha) posta al limite inferiore dei prati sotto la località Strina, a valle di due masi.

Obiettivo delle misure iniziali era la verifica dei movimenti nelle immediate vicinanze dei ruderi di una vecchia baita (*Figura 34*). Alcune testimonianze riferivano che la stessa baita ha subito nel tempo movimenti che ne hanno dapprima limitato la visibilità dal basso e successivamente provocato il crollo. Le misure sono state eseguite con stazione totale posta su pilastrini realizzati nella zona d'interesse con alcune misure di controllo su punti esterni ritenuti fermi, posti a monte e sul versante opposto.

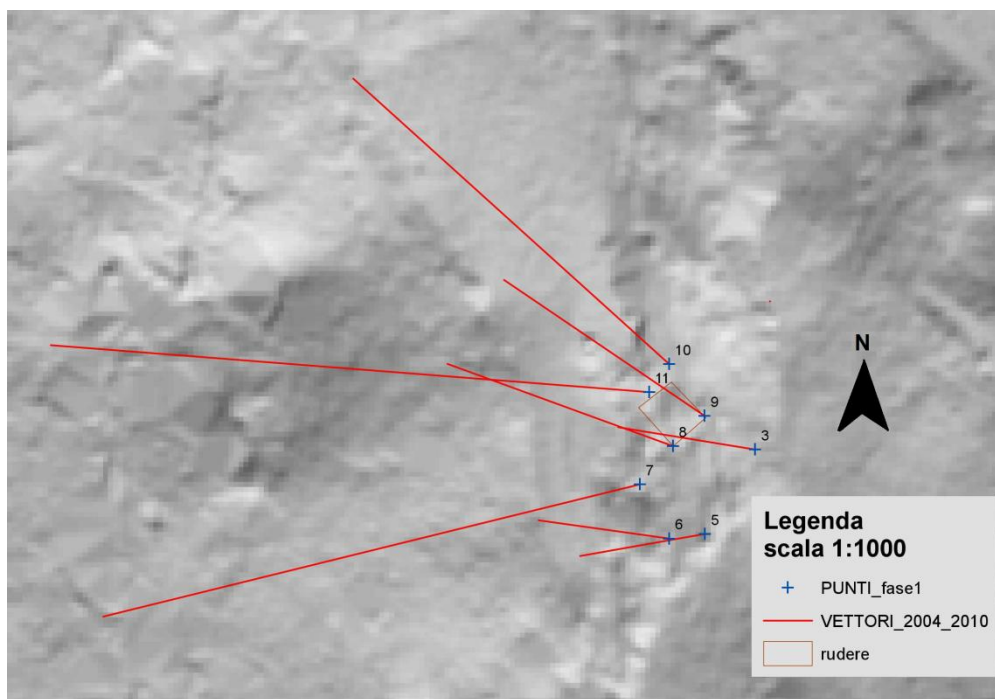


Figura 34: Punti di monitoraggio e relativi spostamenti nella fase 1 di monitoraggio

Nella Figura 34 sono riportati i punti più significativi relativi alla prima fase del monitoraggio. Risulta evidente che gli spostamenti maggiori, pari a circa 160 mm, si sono misurati nei punti più a valle, 7 e 11; le direzioni non sempre del tutto coerenti sono affette da errori probabilmente legati all'instabilità locale dei capisaldi. Le velocità medie di deformazione dei punti maggiormente soggetti al movimento sono abbastanza costanti fino al luglio 2008, prossime ai 20 mm/anno; hanno subito una evidente accelerazione dal 2008 al 2010 pari a circa 45 mm/anno.

Fase 2 Il modello digitale del terreno del 2007 ha messo in evidenza come la zona monitorata si trovi in prossimità di una evidente discontinuità che parrebbe configurarsi come una nicchia di frana che si estende verso nord – nord ovest, parallela al corso del torrente, per alcune centinaia di metri.

In base a queste valutazioni ed a seguito di richiesta da parte del Comune, in accordo con le valutazioni di carattere geologico, si è deciso di estendere il monitoraggio con l'obiettivo di coprire l'intero versante sotto la nicchia citata. Si è quindi realizzato un sistema di riferimento con 5 punti ritenuti fermi (prefisso R), 2 dei quali sul versante opposto (ST). I nuovi punti di monitoraggio sono stati materializzati fissando tasselli porta prisma a rocce affioranti e a muri di sostegno e quindi più solidali alla superficie, con una numerazione da 1 a 15 e sono stati collimati dal punto ST sul versante opposto. Le misure sono iniziate nel dicembre 2011 e consistono in almeno tre strati di misura per ogni punto (sei misure). Non va dimenticato che la

distanza di collimazione incide sulla precisione delle misure, soprattutto nella componente verticale, quindi i risultati ottenuti sono affetti da un'incertezza stimabile pari a circa ± 5 mm.

Fase 3 Nel 2012, a seguito di segnalazioni da parte del Comune di cedimenti sugli edifici nella parte più a nord est dell'abitato e ad un'ulteriore verifica del modello digitale del terreno, si sono aggiunti ai precedenti ulteriori otto punti numerati dal 16 al 23. Le misure sono state condotte dallo stesso punto di stazione e nel modo precedentemente descritto, a partire dal luglio del 2012.

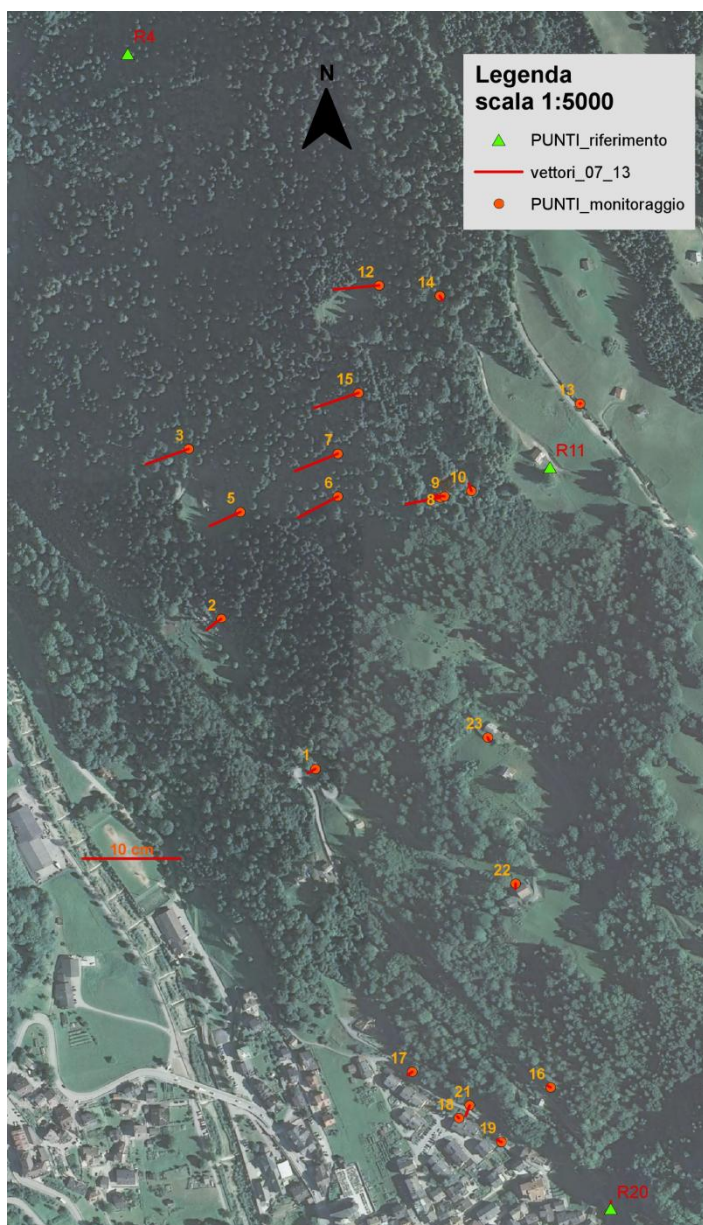


Figura 35: punti di monitoraggio e relativi spostamenti nella fase 3

La Figura 35 riporta in scala 1:5000 sull'ortofoto 2011 i punti del nuovo monitoraggio unitamente ai vettori di spostamento in scala 1:5.

Fase 4 Su richiesta del Servizio Prevenzione Rischi in accordo con il Comune, nell'agosto del 2013 è stato ulteriormente ampliato il monitoraggio della strada alla base del versante e immediatamente a monte delle abitazioni più danneggiate; le nuove misure vengono effettuate da una nuova stazione posta sul muro di sostegno a monte della strada (ST2) con tre nuovi riferimenti fissi, uno dei quali posto sul campanile della chiesa.

Il monitoraggio ottico, fino a questa fase, è quindi composto di 40 punti misurati da 2 stazioni. Tenendo conto delle direzioni di spostamento e della configurazione adottata per l'elaborazione dei dati, si possono raggruppare differenti punti con comportamento piuttosto omogeneo, come riportato nella *Tabella 11*.

Tabella 11: gruppi di punti con comportamento omogeneo

Zona	Punti
versante Zona Nord - alta	6-7-8-12-15
versante Zona Nord - bassa	2-3-5
versante a monte abitato	22-23-39

Spostamenti rilevati

La *Tabella 12* riporta le deformazioni medie misurate nella parte alta del versante distinte da quelle analoghe misurate nella parte bassa. Oltre alla deformazione media totale sono riportate le velocità medie in mm/anno misurate nei vari periodi.

Si nota anche dai grafici che il repentino cambiamento della velocità si è verificato dopo l'autunno 2013: c'è stata una notevole accelerazione, sia nella parte superiore che nella parte inferiore pari a circa tre volte le velocità registrate nel 2013.

Tabella 12: deformazioni rilevate

Zona	Punti	Deformazione media totale [mm]	Velocità 2012 [mm/anno]	Velocità 2013 [mm/anno]	Velocità 11/2013-04/2014 [mm/anno]	Velocità 04/2014-07/2014 [mm/anno]
versante Zona Nord – alta	6-7-8-12-15	189	27	56	157	148
versante Zona Nord – bassa	2-3-5	103	16	31	90	66

La corografia riportata in *Allegato 4* riporta i vettori di deformazione moltiplicati per 500, misurati sui vari capisaldi a monitoraggio della zona del versante più a Nord; nelle valutazioni va tenuto conto che i punti 22 e 23 vengono misurati a partire dal giugno 2013 e quindi con

oltre un anno e mezzo di ritardo rispetto ai precedenti. Risultano evidenti le maggiori deformazioni nelle parti mediana ed alta del versante. I grafici nella *Figura 36* e *Figura 37* riportano le deformazioni totali e la loro componente verticale nel tempo.

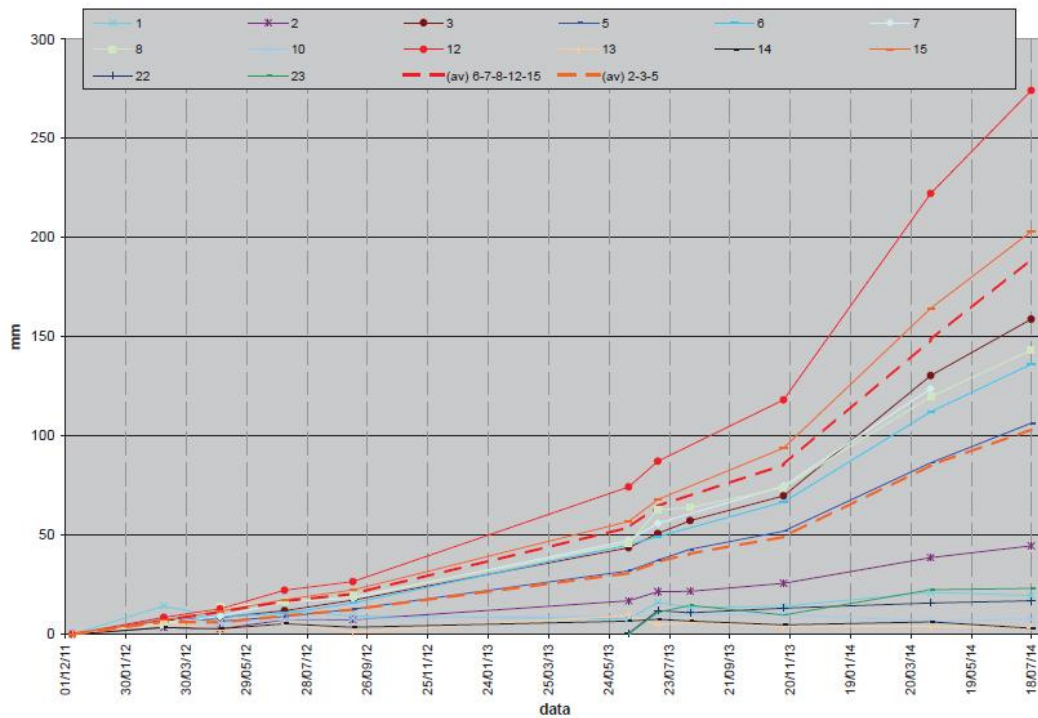


Figura 36: movimenti totali del versante da ST

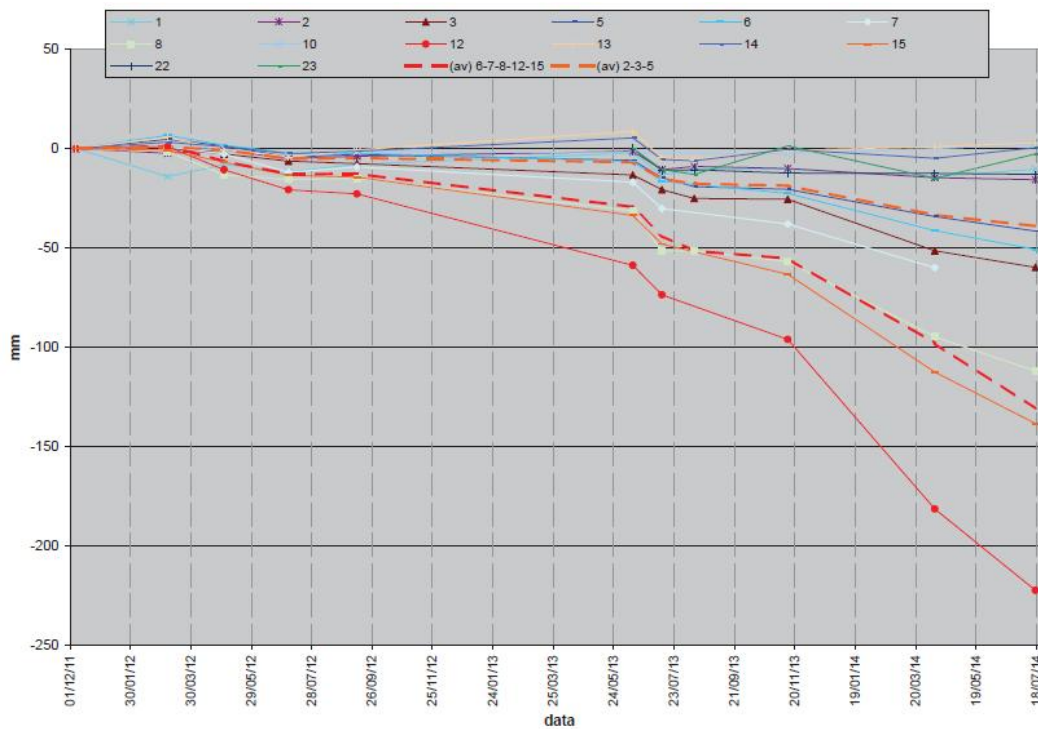


Figura 37: delta verticali del versante da ST

L'*Allegato 5* riporta i vettori misurati sui punti prossimi all'abitato moltiplicato per 1000 rispetto alla ortofoto di base. Gli spostamenti misurati fino ad ora sono pari a circa 70 mm e

quindi poco superiori all'incertezza della misura, la loro velocità risulta di circa 8 mm/anno e l'orientamento dei vettori è però assolutamente compatibile con la deformazione storica.

Il grafico in *Figura 38* riporta la sola componente planimetrica dei vettori, meno affetta da errori; appare improbabile o comunque poco significativo un assestamento verticale in quella zona, come confermano fino ad ora le misura effettuate; si nota l'aumento della deformazione dopo l'inizio della primavera 2014.

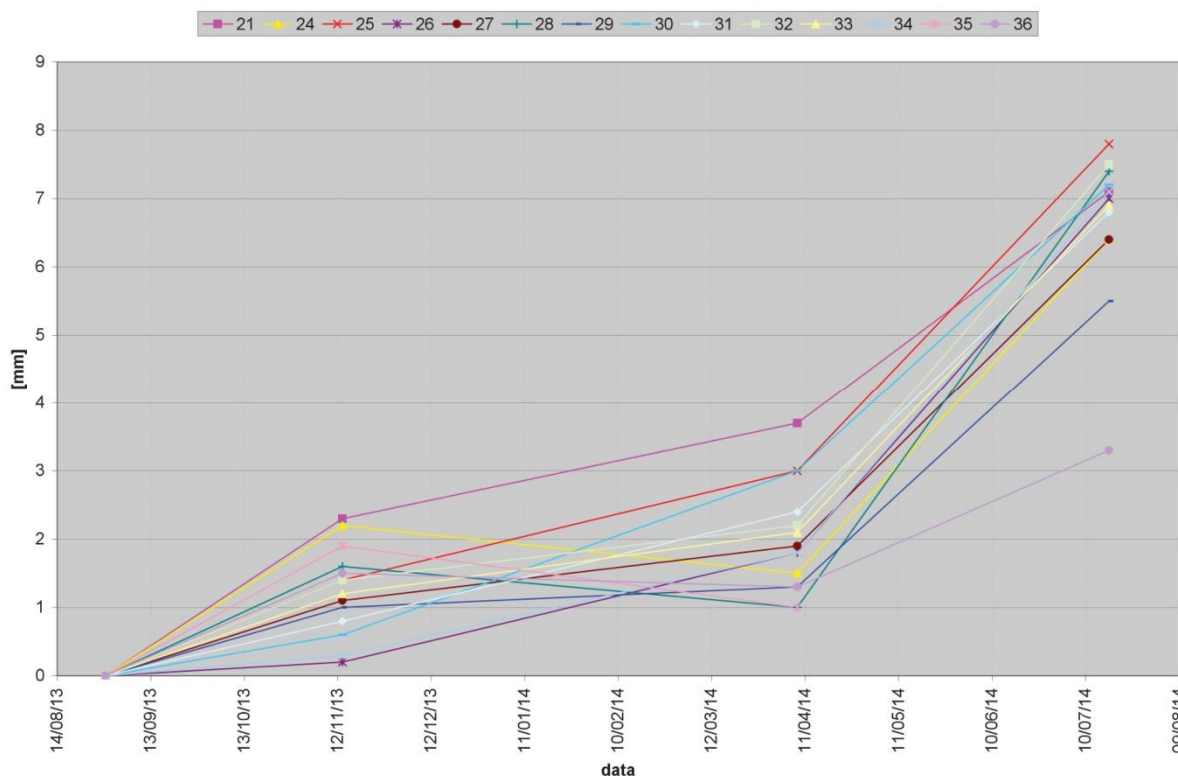


Figura 38: componente planimetrica dei vettori della zona dell'abitato di Siror

I punti 22 e 23, nella parte alta della zona Sud, hanno subito una deformazione totale certa compresa tra 17 e 23 mm da giugno 2013 a luglio 2014, con una velocità media di deformazione di circa 18 mm/anno; la direzione, prossima alla massima pendenza, conferma il movimento.

5.5 Interferometria satellitare

Il metodo dell'interferometria satellitare si basa sull'osservazione di un certo numero di bersagli radar, detti *Permanent Scatterers* PS, privi da variazioni temporali e spaziali. Questo significa che i PS conservano la stessa “firma elettromagnetica” in tutte le immagini radar che vengono effettuate al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche. Solitamente, i PS sono strutture già presenti al suolo con caratteristiche elettromagnetiche che non cambiano significativamente al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche e atmosferiche. Possono essere costruzioni di origine antropica (abitazioni, monumenti, fabbricati, strade, linee ferroviarie, antenne, tralicci, elementi metallici, etc.), oppure elementi naturali (affioramenti rocciosi, accumuli di detrito). Con questa metodologia è possibile misurare lo spostamento anche millimetrico di un PS rispetto al sensore del satellite effettuando un confronto delle riflessioni dello stesso oggetto in immagini differenti, considerando le differenze di fase delle onde riflesse. Questo spostamento può essere dovuto ad eventuali movimenti verticali. La *Figura 39* rappresenta schematicamente il funzionamento di questo metodo.

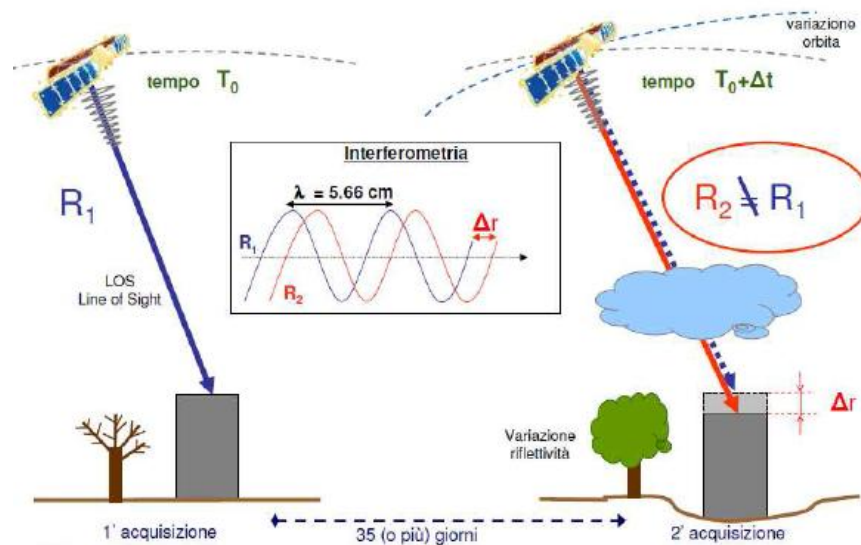


Figura 39: schema di funzionamento dell'interferometria satellitare

Per il versante sottoposto a monitoraggio sono state analizzate alcune serie storiche elaborate da immagini radar dei satelliti ERSAT (1992-2000) ed ENVISAT (2002-2010).

In *Figura 40* sono rappresentati tutti i PS che interessano la zona monitorata unitamente ai punti di monitoraggio topografico ottico. I colori diversi rappresentano le diverse velocità di deformazione espresse in mm/anno, come descritto nella legenda.

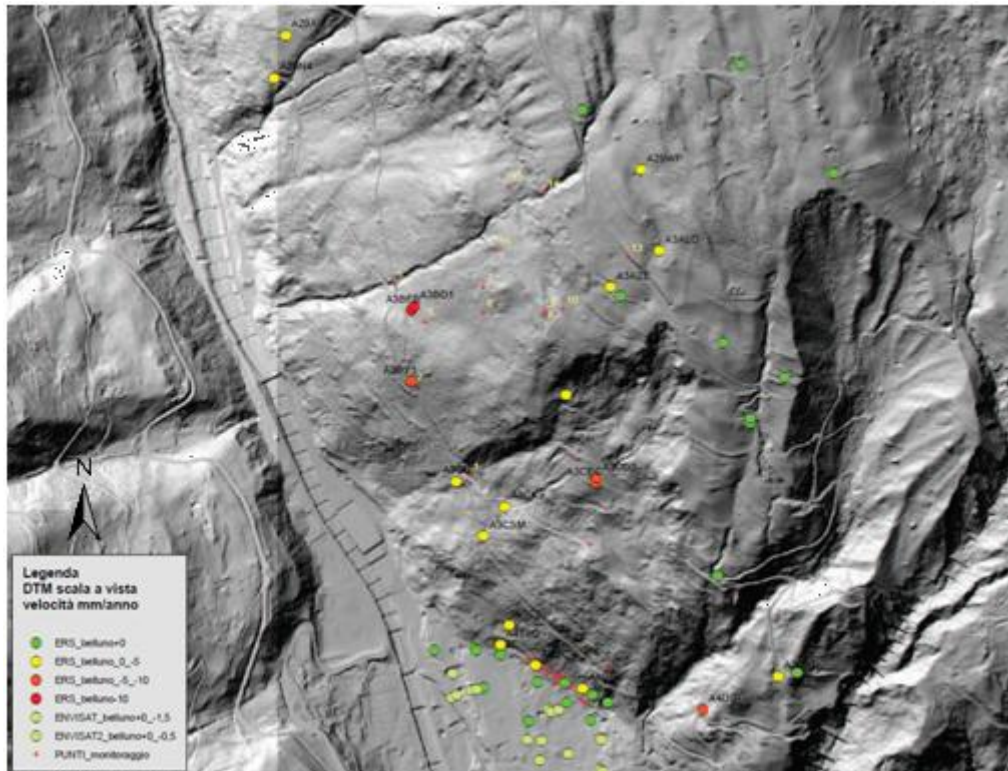


Figura 40: ubicazione dei Permanent Scatters e dei punti del monitoraggio ottico

In funzione dei movimenti rilevati si possono distinguere 5 aree differenti, rappresentate in Figura 41.

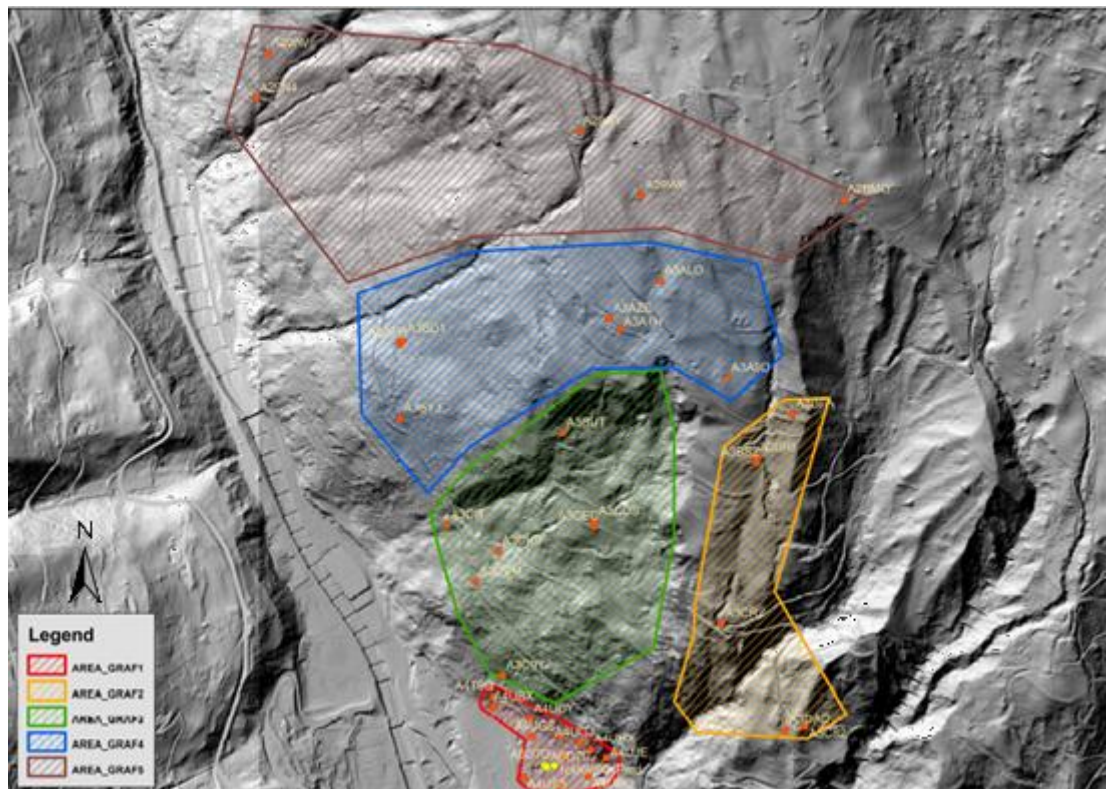


Figura 41: le cinque aree individuate per differente comportamento dei punti monitorati

Area 1: nella zona dell'abitato di Siror, come si evince dal grafico di *Figura 42*, i punti sono interessati da un piccolo movimento, con deformazioni verticali inferiori ai 2 mm/anno.

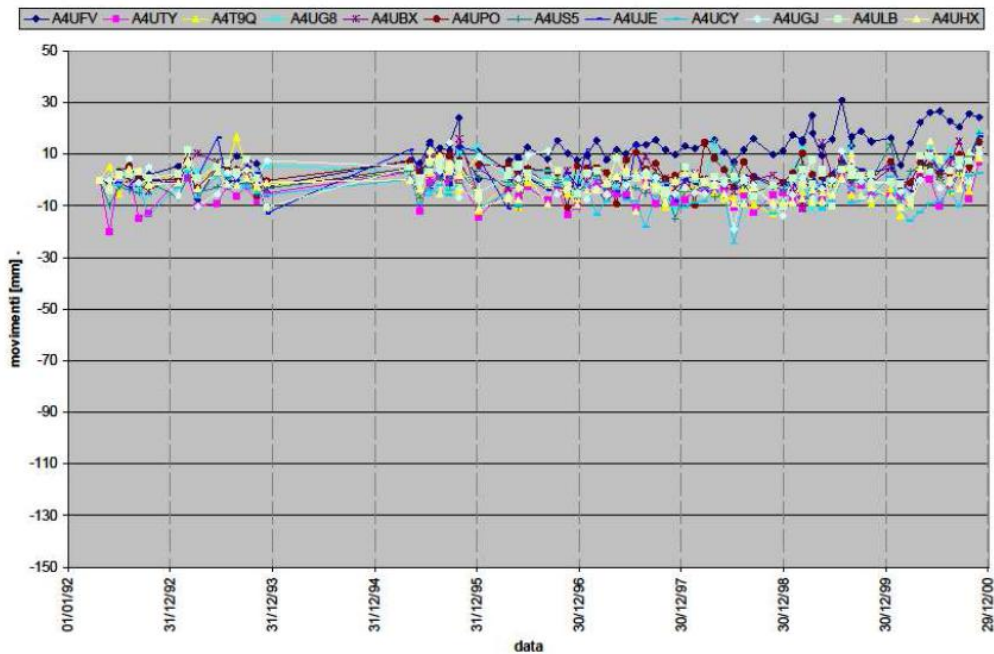


Figura 42: movimenti rilevati nell'Area 1

Area 2: nella zona situata più ad est, si può vedere che i punti sono interessati da movimenti significativi dell'ordine di 30 mm in 8 anni, circa 4 mm/anno (*Figura 43*).

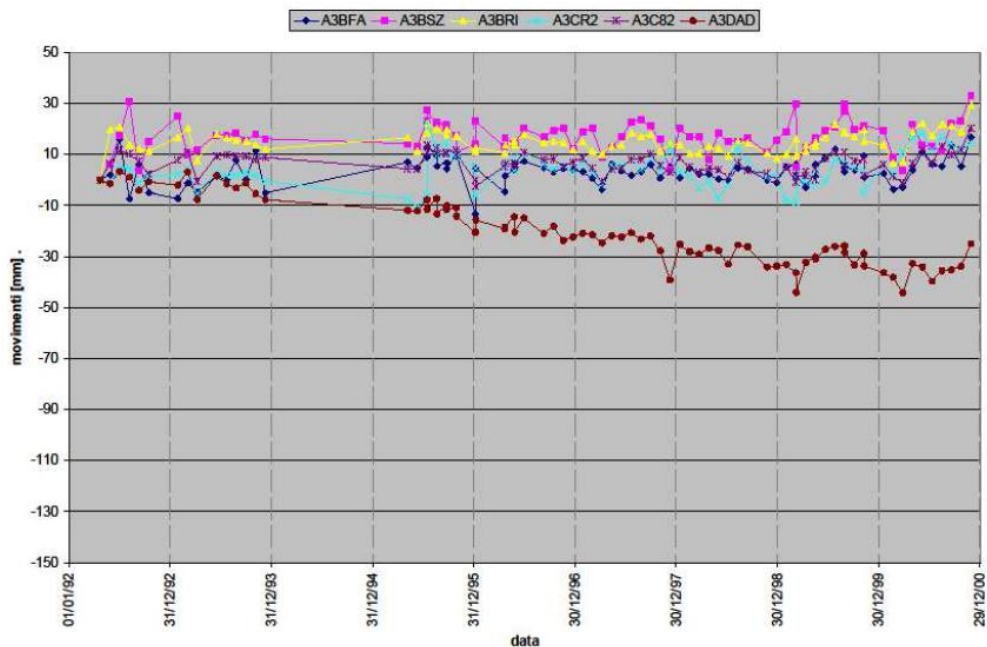


Figura 43: movimenti rilevati nell'Area 2

Area 3: nella zona situata subito a monte dell'abitato di Siror, come si nota nel grafico in *Figura 44*, i punti monitorati hanno avuto un continuo movimento nel tempo. I punti A3CEC e A3CDS hanno fatto registrare le deformazioni maggiori (circa 4 mm/anno).

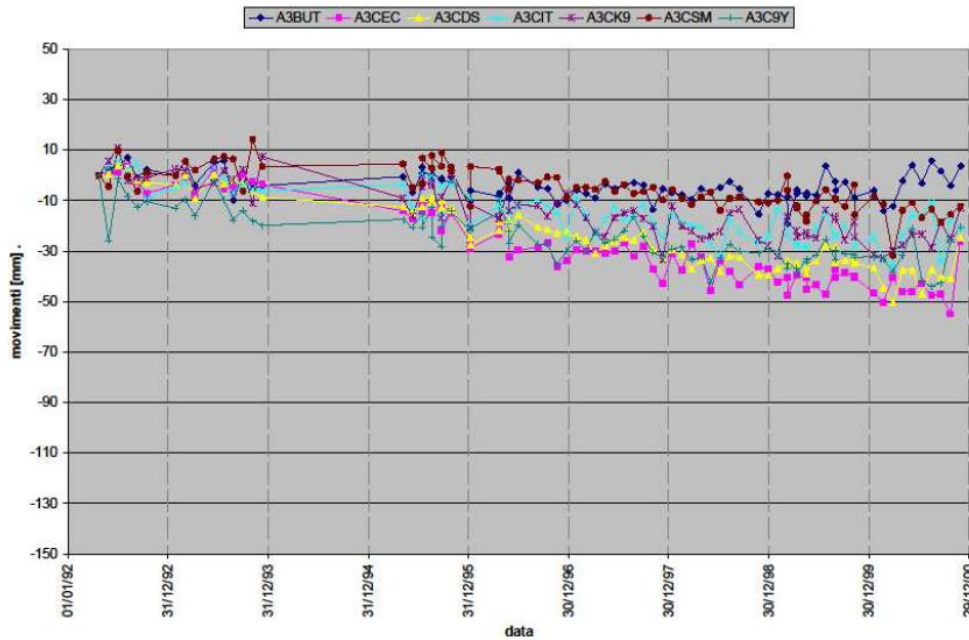


Figura 44: movimenti rilevati nell'Area 3

Area 4: in quest'area si possono notare comportamenti differenti tra i vari punti. I punti A3BFB e A3BD1 hanno fatto registrare una deformazione verticale di circa 130 mm in 8 anni (1992-2000), per una velocità media di circa 16 mm/anno. Il punto A3BY3 si è deformato verticalmente di 45 mm, per una media di circa 5 mm/anno (*Figura 45*).

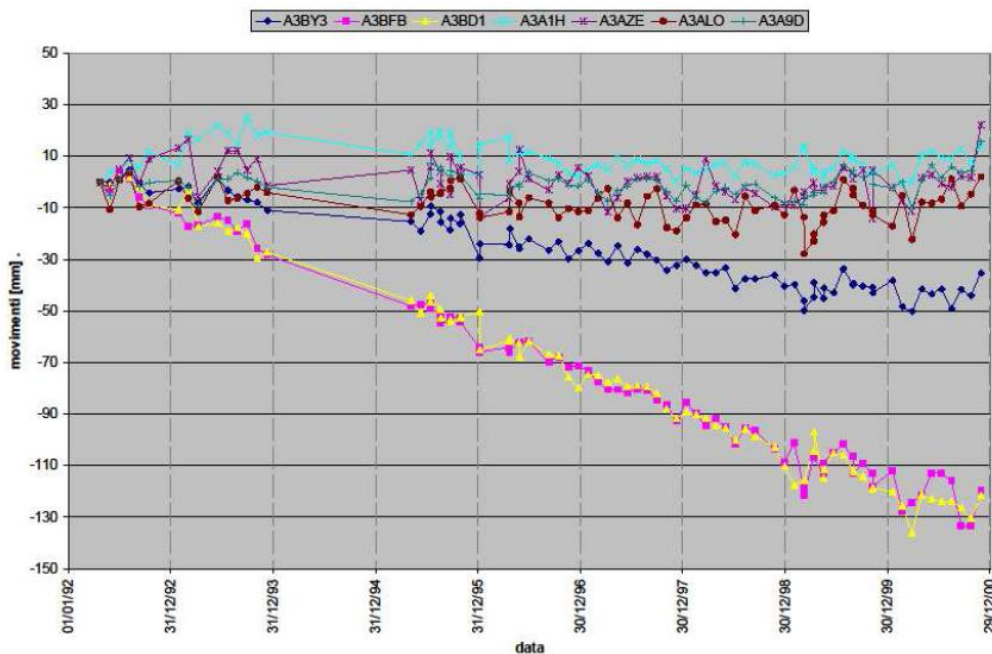


Figura 45: movimenti rilevati nell'Area 4

Area 5: i punti di quest'area (*Figura 46*), quella situata più a nord all'interno della zona monitorata, risultano pressoché stabili e non hanno riscontrato movimenti rilevanti (velocità \leq 1 mm/anno).

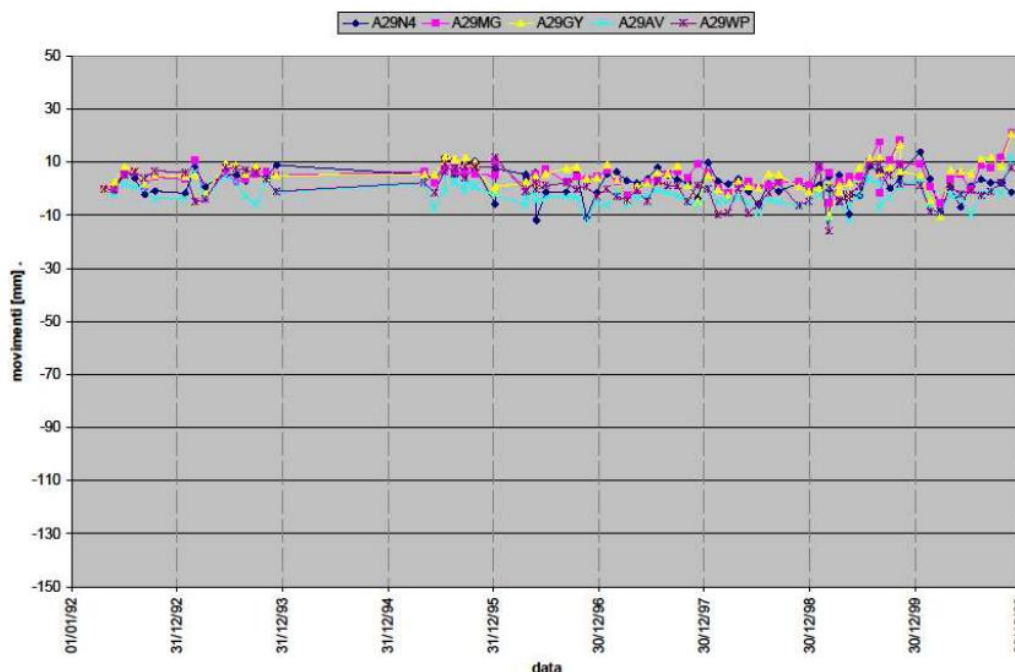


Figura 46: movimenti rilevati nell'Area 5

I due PS che hanno subito la maggiore deformazione nel periodo 1992-2000 (A3BD1 e A3BFB) si trovano nell'area 4, nei pressi del punto di monitoraggio ottico 5. La loro velocità di deformazione è stata, nel periodo coperto dai dati, di circa 16 mm/anno. Il PS A3BY3, corrispondente al punto ottico 2, ha subito nello stesso periodo un calo di circa 45 mm alla velocità di circa 5 mm/anno.

5.6 Confronto tra le diverse metodologie di monitoraggio

I dati raccolti ed analizzati con i diversi metodi concordano sul fatto che la zona in esame è soggetta a movimenti di diverse entità nelle differenti aree individuate.

La *Figura 47* riporta il grafico di confronto tra la deformazione misurata dall'interferometria satellitare nei punti A3BY3, A3BD1 e BFB con il delta verticale misurato con la stazione totale sui punti ottici 2 e 5 su un asse temporale espresso in numero di giorni.

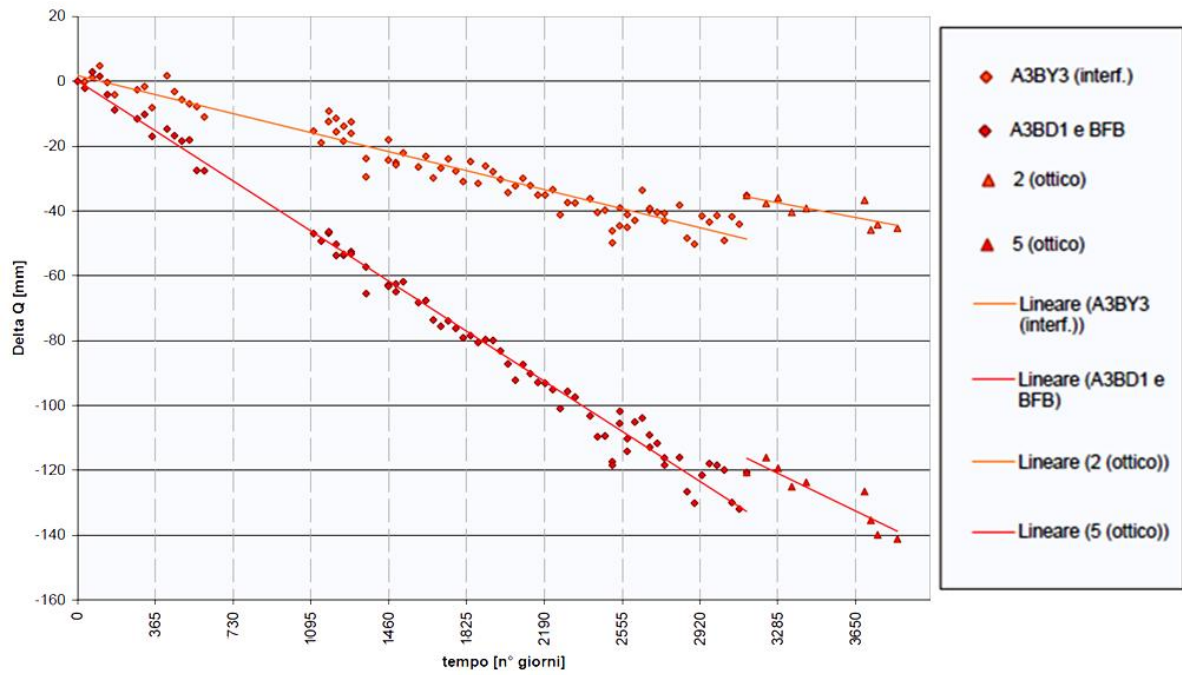


Figura 47: raffronto tra interferometria e misure ottiche

Nel grafico di *Figura 47* si osserva un andamento analogo tra le due serie di dati raccolte con metodi differenti.

6. Modellazione della frana

L'acquisizione di un modello che possa descrivere in maniera affidabile il comportamento di una frana è utile per progettare interventi di riduzione del rischio. Attualmente esistono diversi metodi per l'analisi di stabilità di pendii in materiali sciolti che possono essere suddivisi in:

- metodi dell'equilibrio limite globale;
- metodi dell'analisi limite;
- metodo degli elementi finiti.

Generalmente il metodo più impiegato è quello dell'equilibrio limite globale che ha il vantaggio di richiedere solo la conoscenza della resistenza al taglio del terreno e non il comportamento sforzi-deformazioni, ma che, proprio per questo, non restituisce dati sull'entità dei movimenti. Questi si possono individuare con metodi agli elementi finiti, che però richiedono la conoscenza del comportamento sforzi-deformazioni del terreno oltre alla resistenza al taglio. I metodi agli elementi finiti, però, non forniscono una misura diretta del grado di stabilità; utilizzando il metodo dell'equilibrio limite globale, invece, si può ottenere il coefficiente di stabilità.

Nel caso in esame, l'analisi di stabilità della frana è stata effettuata utilizzando un metodo all'equilibrio limite globale.

6.1 Analisi all'equilibrio limite

I metodi all'equilibrio limite si basano sull'ipotesi di un comportamento rigido perfettamente plastico del terreno in esame, cioè che esso non si deformi fino a quando non raggiunge la condizione di rottura, e che, in condizioni di rottura, la resistenza al taglio resti costante e indipendente dalle deformazioni accumulate. Da questa ipotesi ne deriva che:

- a) la rottura avviene lungo una superficie netta di separazione tra la massa in frana e il terreno stabile;
- b) la massa di terreno è perfettamente rigida;
- c) la resistenza lungo la superficie di separazione in condizioni di equilibrio limite è costante nel tempo, indipendente dalle deformazioni e dai movimenti della frana, e uguale alla resistenza al taglio;
- d) non si possono individuare le deformazioni precedenti la rottura, l'entità dei movimenti del blocco in frana, né la velocità del fenomeno.

Il metodo dell'equilibrio limite introduce un parametro, il fattore di sicurezza F_s , che indica il grado di stabilità di una frana. F_s è dato dal rapporto tra le forze stabilizzanti e quelle instabilizzanti che agiscono sulla massa di terreno:

$$F_s = \frac{\text{forze stabilizzanti}}{\text{forze instabilizzanti}}$$

La condizione di equilibrio limite si ha quando le forze agenti pareggiano quelle resistenti: lo stato tensionale medio lungo la superficie di scorrimento si trova sull'involuppo di rottura del terreno ed il versante si trova sul punto di collasso. Il fattore di sicurezza F_s è il valore che si associa alla superficie dove si ha una probabilità maggiore di innesco del movimento, detta superficie critica di scivolamento.

Per determinare la stabilità di un pendio si deve eseguire l'analisi per un certo numero di superfici di scorrimento, per individuare la posizione della superficie critica, ovvero quella con il minimo valore del coefficiente di sicurezza. Per fare questo si utilizzano procedure iterative, perché il numero di superfici di scorrimento potenziali è molto elevato e il calcolo del fattore di sicurezza per ciascuna di queste superfici è impegnativa.

Non è semplice stabilire i parametri di resistenza di un terreno. Infatti, non è sempre possibile esaminare in laboratorio i terreni nelle stesse condizioni in cui si trovano in natura: in laboratorio si studiano solo porzioni più o meno rimaneggiate del campione di terreno e questo modifica gli stati tensionali. A causa di queste incertezze nel lavoro di analisi in laboratorio, si preferisce utilizzare una procedura più efficace per la definizione dei parametri meccanici: la *back analysis*, un'analisi effettuata a ritroso. Questa metodologia prevede due momenti:

1. Si assumono i parametri di resistenza più probabili o i dati di laboratorio, se sono state effettuate analisi su campioni. In base alle condizioni più sfavorevoli dell'area si fissa la geometria e le condizioni freatiche del pendio.
2. Dopo aver svolto un'analisi iniziale, se F_s è pressoché 1, il modello è affidabile (si sta analizzando una situazione limite di instabilità), altrimenti si modificano i parametri meccanici del terreni fino a ottenere una condizione con $F_s \approx 1$.

Per ottenere un modello più preciso si possono utilizzare altri dati. Per esempio i dati ottenuti dagli inclinometri consentono di stabilire l'entità delle deformazioni in funzione della profondità e, di conseguenza, individuare la superficie di scorrimento. Poiché il metodo dell'equilibrio limite non permette di quantificare le deformazioni, i valori di spostamento che si ottengono da analisi topografiche o dagli inclinometri non sono molto utili.

I pendii naturali sono spesso caratterizzati da una morfologia irregolare e complessa e da una differenza evidente delle condizioni stratigrafiche e geotecniche, quindi per eseguire una verifica di stabilità si utilizza una procedura, il metodo dei conci, che permette di ottenere una soluzione approssimata.

Questo metodo prevede di ripartire la massa di terreno instabile in un certo numero (n) di conci verticali (*Figura 48*), un numero sufficientemente elevato da poter approssimare la linea curva di chiusura alla base di ogni concio con una linea retta, in modo da semplificare i calcoli.

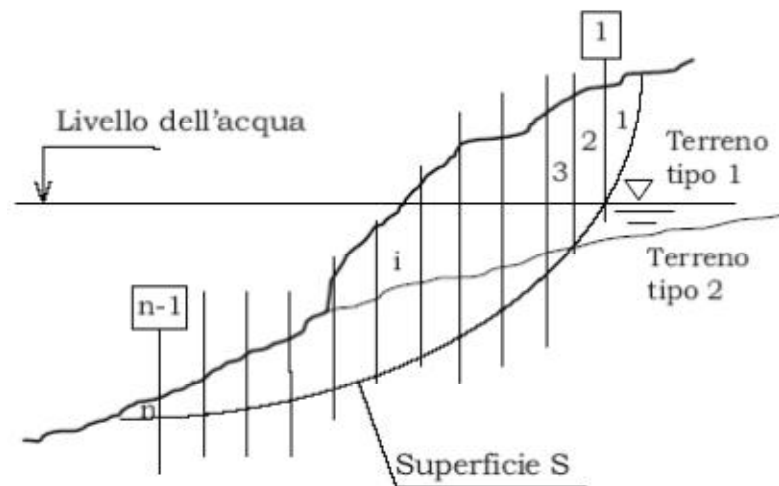


Figura 48: schema di suddivisione di un pendio in conci o strisce

Per ogni concio si valuta l'equilibrio statico per ognuno dei conci rispetto alla superficie di scorrimento prescelta: se questa vale per ogni concio, vale per l'intera massa in esame. La *Figura 49* rappresenta le forze che agiscono su un singolo concio.

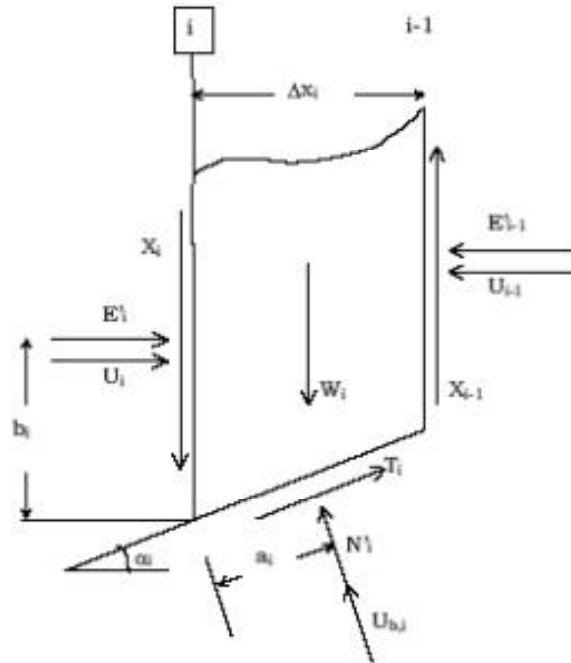


Figura 49: geometria del concio *i*-esimo e forze agenti su di esso

I simboli utilizzati nella *Figura 49* rappresentano:

α_i = angolo di inclinazione della corda dell'arco di cerchio alla base sull'orizzontale;

Δx_i = larghezza del concio;

W_i = peso del concio;

E_{0i} e X_i = componente normale e tangenziale delle forze interconcio;

b_i = quota di applicazione di E_{0i} rispetto alla superficie di scorrimento;

U_i = risultante delle pressioni interstiziali sulla superficie di separazione fra i concii *i* ed *i+1*;

N_{0i} e T_i = componente normale e tangenziale della reazione di appoggio del concio sulla superficie di scorrimento;

a_i = distanza del punto di applicazione di N_{0i} dallo spigolo anteriore;

U_{bi} = risultante delle pressioni interstiziali alla base del concio.

Il sistema di equazioni per l'equilibrio statico è indeterminato perché il numero delle equazioni ($3n$) è inferiore a quello delle incognite del ($5n-2$); per renderlo determinato bisogna scegliere almeno ($2n-2$) variabili, solitamente le forze di interconcio, a cui assegnare dei valori. Esistono metodi diversi per risolvere un problema di questo tipo:

- Metodi non rigorosi: si assegna un valore ad un numero di variabili superiore al necessario, e quindi non si utilizzano tutte le equazioni del sistema. Es. metodi di Fellenius, Bishop semplificato, Janbu semplificato.
- Metodi rigorosi: si assegna un valore solo ad un numero necessario di variabili e le soluzioni soddisfano tutte le tre condizioni di equilibrio (forze nelle due direzioni ortogonali e momenti). Es. metodi di Morgenstern & Price, Spencer, Sarma, General Limit Equilibrium method.

Storicamente sono stati sviluppati per primi metodi non rigorosi, che potevano portare ad una soluzione anche con calcoli manuali, ma che non davano risultati molto accurati. Il crescente utilizzo del computer per l'esecuzione di calcoli e la disponibilità di software specializzati ha reso possibile lo sviluppo di metodi rigorosi che consentono di eseguire analisi di stabilità più precise e realistiche. Per questo motivo si preferiscono metodi rigorosi, mentre l'utilizzo di metodi non rigorosi è limitato a verifiche speditive o in aiuto di altre indagini.

È importante evidenziare come in ogni caso i risultati di un'analisi di stabilità, per quanto rigoroso sia il metodo selezionato, siano legati all'esatta comprensione del problema, alla corretta scelta dei parametri geotecnici e alla competenza ed esperienza di chi realizza l'analisi.

6.2 Il metodo di Morgenstern & Price

Nella frana oggetto di studio, il calcolo della stabilità è stato eseguito utilizzando il metodo di Morgenstern & Price.

Nel metodo di Morgenstern and Price (Morgenstern e Price, 1965) la massa in frana viene divisa in un numero ridotto di conci, che possono essere molto più grandi di quelle degli altri metodi dei conci, che a loro volta vengono suddivisi in strisce verticali di larghezza infinitesima (larghezza della striscia $\rightarrow 0$). Per ognuna di queste strisce infinitesime vengono risolte le equazioni di equilibrio delle forze e dei momenti, considerando sia la componente normale (E) che quella di taglio (X) delle forze interconci. Per questo motivo il metodo di Morgenstern & Price è un metodo rigoroso.

6.3 Modellazione preliminare della frana di Siror

Per garantire un miglior controllo del fenomeno e per suggerire eventuali nuove modalità di monitoraggio è stato creato un modello della frana.

Si è partiti da un'analisi preliminare di 4 profili del versante monitorato allo scopo di individuare le possibili zone soggette a movimenti. Da questo esame si passerà poi ad uno studio più approfondito della cinematica mediante il software Slope.

Dopo aver delineato la possibile superficie di frana (di colore rosso in *Figura 50*) sul DEM, sono state tracciate 4 sezioni rappresentative. Come si può vedere in *Figura 50*, le sezioni 1, 2 e 3 sono tra loro parallele, con inclinazione pari a 200° rispetto al nord (parallelo all'asse principale della superficie di scivolamento), ed equidistanti. L'inclinazione di 200° è stata ricavata mediante la media degli spostamenti rilevati dagli inclinometri. La sezione 4 è approssimativamente la linea che ripartisce a metà il versante.

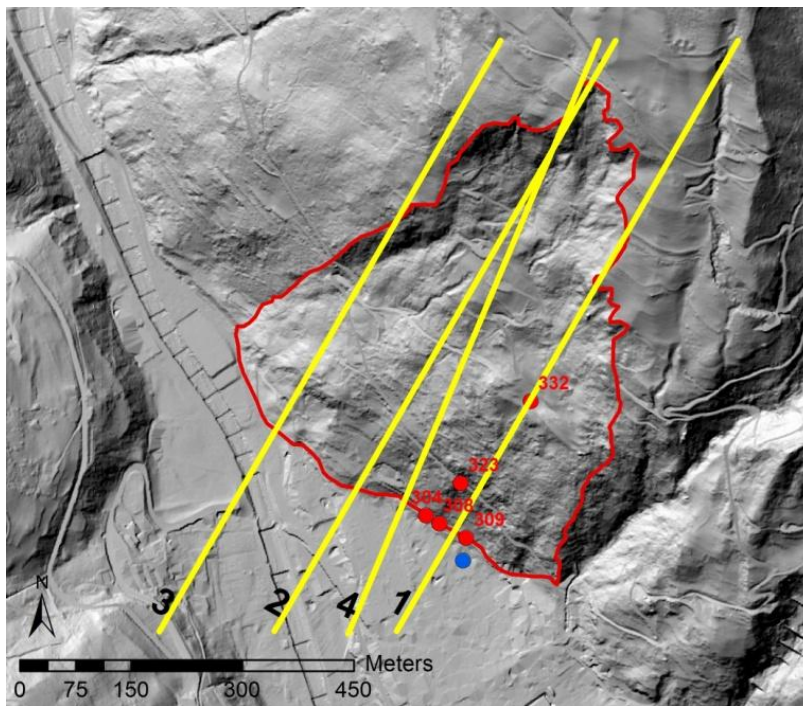


Figura 50: sezioni rappresentative del versante a monte di Siror

Nei grafici di *Figura 51* sono rappresentati i profili delle 4 sezioni scelte per l'analisi estratti mediante il software ArcGis. In rosso sono disegnate le superfici di scivolamento ipotizzate per la frana di Siror. Nei profili si può notare il movimento che ha causato lo scivolamento a valle del corpo di frana, creando una scarpata a monte.

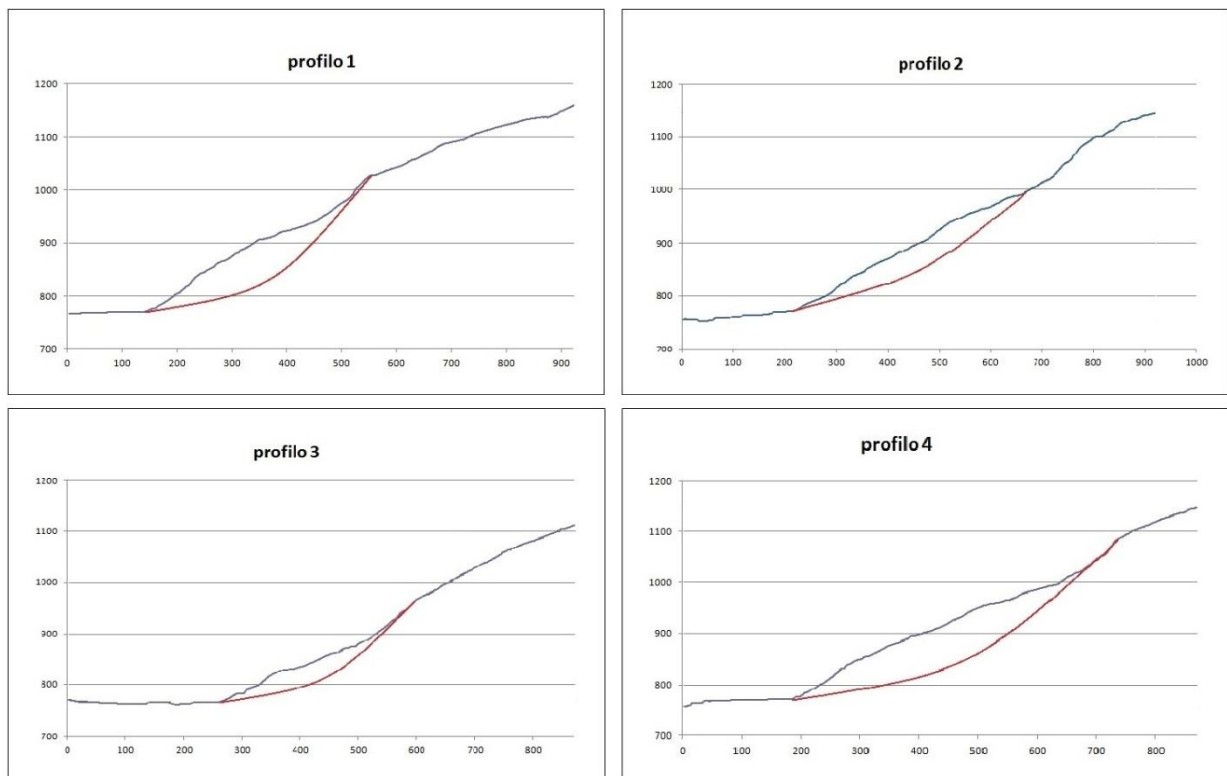


Figura 51: profili e superfici di scivolamento ricavate dall'analisi preliminare

6.4 Creazione del modello con il software Slope

Dopo l'indagine preliminare, è stata condotta un'analisi di stabilità della frana utilizzando *Slope*, software per l'analisi dell'equilibrio limite per pendii in terra e in roccia sviluppato dalla *Geostru*. Questo software, utilizzando metodi dell'equilibrio limite, permette la costruzione di un modello 2D del movimento franoso, lungo le sezioni prese in esame.

Per l'inserimento dei dati nel programma e per la costruzione del modello è stata seguita la procedura descritta in seguito.

a) Attribuzione delle caratteristiche geotecniche.

Il modello geologico del sottosuolo lungo le sezioni, è stato ricostruito utilizzando:

- le stratigrafie dei sondaggi 4434, 4433, 4435;
- i dati degli inclinometri (304, 308, 309, 323, 332), necessari per impostare la profondità della superficie di scivolamento;
- i dati del piezometro posto nell'abitato di Siror.

Nel software *Slope*, lungo il profilo del versante, è stata riportata la posizione degli inclinometri ai quali è stata assegnata una lunghezza pari alla profondità di scivolamento rilevata, in modo da applicare dei vincoli in fase di calcolo. Nei profili è stata inserita anche la

superficie della falda, rilevata mediante piezometro e durante le operazioni di lettura degli inclinometri.

Dal punto di vista stratigrafico è stato possibile distinguere 2 diverse unità litostratigrafiche:

- prima unità: ghiaia di natura calcarea con ciottoli e sabbia con limo;
- seconda unità: fillade fratturata (*bedrock*).

I limiti tra le varie unità litostratigrafiche sono stati quindi inseriti in *Slope* ottenendo le sezioni schematiche riportate nella *Figura 52*.

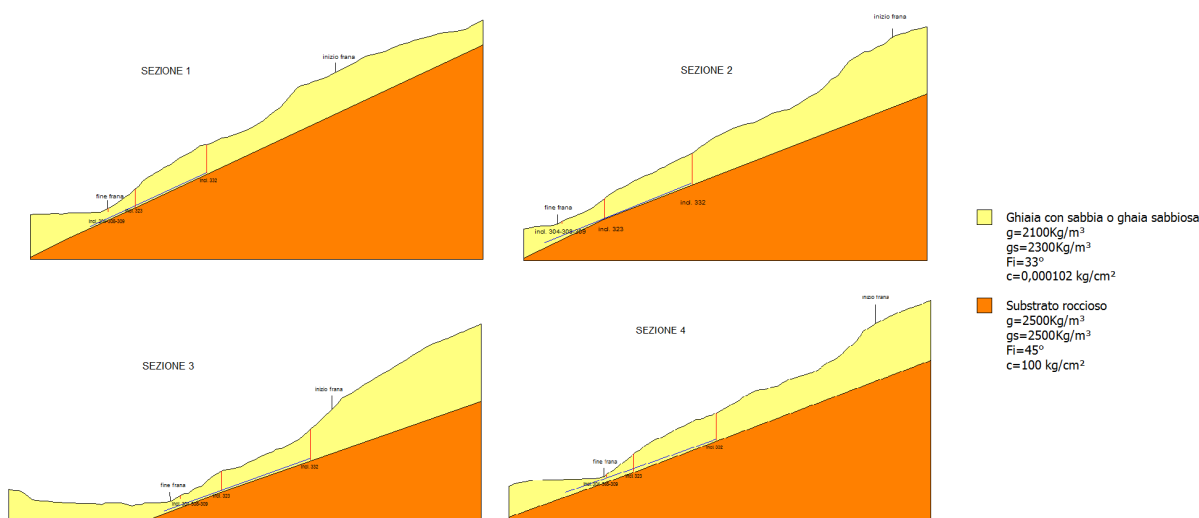


Figura 52: le 4 sezioni rappresentative con le relative stratigrafie

I parametri geotecnici attribuiti alle unità litostratigrafiche sono stati definiti con la *back analysis* e sono riportati nella *Tabella 13*. L'angolo di resistenza al taglio di picco dello strato superiore è stato posto pari a 33° , a differenza di quanto affermano le prove geotecniche ($26,4^\circ$), in modo da ottenere nell'analisi di stabilità un F_s prossimo all'unità.

Tabella 13: parametri geotecnici delle unità litostratigrafiche attribuiti con il software *Slope*

Nr.	DB	Peso unità di volume (Kg/m ³)	Peso saturo (Kg/m ³)	Coesione (kg/cm ²)	Coesione non drenata (kg/cm ²)	Angolo resistenza al taglio picco (°)	Angolo resistenza a al taglio residuo	Permeabilità	Dati aggiuntivi ...	Texture ...	Descrizione
1		2100	2300	0,000102		33		Permeabile			Ghiaia con
2		2500	2500	100		45		Impermeabile			Substrato

b) Determinazione della superficie di rottura

Dopo aver deciso di eseguire l'analisi di stabilità con il metodo di Morgenster & Price, *Slope* consente di scegliere il tipo di superficie di scivolamento tra una superficie cilindrica o di forma generica. In questo caso è stata scelta una superficie cilindrica perché è la forma che meglio approssima la superficie di scivolamento ricostruita sulla base dei dati forniti dagli inclinometri.

Per il calcolo è stata scelta una maglia dei centri di rotazione (*Figura 53*) costituita da 900 celle, 30 in direzione X e 30 in direzione Y. La posizione della maglia è stata fatta variare fino ad ottenere la superficie di scivolamento critica, ovvero quella cui corrisponde il minore coefficiente di sicurezza ($F_s \approx 1$).

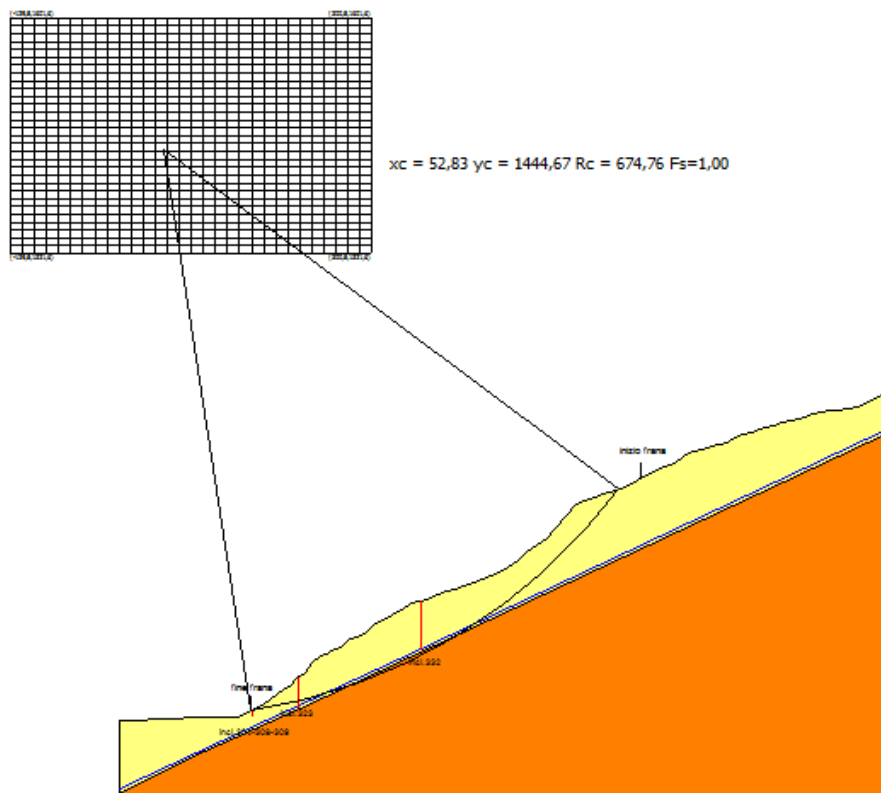


Figura 53: maglia dei centri di rotazione costituita da 900 celle

c) Risultati dell'analisi del pendio

La frana analizzata (vedi *Figura 54*) risulta avere una superficie di $210'500 \text{ m}^2$ con una larghezza a valle (*a*) di circa 500 m ed un'estensione lungo il versante (*b*) di 610 m.

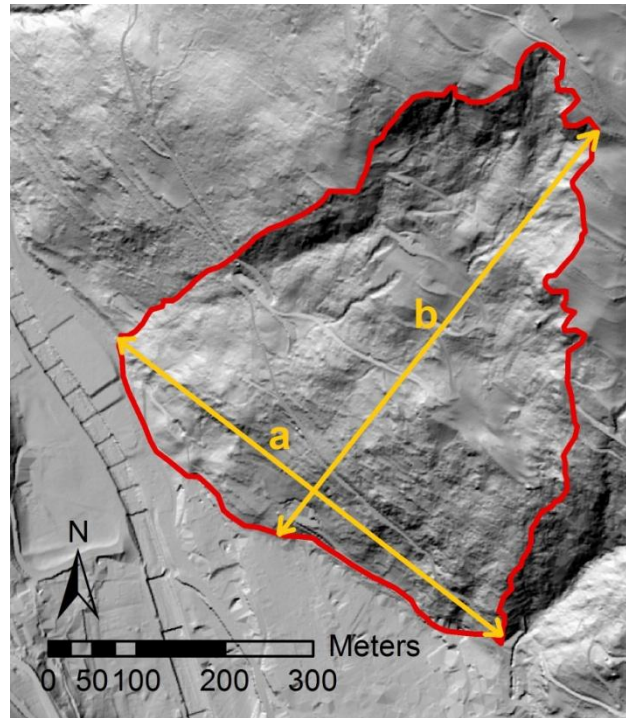


Figura 54: dimensionamento della frana

A questo punto, per ognuno dei profili analizzati, sono stati imposti alcuni vincoli, ovvero punti certi come il limite tra la massa in movimento e il pendio stabile, ad esempio punti di scivolamento rilevati con l'inclinometro o punti di inizio o fine frana rilevati mediante il DTM. Per tentativi è stata posizionata la maglia dei centri fino ad ottenere una superficie di scivolamento con F_s prossimo all'unità.

Profilo 1

Per ottenere la superficie di scivolamento di questo profilo sono stati imposti due vincoli: il punto di fine della frana e l'inclinometro 332. La *Figura 55* mostra la superficie di scivolamento ottenuta con *Slope*, avente $F_s = 1,002$.

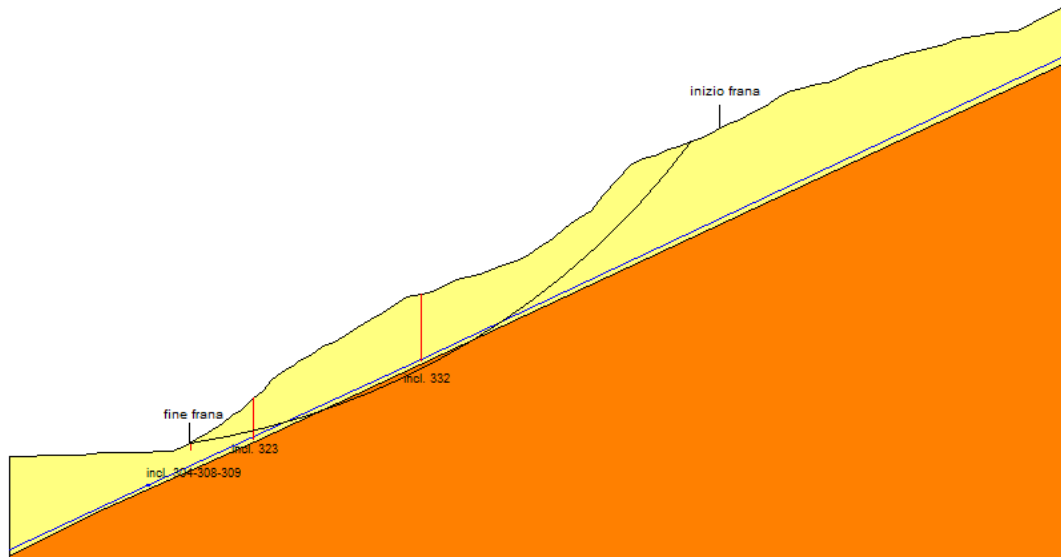


Figura 55: superficie di scivolamento del profilo 1

Profilo 2

Per ottenere la superficie di scivolamento di questo profilo sono stati imposti due vincoli: il punto di fine della frana e l'inclinometro 323. La *Figura 56* mostra la superficie di scivolamento ottenuta con *Slope*, avente $F_s = 1,083$.

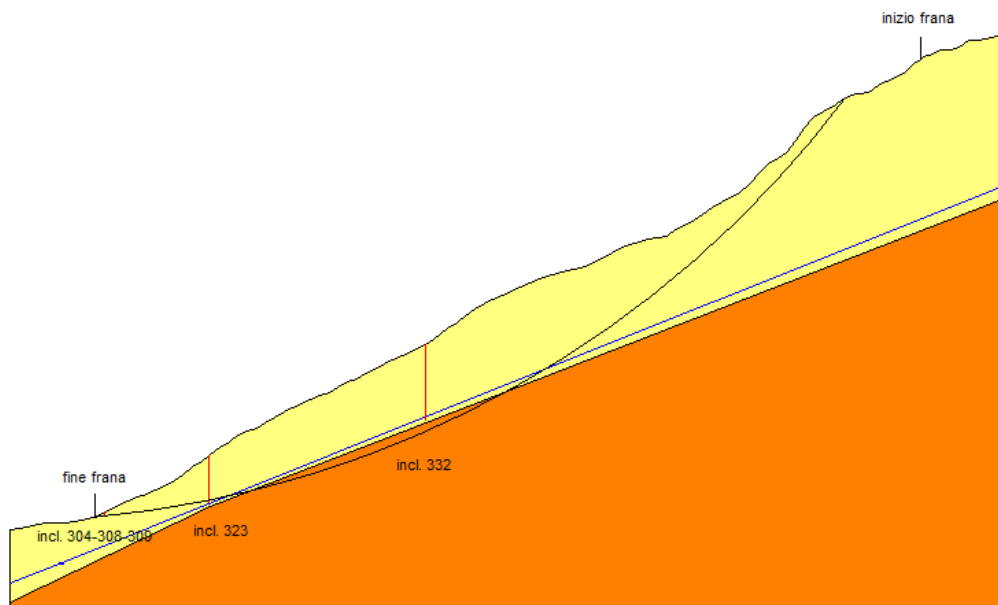


Figura 56: superficie di scivolamento del profilo 2

Profilo 3

Per ottenere la superficie di scivolamento di questo profilo sono stati imposti due vincoli: il punto di fine della frana e l'inclinometro 323. La *Figura 57* mostra la superficie di scivolamento ottenuta con *Slope*, avente $F_s = 1,020$.

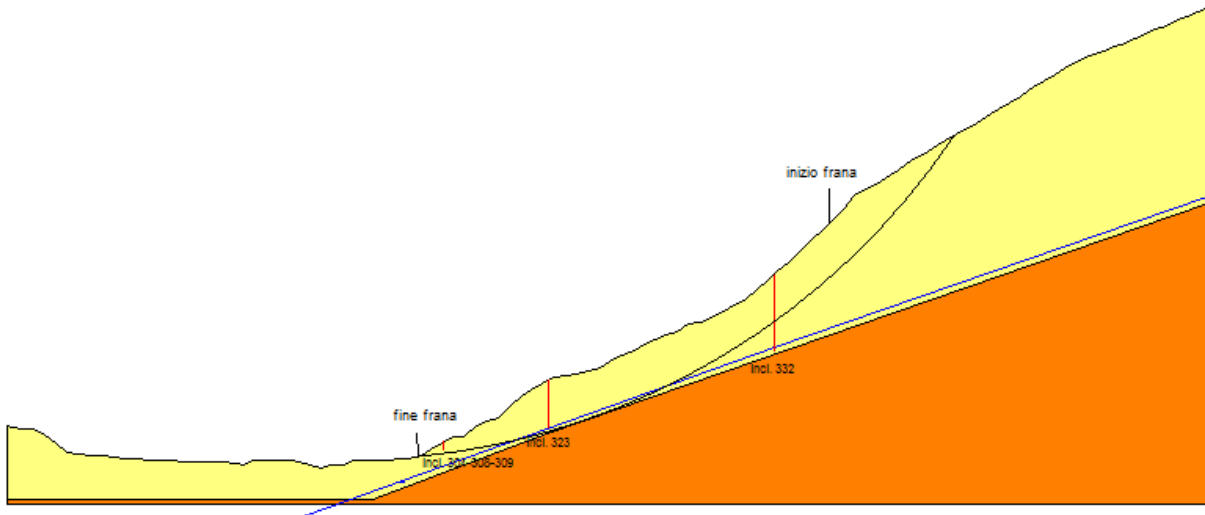


Figura 57: superficie di scivolamento del profilo 3

Profilo 4

Per ottenere la superficie di scivolamento di questo profilo è stato imposto un solo vincolo: l'inclinometro 332. La *Figura 58* mostra la superficie di scivolamento ottenuta con *Slope*, avente $F_s = 1,082$.

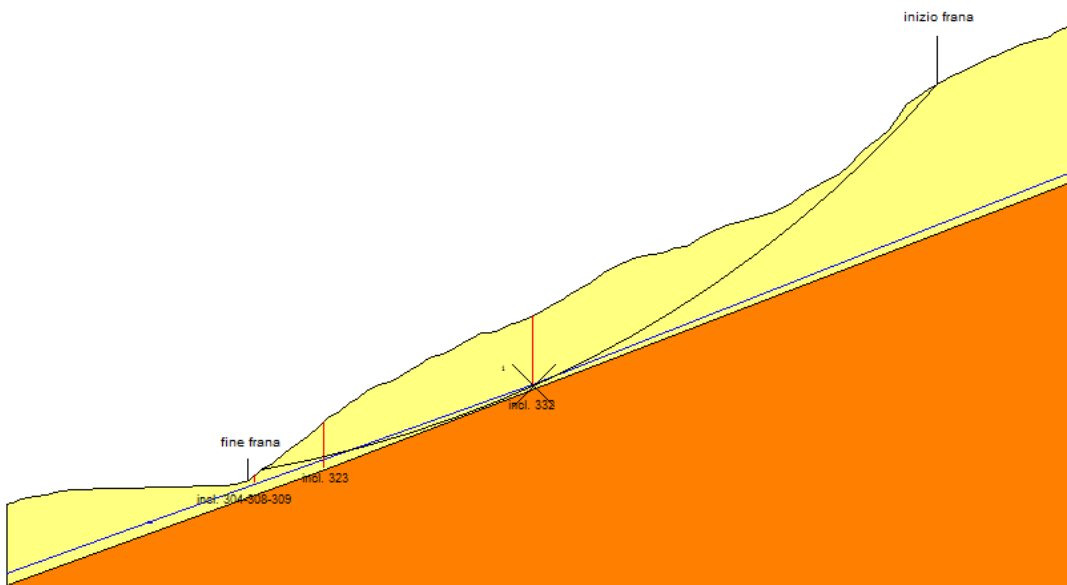


Figura 58: superficie di scivolamento del profilo 4

7. Proposte di possibili interventi

7.1 Gestione delle acque profonde per il controllo del movimento franoso

In seguito allo studio effettuato è emersa la necessità di verificare la posizione delle eventuali acque presenti in eccesso sul versante. Per effettuare delle considerazioni relative alla gestione delle acque profonde è stato estratto, mediante il software ArcGIS, il reticolo idrografico avente un'area soglia di 10'000 m² (Figura 59).

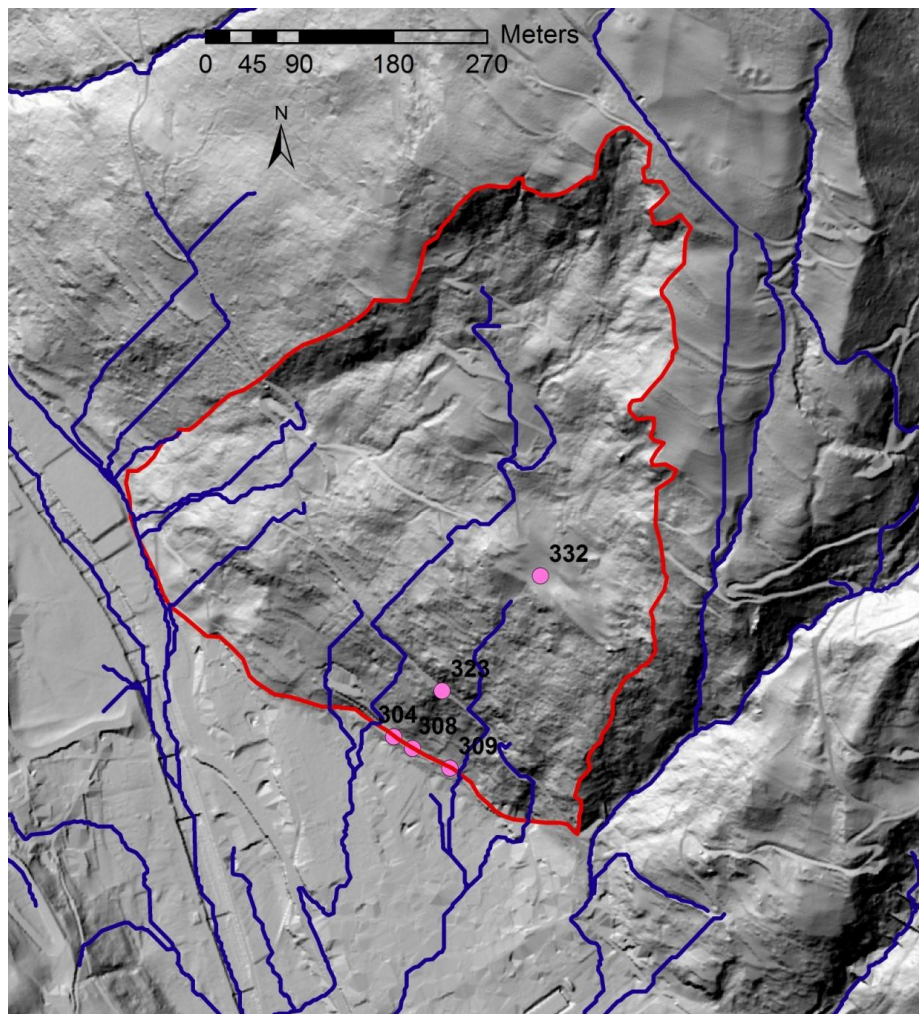


Figura 59: reticolo idrografico della zona studiata

Si può notare la presenza di due canali principali lungo la superficie interessata alla frana, entrambi passanti al di sotto dell'abitato di Siror. Fra gli interventi possibili per intervenire sui fenomeni di dissesto sono di notevole importanza quelli atti a eliminare o ridurre la presenza di acqua nel sottosuolo. Sono rilevanti anche quelli finalizzati alla riduzione o eliminazione della circolazione idrica superficiale che comunque, se non controllata, può andare ad accrescere l'instabilità della massa in scivolamento ammolando il terreno.

Si propone di effettuare delle opere di drenaggio per cercare di allontanare l'eccesso di acqua dal terreno contenendo quindi i fenomeni di instabilità.

Il quantitativo di acqua presente all'interno di un terreno dipende:

- dalla sua stratigrafia;
- dalle sue caratteristiche meccaniche;
- dal bilancio tra afflusso (portata entrante) e deflusso (portata uscente). Solitamente l'afflusso è dato dall'infiltrazione, legata alle precipitazioni, mentre il deflusso alla portata di filtrazione ed all'evapotraspirazione.

Lo smaltimento dell'acqua di falda dipende soprattutto dalla conduttività del terreno e dalle condizioni al contorno, come la presenza di corpi d'acqua.

I principali problemi legati alla realizzazione delle opere di drenaggio sono legati alla profondità di lavoro (dipendente dalle oscillazioni di falda) e alla difficoltà di praticare interventi di mantenimento della loro funzionalità (dipendente dal movimento del terreno e dalle possibili otturazioni e deviazioni del percorso imposte dai drenaggi stessi).

Gli interventi di drenaggio si possono suddividere in due gruppi principali:

- superficiali: opere di regimazione delle acque superficiali e di sistemazione del pendio. Sono gli interventi che necessitano di maggiore manutenzione ma sono anche i più facili nell'installazione;
- profondi: necessitano di opere e di attrezzature più complesse per la loro installazione e sono molto costosi. A fronte di questi svantaggi assicurano però una maggiore efficacia nella stabilizzazione di versanti in frana.

Per valutare l'efficacia di un sistema di drenaggio è buona norma integrare il sistema di controllo delle acque con dei piezometri.

Nel versante in esame si consiglia la realizzazione di 2 pozzi drenanti per gestire il deflusso profondo. Sono strutture complesse e necessitano di attrezzature specifiche per la perforazione del terreno. La localizzazione dei pozzi drenanti è proposta in *Figura 60*.

È anche possibile realizzare, in corrispondenza dei drenaggi profondi, due percorsi di controllo delle acque superficiali (canalette) in modo da ridurre l'acqua che si infila formando deflusso profondo.

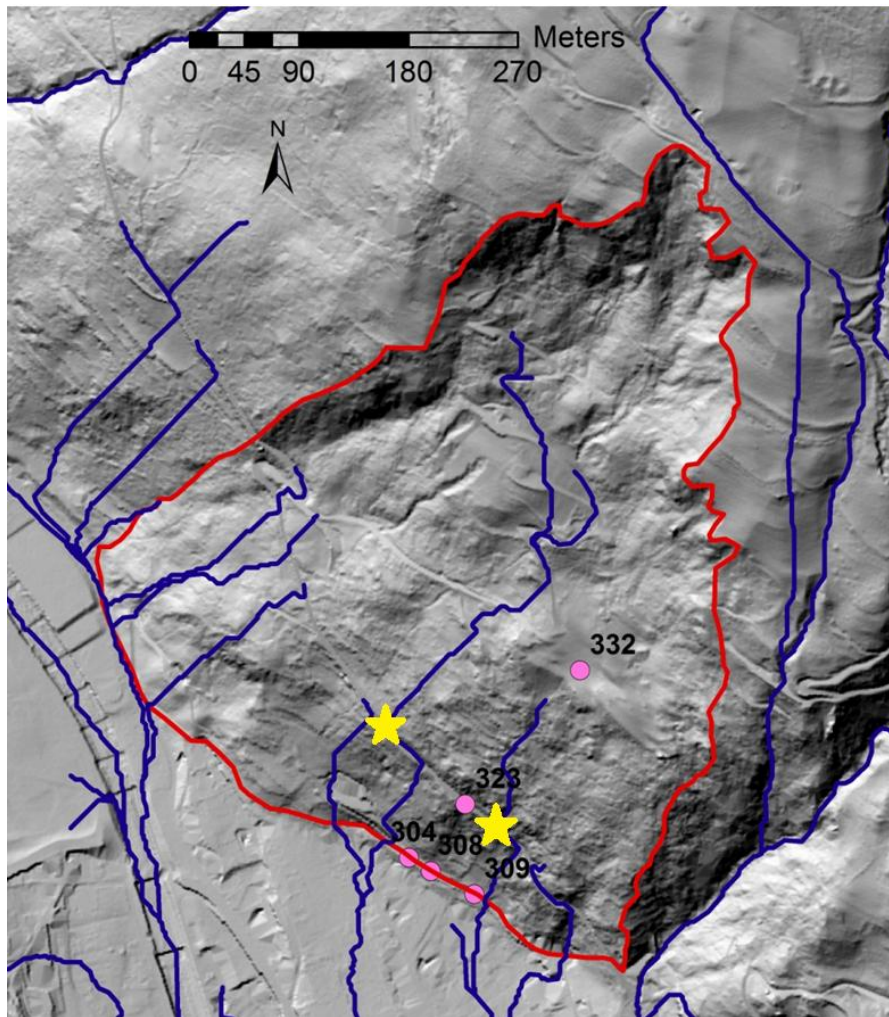


Figura 60: reticolo idrografico con elementi per il drenaggio proposti (stelle gialle)

7.2 Nuovi elementi per il monitoraggio

Per poter capire meglio come evolverà il movimento in esame viene proposto di integrare, al sistema di monitoraggio già esistente, nuovi elementi. Visto che il monitoraggio per ora si è concentrato principalmente a ridosso dell'abitato di Siror, risulta molto utile estenderlo all'intero versante. Le due tipologie di elementi per il monitoraggio del movimento qui proposte sono: sondaggi stratigrafici e inclinometrici.

In ogni punto proposto (*Figura 61*) viene posizionato un inclinometro e viene estratta la carota per la lettura della stratigrafia. Questa indagine permette di stabilire il substrato interessato dal movimento e l'entità dello spostamento lungo tutto il versante.

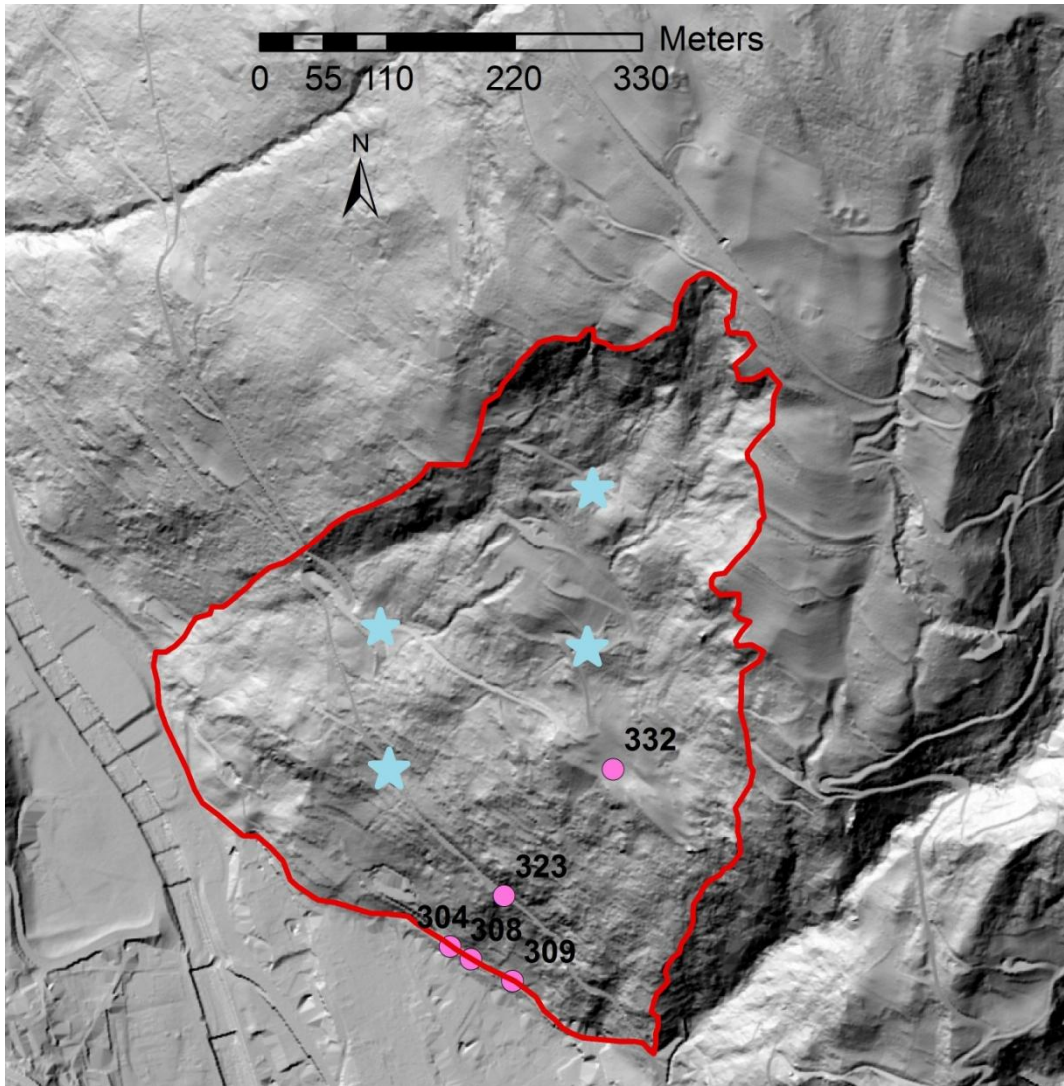


Figura 61: nuovi elementi per il monitoraggio proposti (stelle azzurre)

8. Conclusioni

Obiettivo principale del presente lavoro di tesi è stato lo studio dei movimenti franosi che gravano sul versante soprastante l'abitato di Siror, causando danni alle case e costituendo una seria fonte di pericolo.

Dall'analisi della zona dal punto di vista geologico e strutturale, grazie alle relazioni tecniche prodotte dal Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento, si evince la presenza di depositi alluvionali di fondovalle su cui si colloca la maggior parte dell'abitato di Siror e depositi di prevalente origine gravitativa lungo i versanti montuosi.

Si osserva un'ottima corrispondenza tra evidenze stratigrafiche e ubicazione della superficie di scivolamento che si pone in corrispondenza del passaggio tra depositi gravitativi e depositi alluvionali.

Le indagini geognostiche e geofisiche realizzate sul versante a monte delle abitazioni mostrano la presenza di un movimento gravitativo in atto, con uno spostamento costante nel tempo di circa 8 mm/anno.

Le indagini geofisiche e le evidenze sul terreno fanno ritenere che una componente del fenomeno di versante sia la presenza della circolazione idrica che, come emerge dall'indagine ERT, si colloca in prossimità del limite tra i differenti depositi quaternari.

Il modello del fenomeno è stato realizzato attribuendo alle unità litostratigrafiche i parametri geotecnici definiti con la *back analysis*. L'analisi di stabilità è stata condotta con il software *Slope*, utilizzando il metodo di Morgenster & Price. I profili rappresentati in *Figura 55*, *Figura 56*, *Figura 57*, *Figura 58* mostrano la superficie di scivolamento ottenuta.

La frana analizzata risulta avere una superficie approssimativa di 210'500 m² con una larghezza a valle di circa 500 m ed un'estensione lungo il versante di 610 m.

Il modello proposto è un modello preliminare che deve coadiuvare nella definizione di una campagna di monitoraggio secondaria più mirata ed estesa. Quando si avranno dati più precisi e diffusi sull'area di frana si potrà impostare un modello numerico più sofisticato che permetterà di definire gli interventi finalizzati alla mitigazione del pericolo.

Nel presente studio sono state considerate alcune tipologie di intervento, mirate a ridurre la presenza d'acqua nel versante (soprattutto di falda), allo scopo di contenere i fenomeni di instabilità. Per poter progettare queste opere, sarà però necessario effettuare analisi piezometriche per capire realmente la presenza di acque sottosuperficiali.

Lo sviluppo futuro dell'attività d'indagine e monitoraggio, oltre alla prosecuzione di quanto già avviato, sarà quella di definire più precisamente il comportamento del movimento nel tempo. A

questo scopo si ritiene opportuno di estendere verso monte sia l'attività di indagine che quella di monitoraggio.

Bibliografia

- Bates, Jackson (1987) *Glossary of geology* – Alexandria, American Geologican Institute
- Bottero D. , Poggi F. (2010) *Manuale Tecnico – Il controllo degli spostamenti orizzontali in profondità mediante tubi inclinometrici e sonda removibile* - Regione Liguria Dipartimento Ambiente
- Canuti P., Casagli N. (1994) *Consideration on landslide hazard assessment* – atti convegno Bologna, 27 maggio 1994
- Canuti P., Menduini G. (2012) *Linee guida per la stabilizzazione delle frane e strategie di mitigazione del rischio* - Università degli Studi di Firenze
- Cardinali M., Ardizzone F., Carrara A., Guzzetti F. (2002) *Impact of mapping errors on the reliability of landslide hazard maps* – Natural Hazards and Earth System Science
- Casadio M., Elmi C. (1999) *Il manuale del geologo* - Edizione Pitagora
- Crescenti U. (1998) *Landslide risk: notes of assessment* – Quaderni di geologia applicata
- Cruden, Varnes (1996) *Landslide types and processes* – Landslides, Investigation & Mitigation, Special Report, US Transportation Research Board
- Einstein H. H. (1988) *Special lecture, landslide risk assessment* – Svizzera
- Fell R. (1994) *Landslide risk assessment and acceptable risk* – Canadian Geotechnical Journal
- Ferro V. (2002) *La sistemazione dei bacini idrografici* – McGraw-Hill, Milano
- Franceschini A. (2013) *Relazione descrittiva dell'attività di indagine geognostica e di monitoraggio dei dissesti in atto presso alcune abitazioni ubicate in prossimità di p.za Still nell'abitato di Siror* – Servizio Geologico Provincia Autonoma di Trento
- Lancellotta R. (1987) *Geotecnica* – Zanichelli, Milano
- Morgenstern N. R., Price V. E. (1965) *The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces* - Géotechnique, Volume 15
- Panizza M. (2005) *Manuale di geomorfologia applicata* - FrancoAngeli
- Sisgeo S.r.l (2000) *Manuale d'uso dei seguenti strumenti: inclinometri, piezometri*

Spagna V. (2013) *Geologia delle frane* – Dario Flaccovio Editore

Supino G. (1965) *Le reti idrauliche* - Patron Bologna

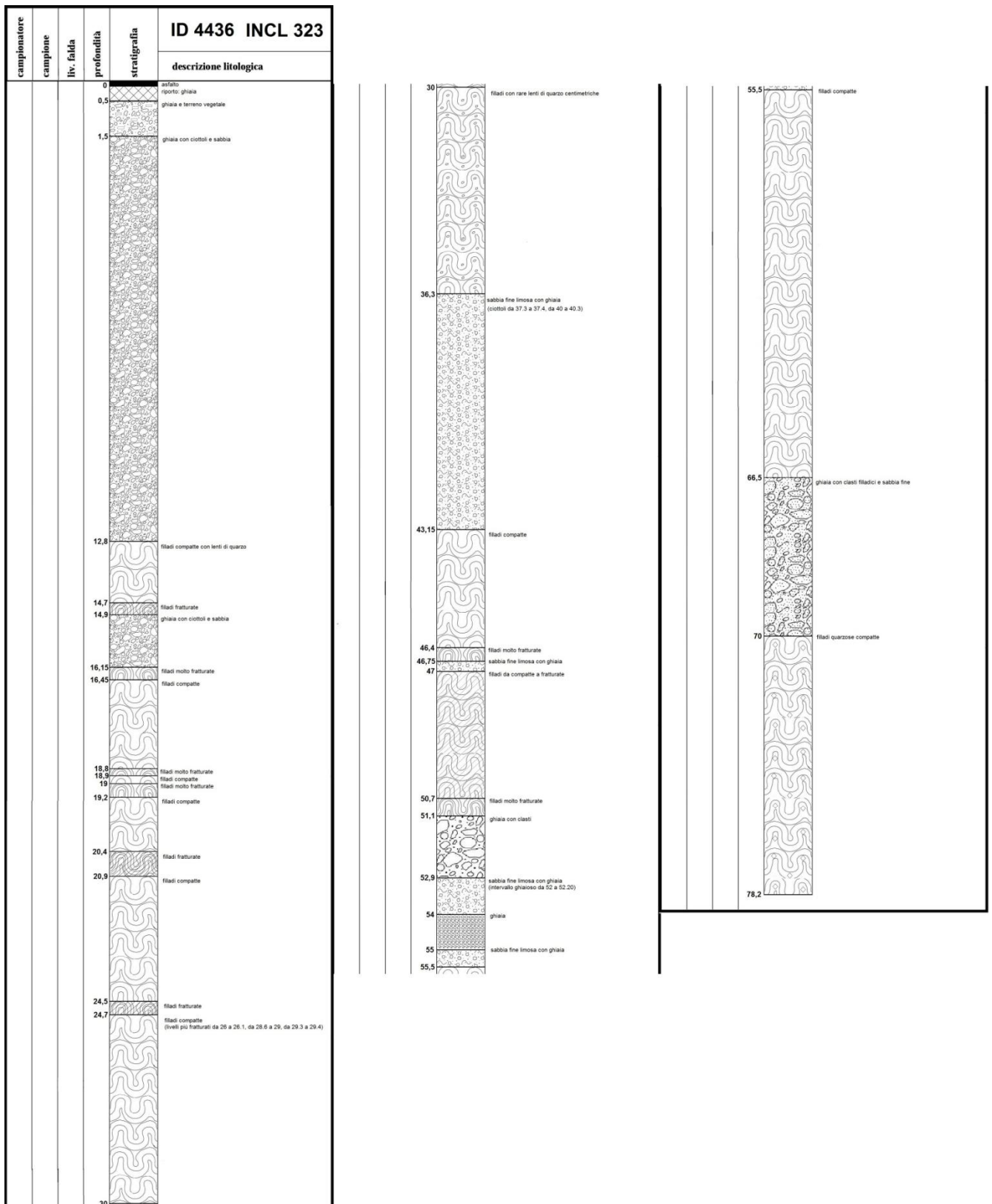
Varnes & IAEG Commission on Landslides (1984) *Landslide Hazard Zonation, a review of principles and practice* – UNESCO, Parigi

Allegati

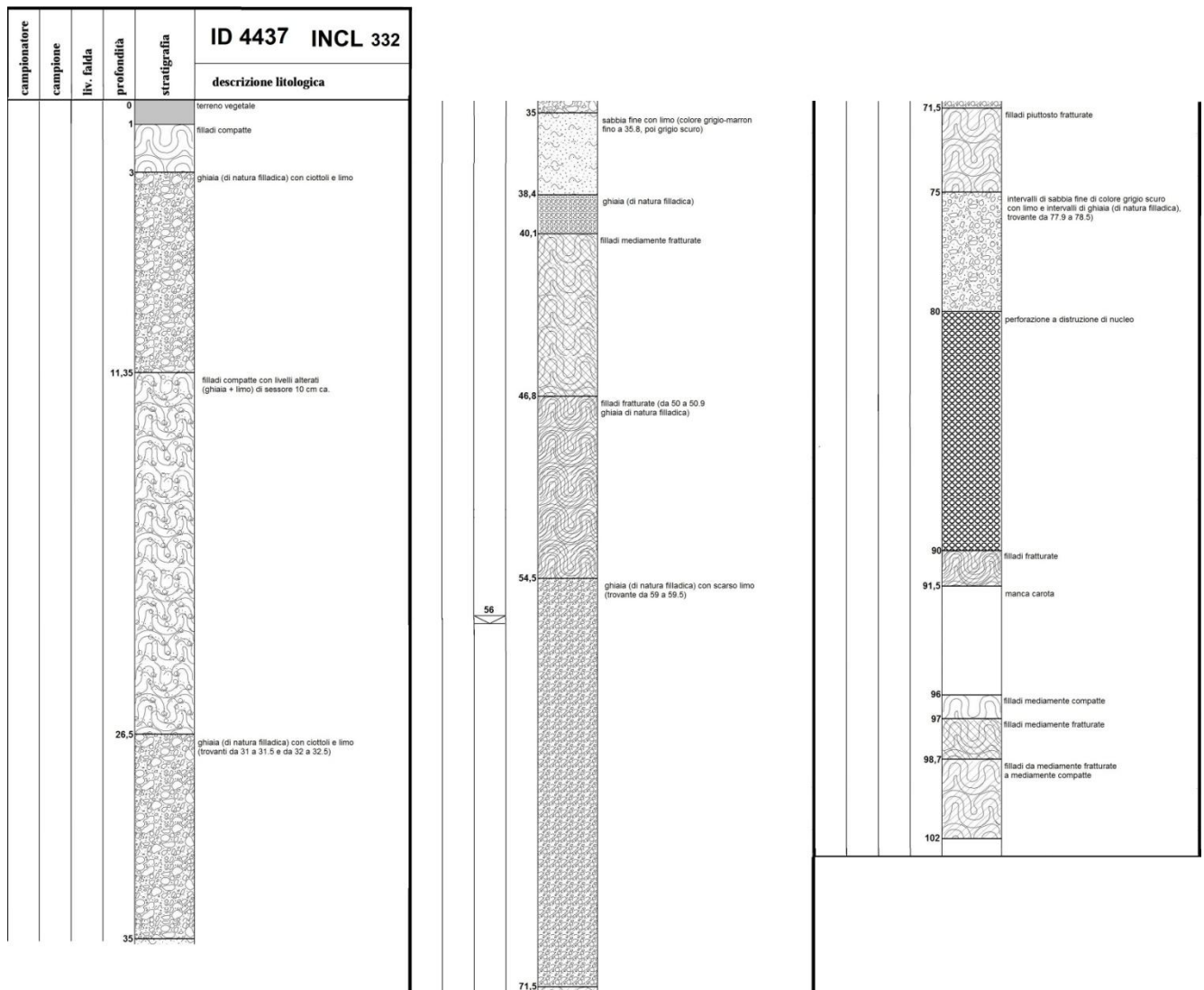
Allegato I: stratigrafie dei sondaggi 4434, 4433 e 4435 allineate alla stessa quota fatti dalla PAT

ID 4434					ID 4433					ID 4435				
campione	liv. falda	profondità	stratigrafia	descrizione litologica	campione	liv. falda	profondità	stratigrafia	descrizione litologica	campione	liv. falda	profondità	stratigrafia	descrizione litologica
		0		riporto stradale			0		riporto			0		riporto
		1.5		ghiaia di natura poligenica con sabbia e limo di colore beige		0.6			ciottoli con blocchi di natura filladica D max 80 cm		1.5		ghiaia di natura calcarea con ciottoli e sabbia D max 15 cm	
		2		blocchi con ciottoli di natura filladica D max 100 cm		2			ghiaia di natura filladica con sabbia e limo di colore marrone		2.5		sabbia con limo di colore beige	
		3.2		ghiaia di natura filladica con sabbia e limo D max 10 cm		3			ghiaia di natura filladica con sabbia e limo di colore grigio		3.2		ghiaia di natura calcarea con sabbia e limo D max 20 cm	
		4.7		trovante di natura filladica		7.7			sabbia con limo di colore beige e ciottoli di natura calcarea D max 10 cm		17.3		sabbia con limo di colore beige	
		6.9		ghiaia di natura calcarea con ciottoli e sabbia con limo, D max 30 cm		8.1			ghiaia di natura calcarea con sabbia e limo di colore beige D max 10 cm		17.85		ghiaia di natura calcarea con ciottoli e sabbia di colore beige e limo, D max 20 cm	
		17.3		sabbia con limo di colore beige		10.3			sabbia con limo di colore beige		20		sabbia con limo di colore marrone e ghiaia	
		17.85		ghiaia di natura calcarea con ciottoli e sabbia di colore beige e limo, D max 20 cm		10.7			ghiaia di natura calcarea con sabbia e limo D max 10 cm		22.2		ghiaia con sabbia e limo di colore beige	
		20				20					22.7		ghiaia di natura calcarea con sabbia e limo di colore beige D max 10 cm	
		30				29.7			ghiaia di natura calcarea con sabbia e limo di colore beige Ciottoli filladici spigolosi d max 7 cm		15.2		limo con sabbia di colore beige	
						33			ghiaia di natura dolomitica con sabbia e limo di colore grig		15.4		ghiaia con sabbia e limo D max 10 cm	
						34			fillade molto fraturata		20			
						35					28			
											29.15		sabbia con limo	
											30			

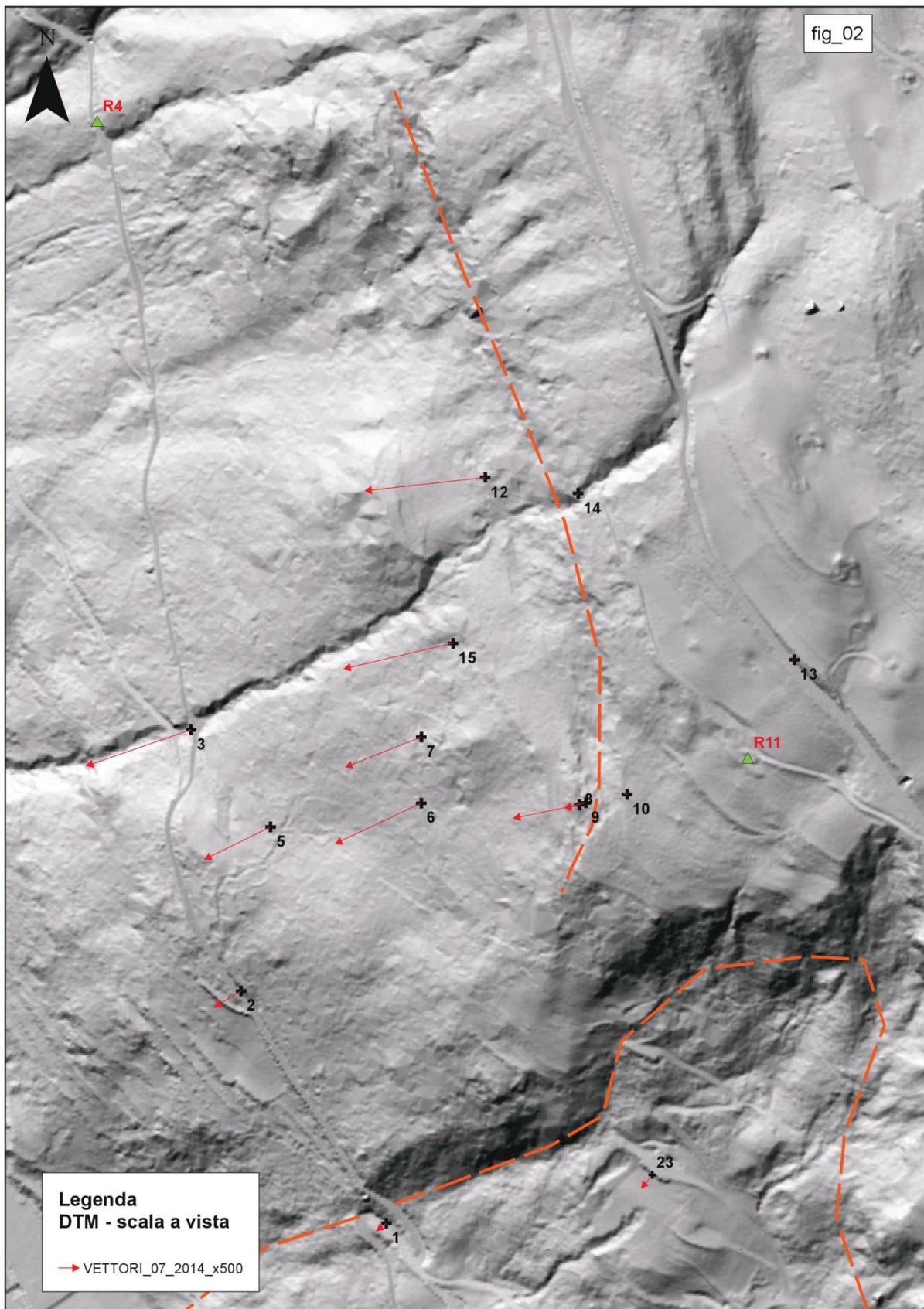
Allegato 2: stratigrafia del sondaggio 4436 relativa all'inclinometro 323



Allegato 3: stratigrafia del sondaggio 4437 relativa all'inclinometro 332



Allegato 4: corografia Allegato 4 con i vettori di deformazione moltiplicati x 500,



Allegato 5: vettori dei punti prossimi all'abitato moltiplicato per 1000 rispetto alla ortofoto



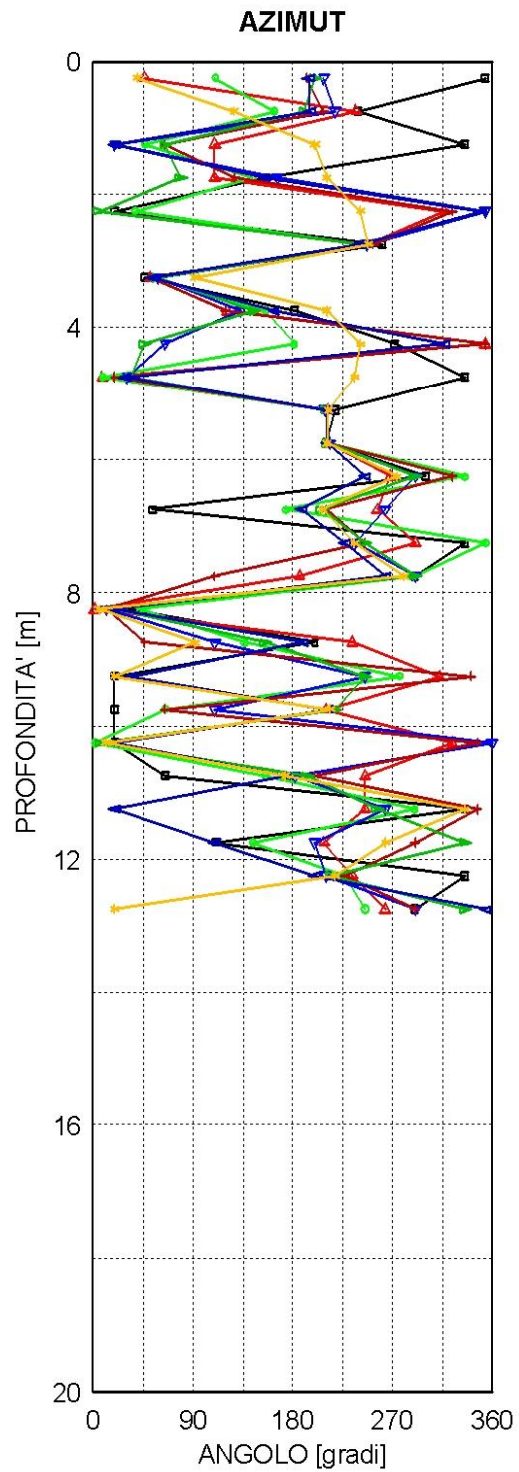
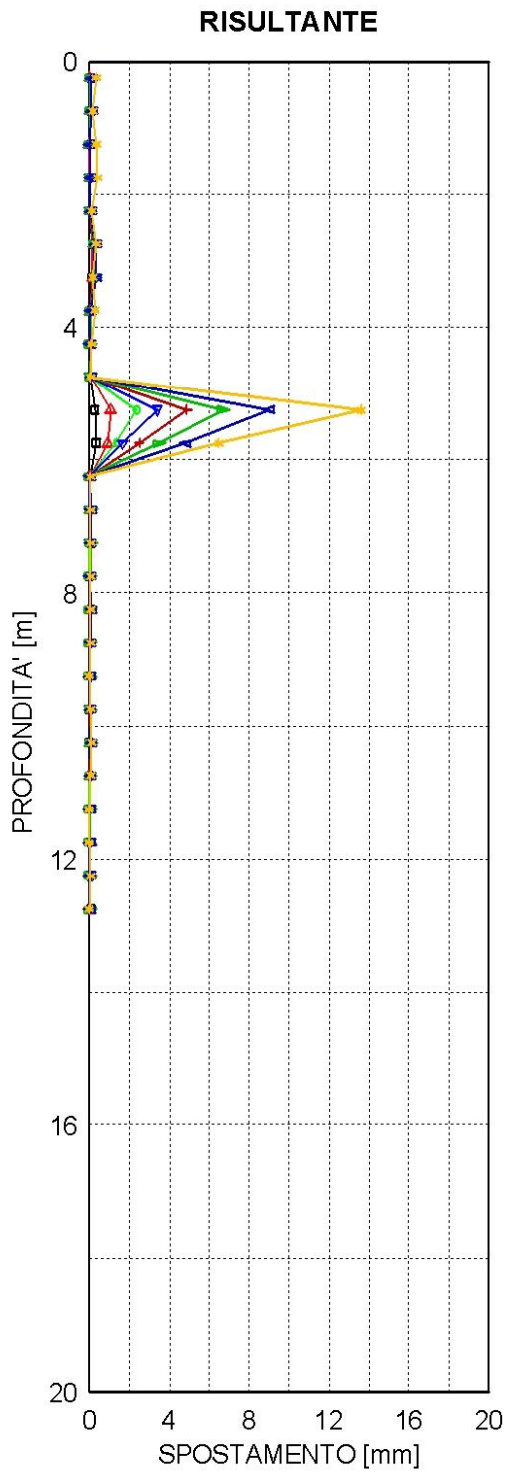


SERVIZIO GEOLOGICO DELLA P.A.T.

Comune: SIROR
Tubo inclinometrico: 304

Località: loc. Caspeda
Prima lettura: 05/09/2012

SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI LOCALI



LEGENDA:

—■—	22/10/2012	—▲—	24/01/2013	—◆—	28/05/2013	—▼—	30/07/2013
—+—	13/11/2013	—▶—	10/04/2014	—◆—	01/09/2014	—★—	14/01/2015

Allegato 7: spostamenti differenziali cumulati dell'Inclinometro 304



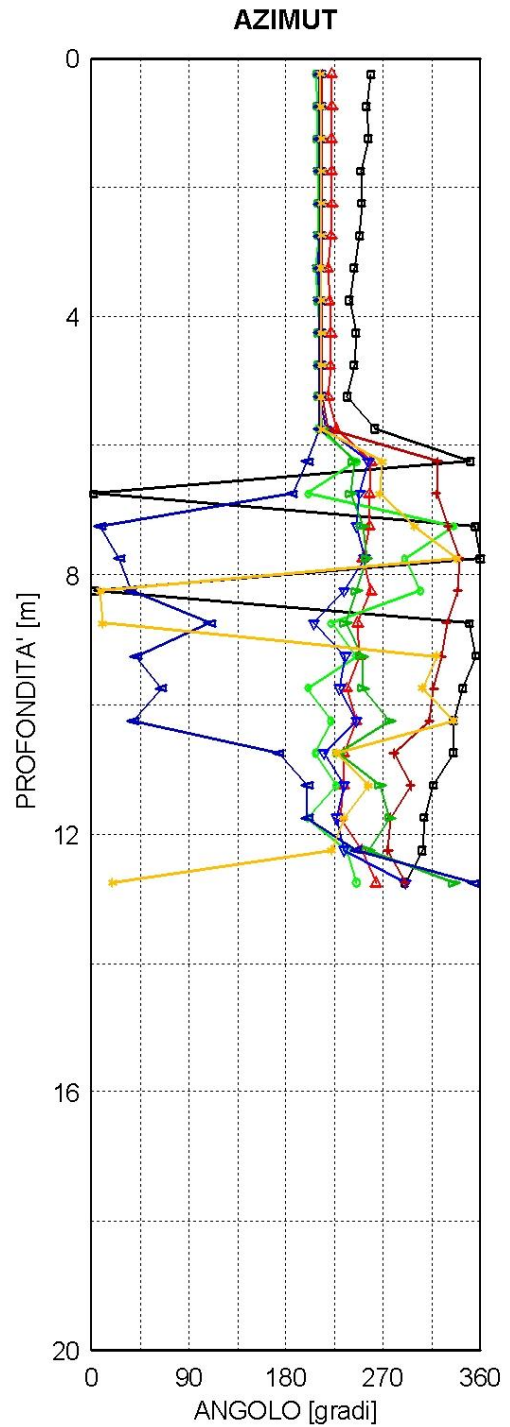
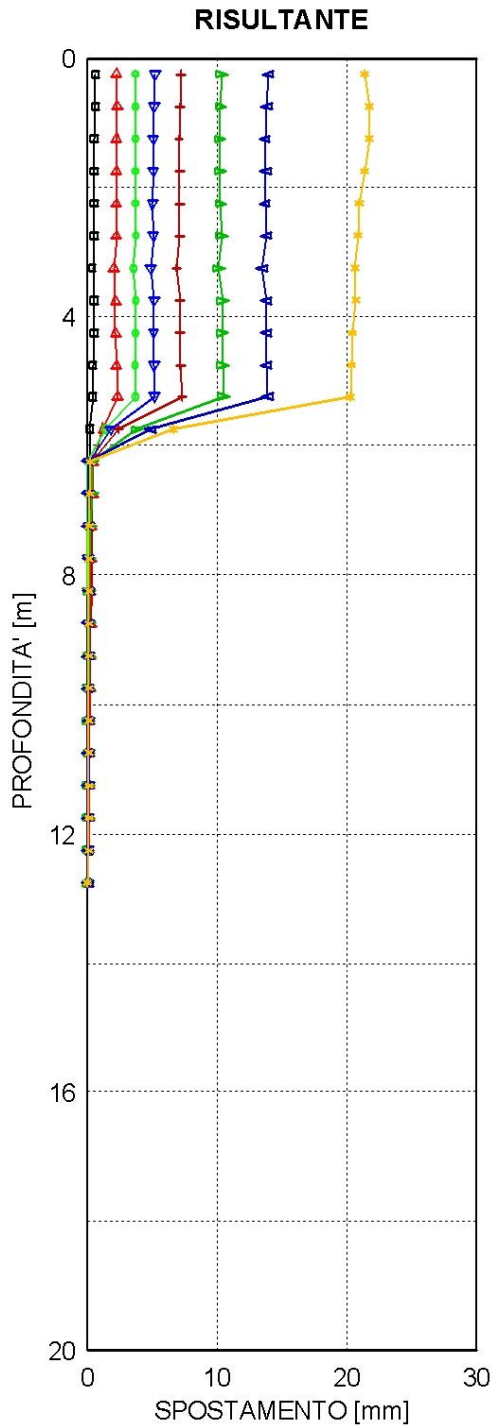
SERVIZIO GEOLOGICO DELLA P.A.T.

Comune: SIROR
Tubo inclinometrico: 304

Località: loc. Caspeda
Prima lettura: 05/09/2012

SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI CUMULATI

(Calcolo dal basso)



- LEGENDA:**
- | | | | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
| —■— 22/10/2012 | —▲— 24/01/2013 | —◆— 28/05/2013 | —▼— 30/07/2013 |
| —+— 13/11/2013 | —◀— 10/04/2014 | —◆— 01/09/2014 | —◆— 14/01/2015 |

Allegato 8: spostamenti differenziali cumulati nel tempo dell'Inclinometro 304



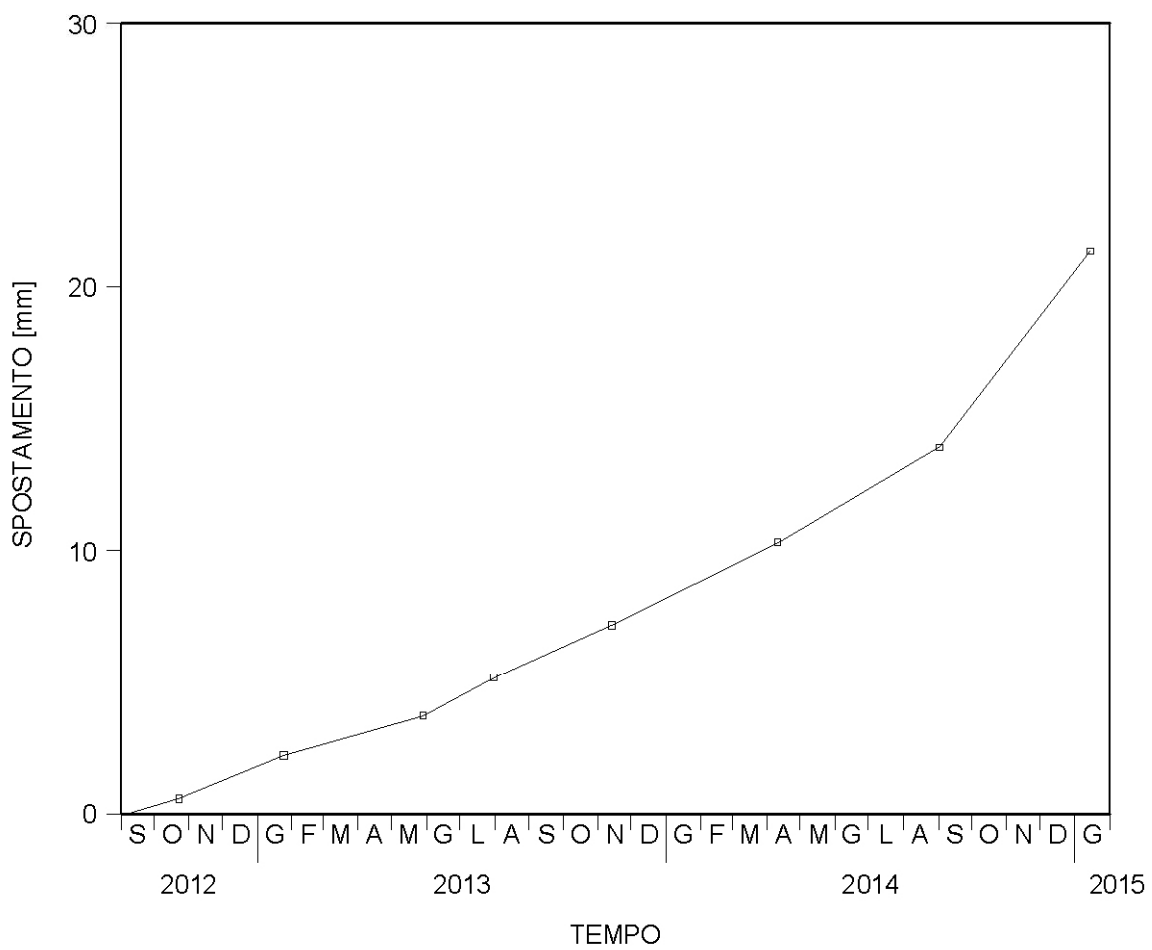
SERVIZIO GEOLOGICO DELLA P.A.T.

Comune: SIROR
Tubo inclinometrico: 304

Località: loc. Caspeda
Prima lettura: 05/09/2012

SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI CUMULATI

(Calcolo dal basso)



LEGENDA: —□— da 0,25 m a 12,75 m

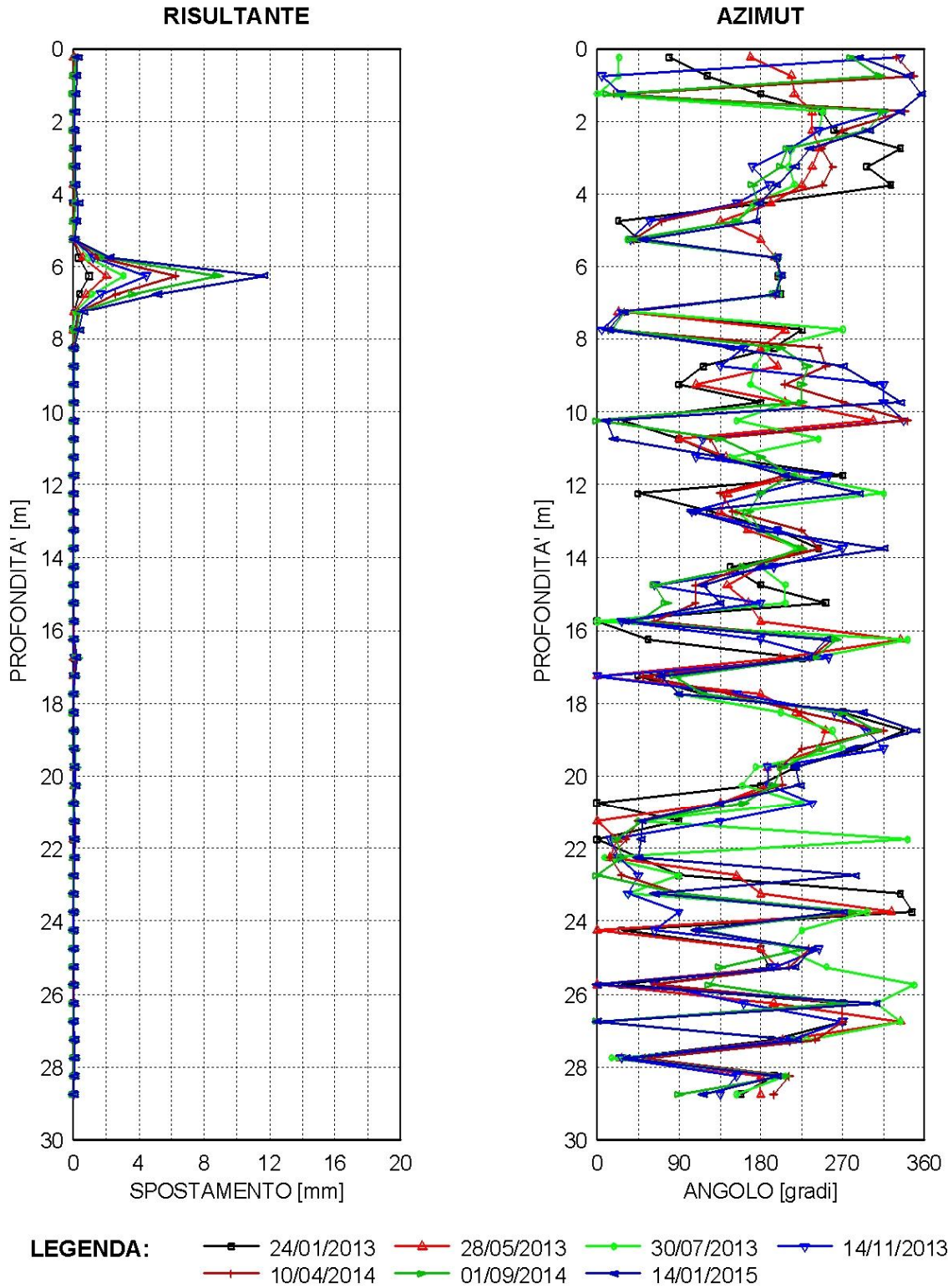


SERVIZIO GEOLOGICO DELLA P.A.T.

Comune: SIROR
Tubo inclinometrico: 308

Località: loc. Caspeda
Prima lettura: 22/10/2012

SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI LOCALI





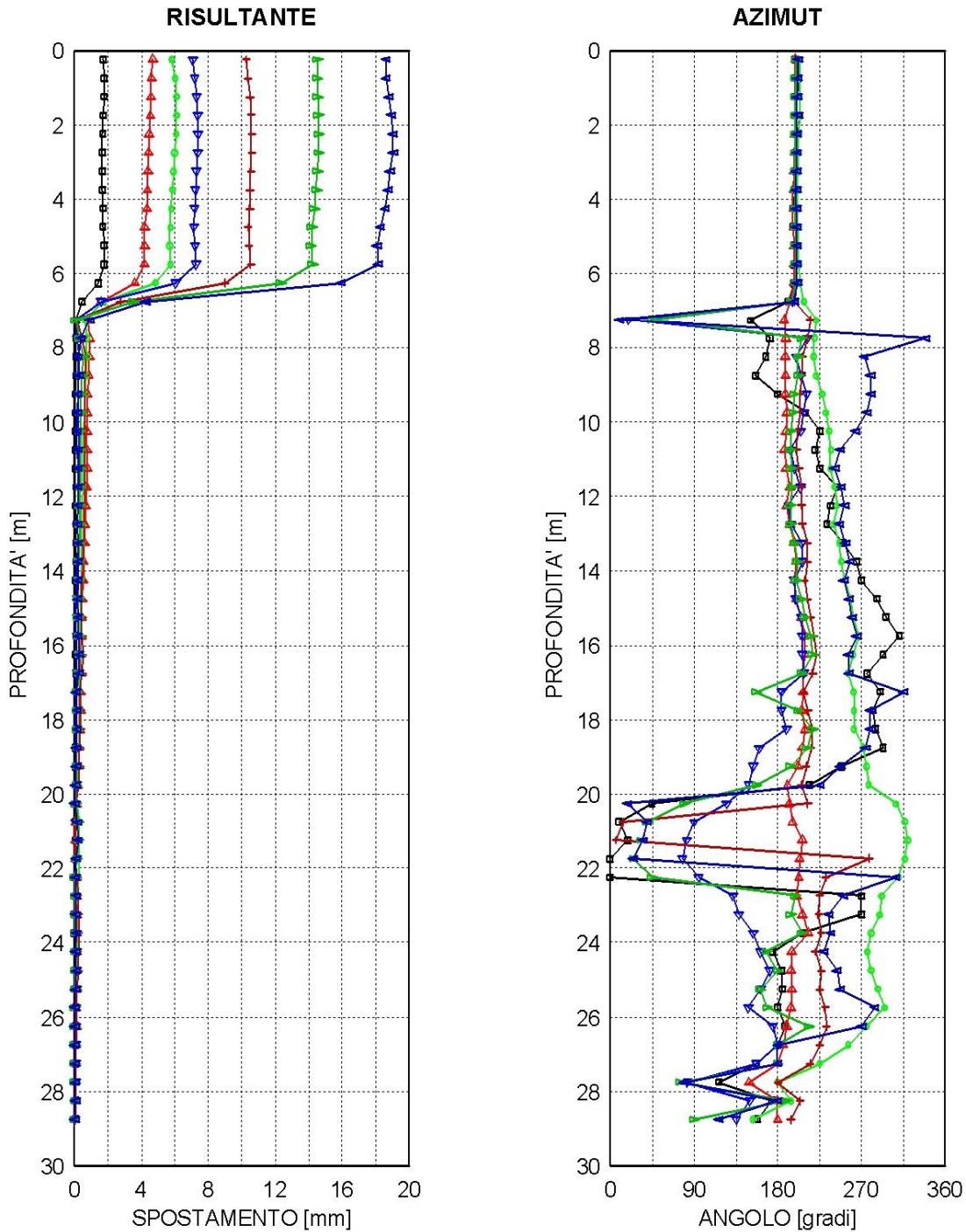
SERVIZIO GEOLOGICO DELLA P.A.T.

Comune: SIROR
 Tubo inclinometrico: 308

Località: loc. Caspeda
 Prima lettura: 22/10/2012

SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI CUMULATI

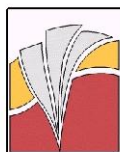
(Calcolo dal basso)



LEGENDA:

—■—	24/01/2013	—▲—	28/05/2013	—◇—	30/07/2013	—▽—	14/11/2013
—+—	10/04/2014	—◀—	01/09/2014	—▶—	14/01/2015		

Allegato 11: spostamenti differenziali cumulati nel tempo dell'Inclinometro 308



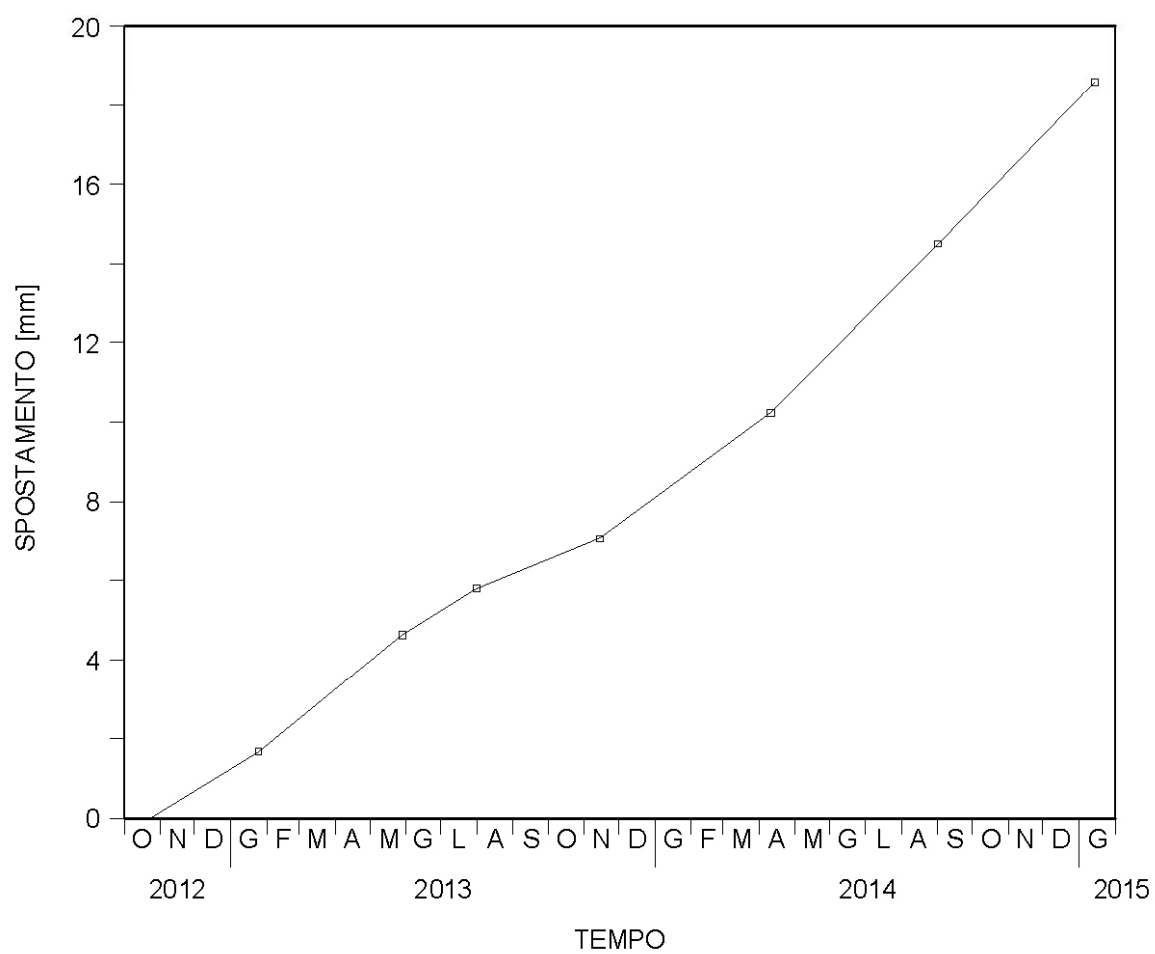
SERVIZIO GEOLOGICO DELLA P.A.T.

Comune: SIROR
Tubo inclinometrico: 308

Località: loc. Caspeda
Prima lettura: 22/10/2012

SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI CUMULATI

(Calcolo dal basso)



LEGENDA: —□— da 0,25 m a 28,75 m

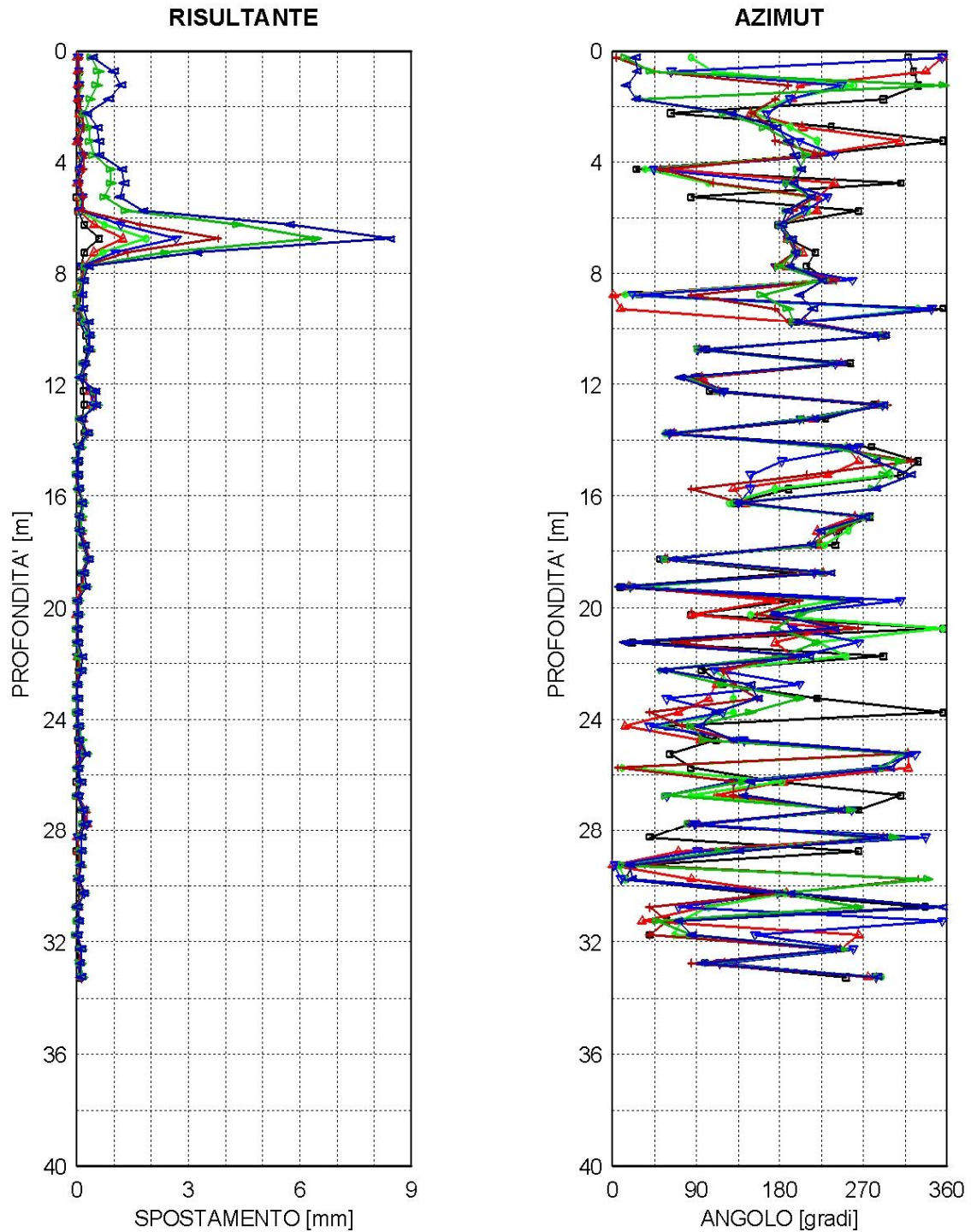


SERVIZIO GEOLOGICO DELLA P.A.T.

Comune: SIROR
 Tubo inclinometrico: 309

Località: loc. Caspeda
 Prima lettura: 22/10/2012

SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI LOCALI



LEGENDA: —■— 24/01/2013 —▲— 28/05/2013 —●— 30/07/2013 —▼— 14/11/2013
 —+— 10/04/2014 —*— 01/09/2014 —◆— 14/01/2015



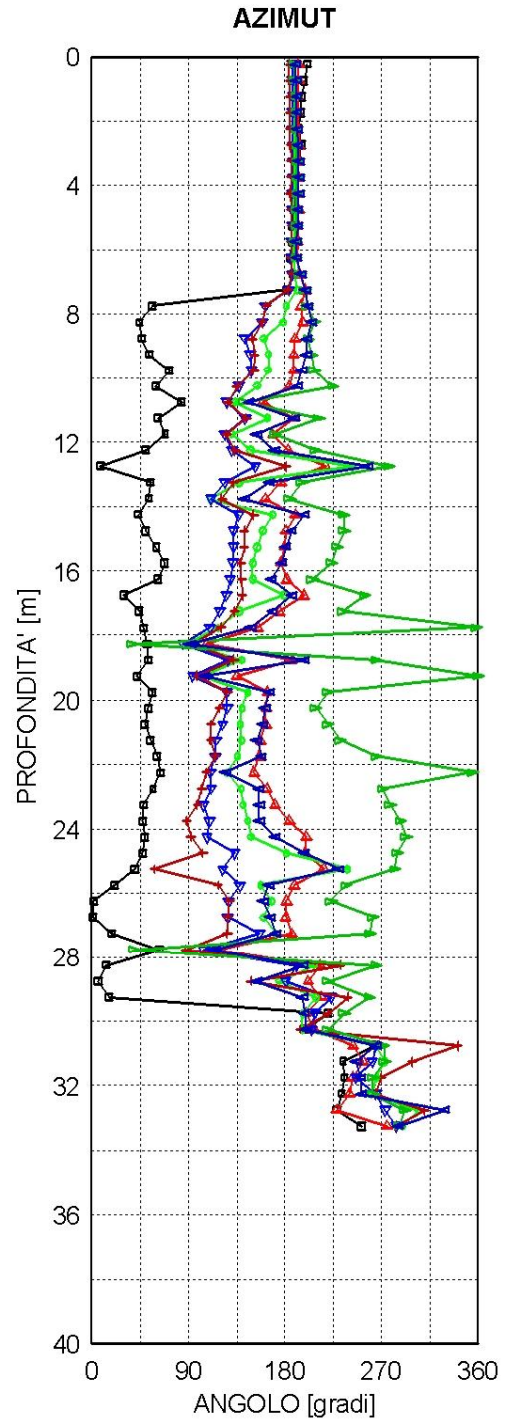
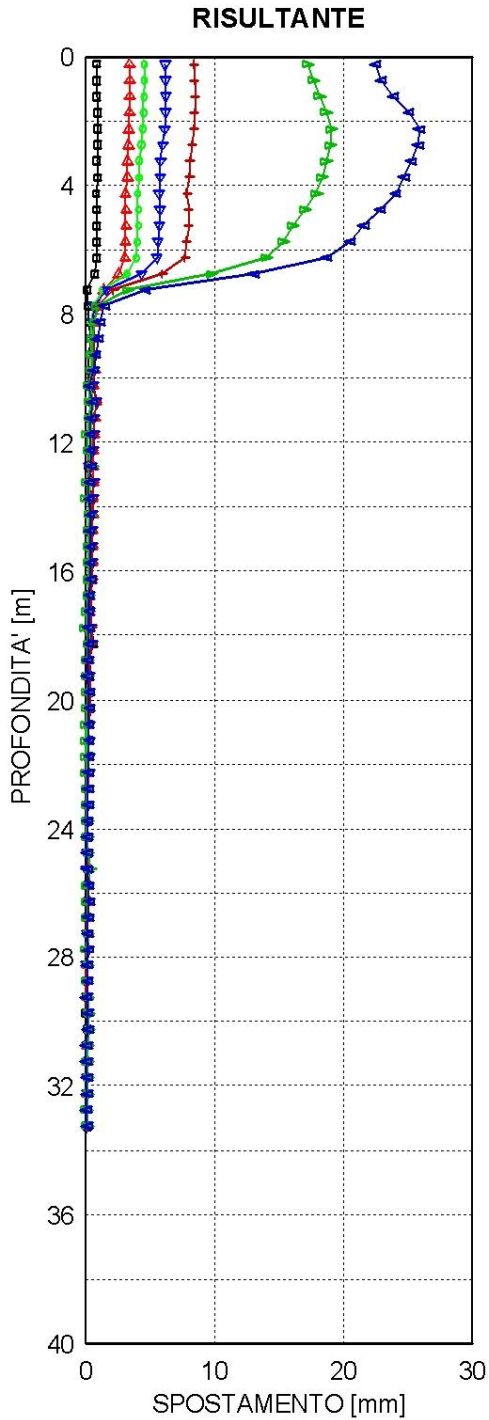
SERVIZIO GEOLOGICO DELLA P.A.T.

Comune: SIROR
 Tubo inclinometrico: 309

Località: loc. Caspeda
 Prima lettura: 22/10/2012

SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI CUMULATI

(Calcolo dal basso)



LEGENDA:

—■—	24/01/2013	—▲—	28/05/2013	—◆—	30/07/2013	—▼—	14/11/2013
—+—	10/04/2014	—●—	01/09/2014	—▲—	14/01/2015		

Allegato 14: spostamenti differenziali cumulati nel tempo dell'Inclinometro 309



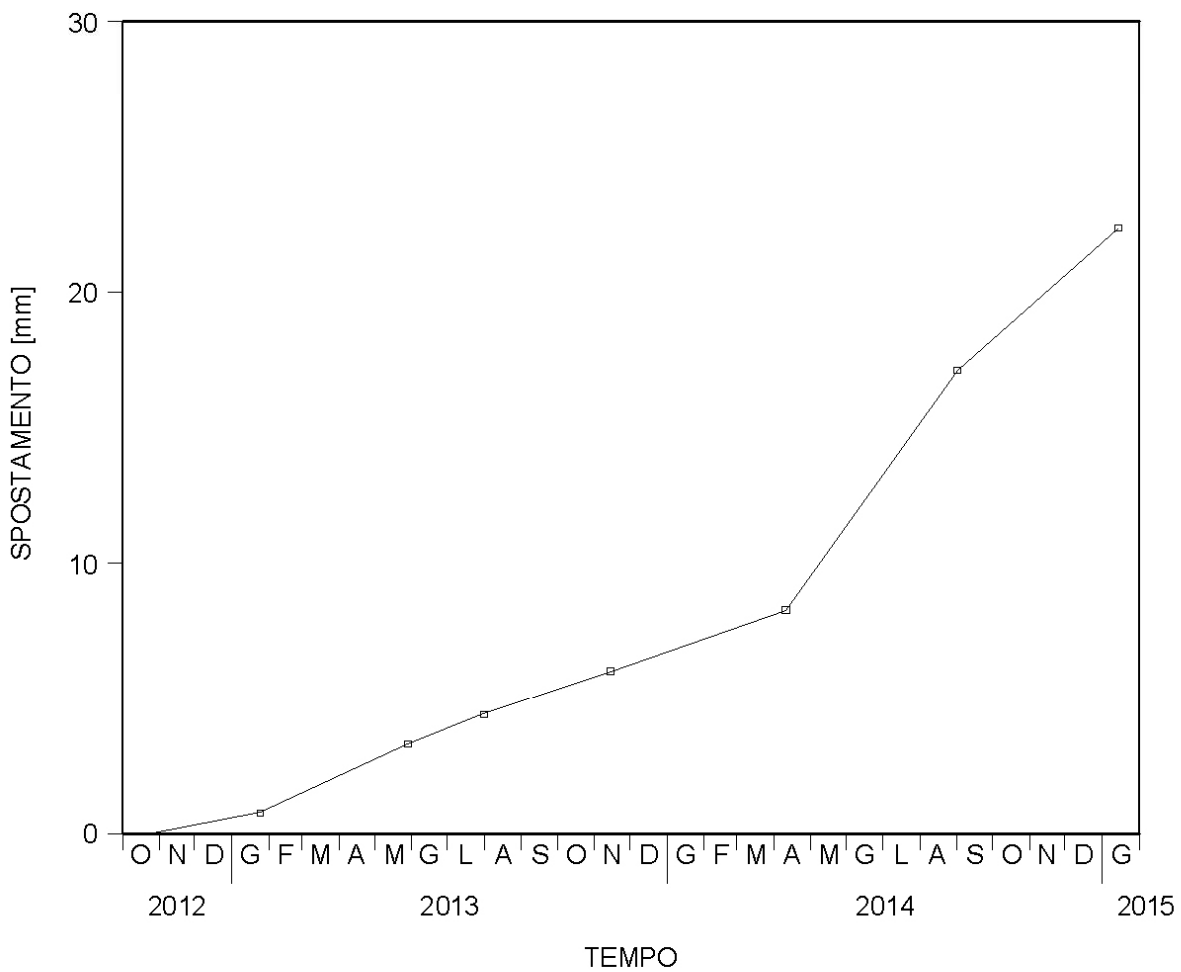
SERVIZIO GEOLOGICO DELLA P.A.T.

Comune: SIROR
Tubo inclinometrico: 309

Località: loc. Caspeda
Prima lettura: 22/10/2012

SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI CUMULATI

(Calcolo dal basso)



LEGENDA: —□— da 0,25 m a 33,25 m

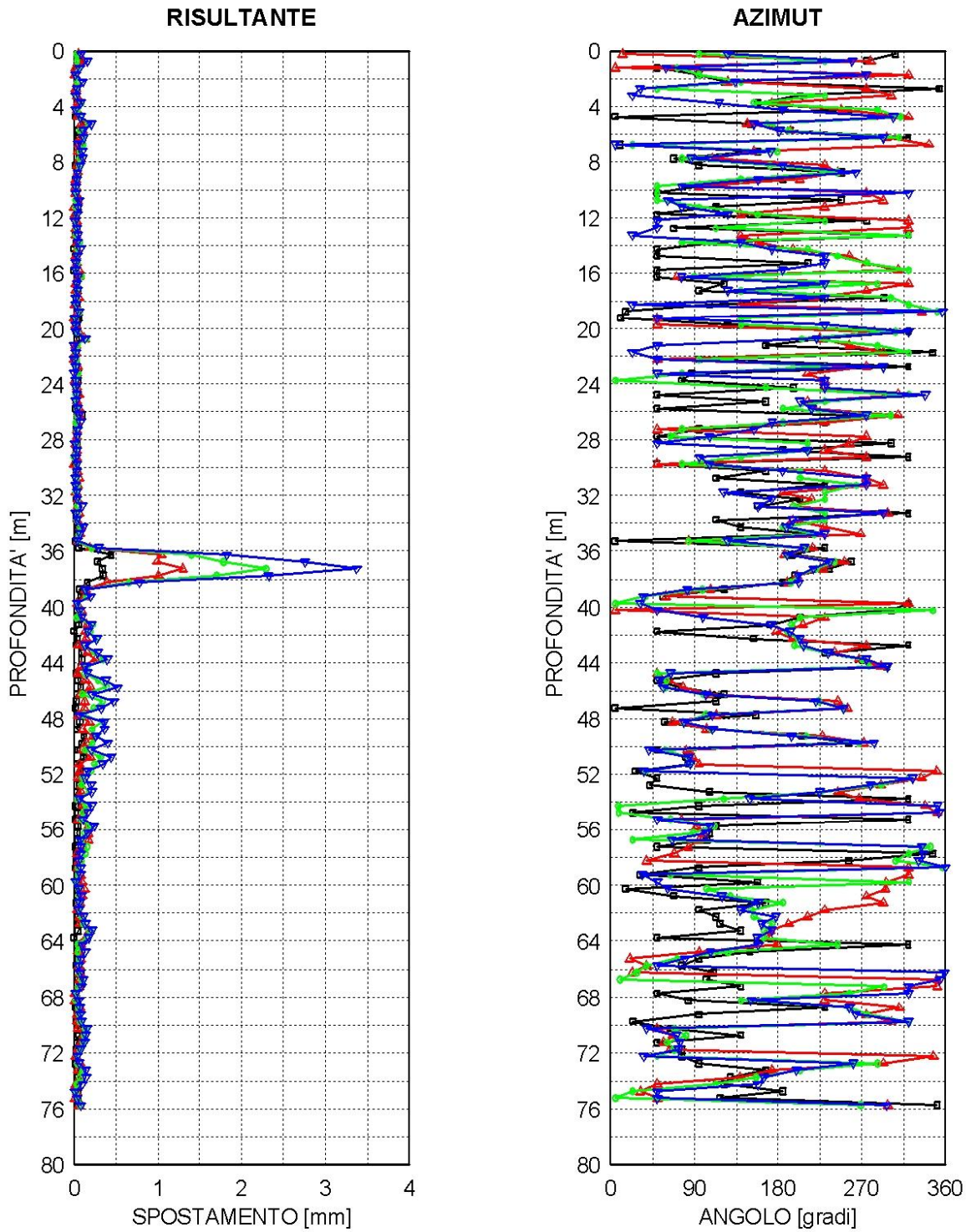


SERVIZIO GEOLOGICO DELLA P.A.T.

Comune: SIROR
Tubo inclinometrico: 323

Località: Strada x Petina
Prima lettura: 31/07/2013

SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI LOCALI



LEGENDA: ■ 13/11/2013 ▲ 09/04/2014 ● 02/09/2014 ▼ 27/01/2015



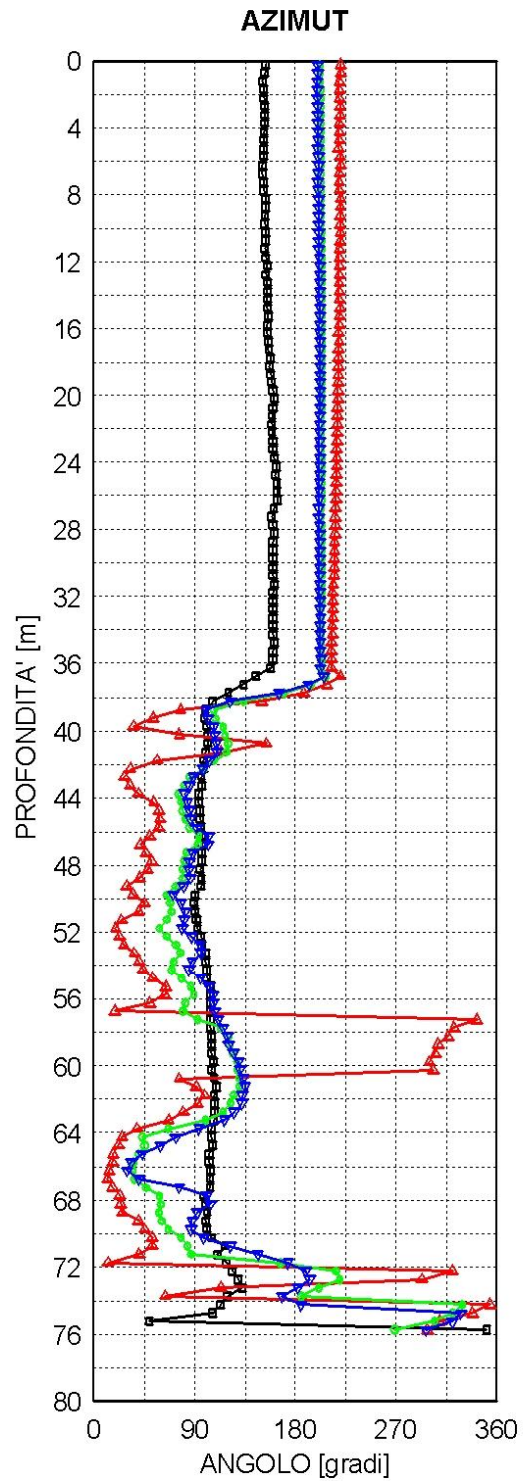
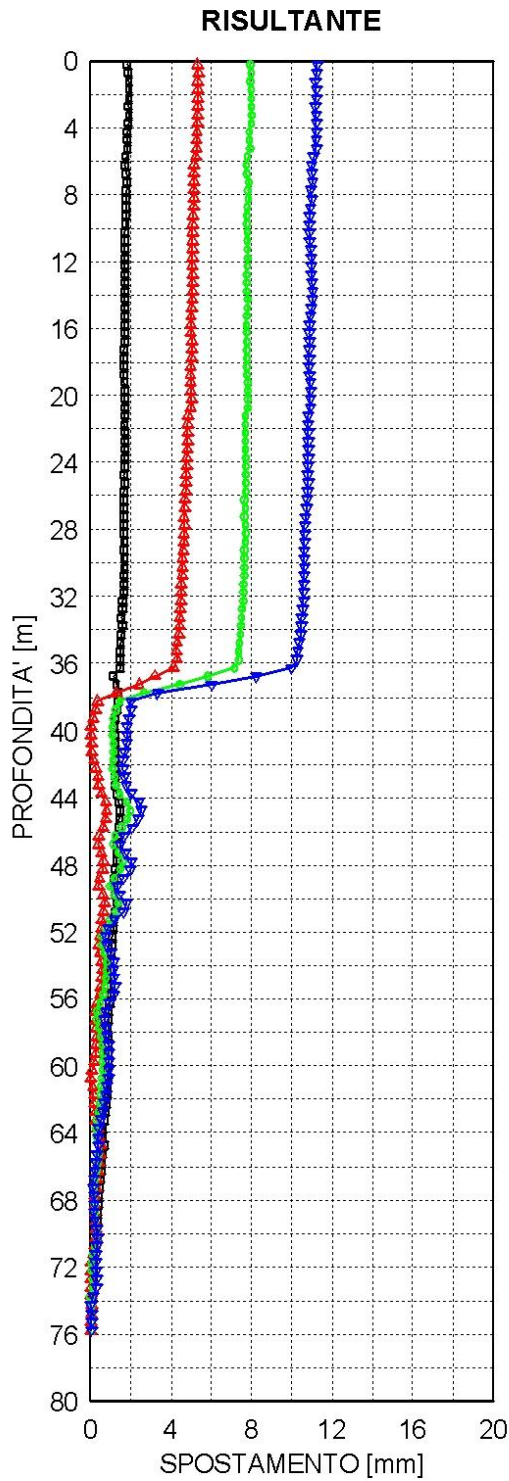
SERVIZIO GEOLOGICO DELLA P.A.T.

Comune: SIROR
 Tubo inclinometrico: 323

Località: Strada x Petina
 Prima lettura: 31/07/2013

SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI CUMULATI

(Calcolo dal basso)



LEGENDA: ■ 13/11/2013 ▲ 09/04/2014 ● 02/09/2014 ▼ 27/01/2015



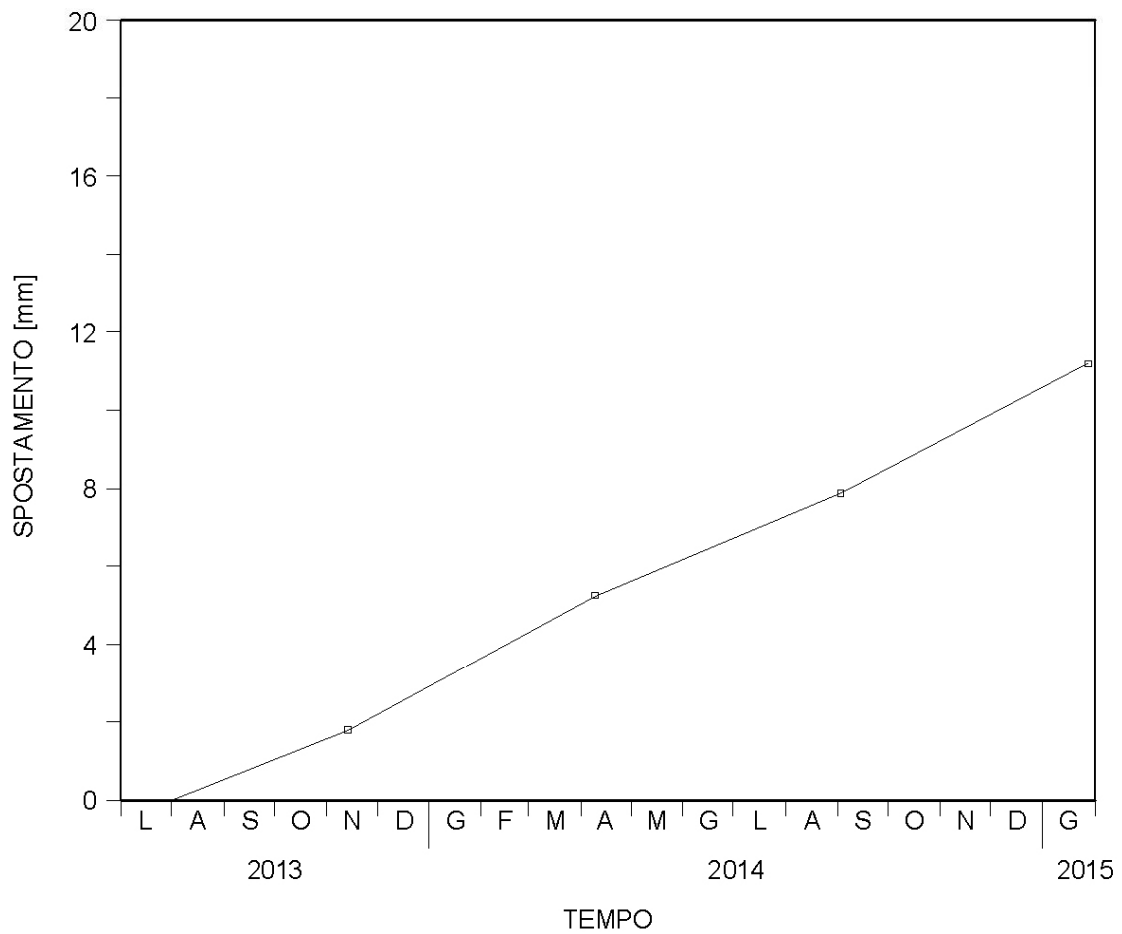
SERVIZIO GEOLOGICO DELLA P.A.T.

Comune: SIROR
Tubo inclinometrico: 323

Località: Strada x Petina
Prima lettura: 31/07/2013

SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI CUMULATI

(Calcolo dal basso)



LEGENDA: —□— da 0,25 m a 75,75 m

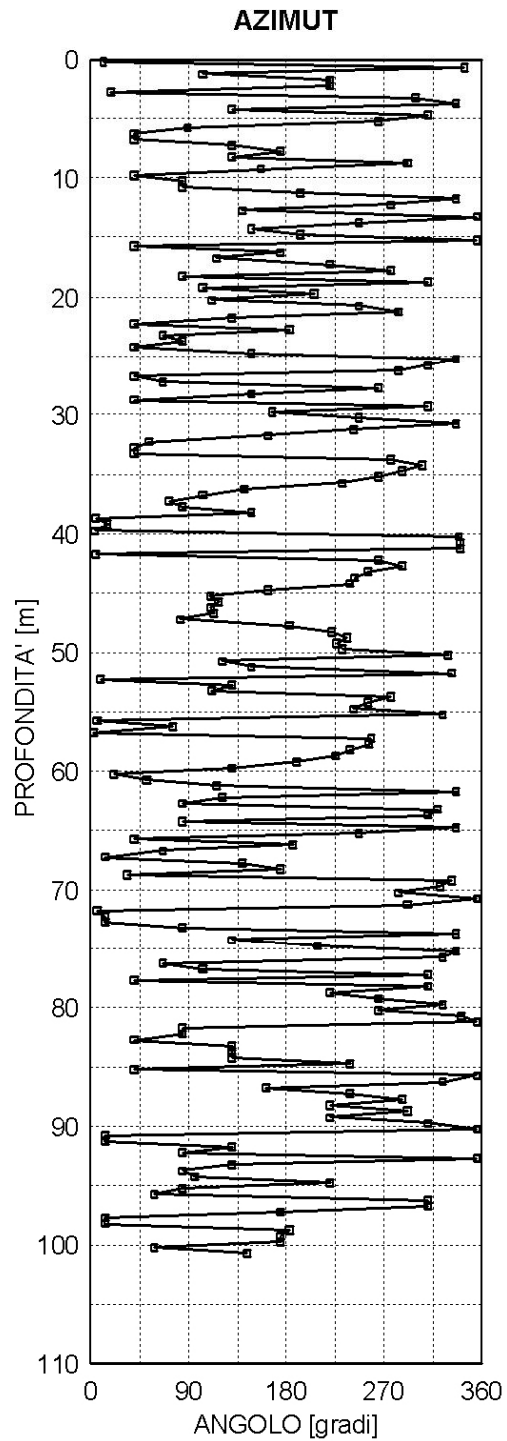
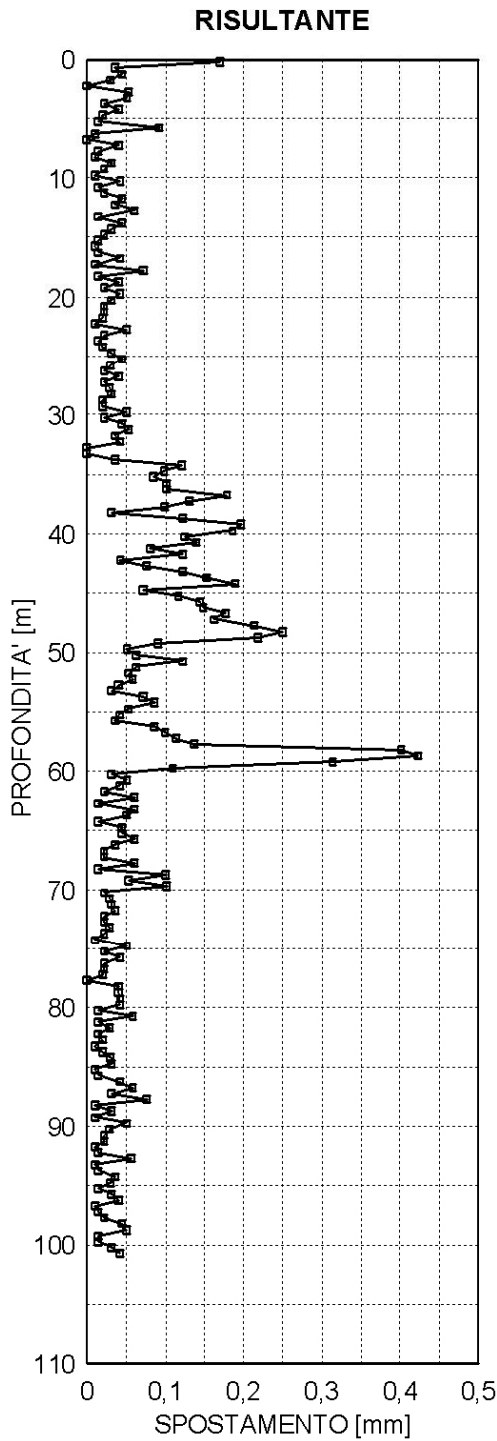


SERVIZIO GEOLOGICO DELLA P.A.T.

Comune: SIROR
Tubo inclinometrico: 332

Località: Loc. Spadez strada per Petina
Prima lettura: 28/01/2015

SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI LOCALI



LEGENDA: —●— 23/03/2015



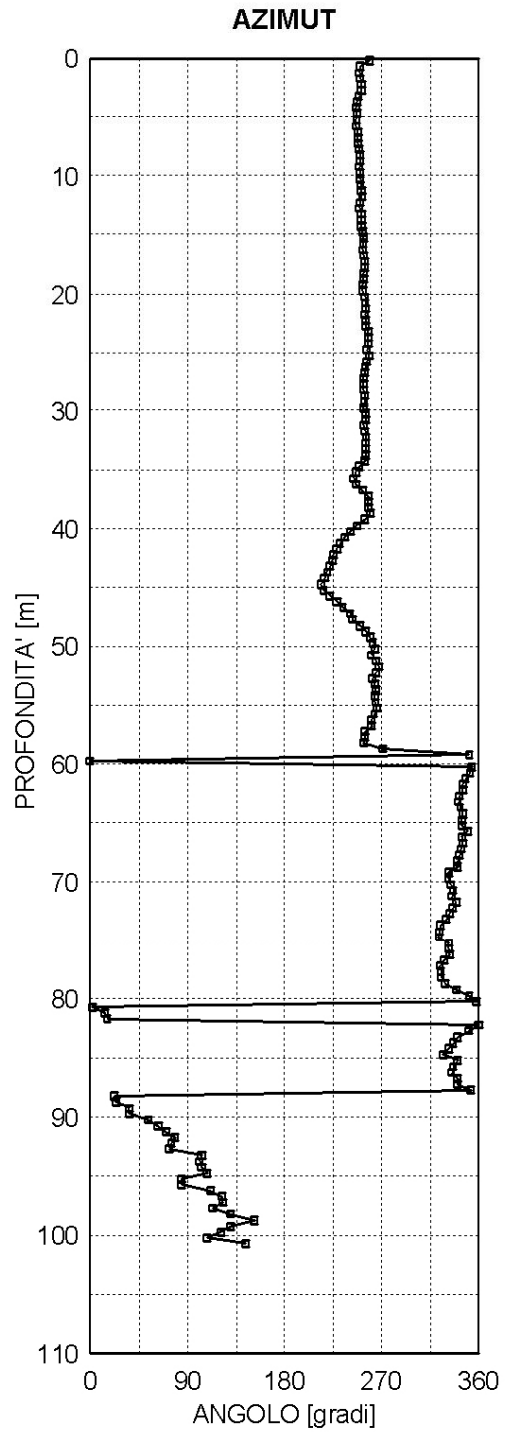
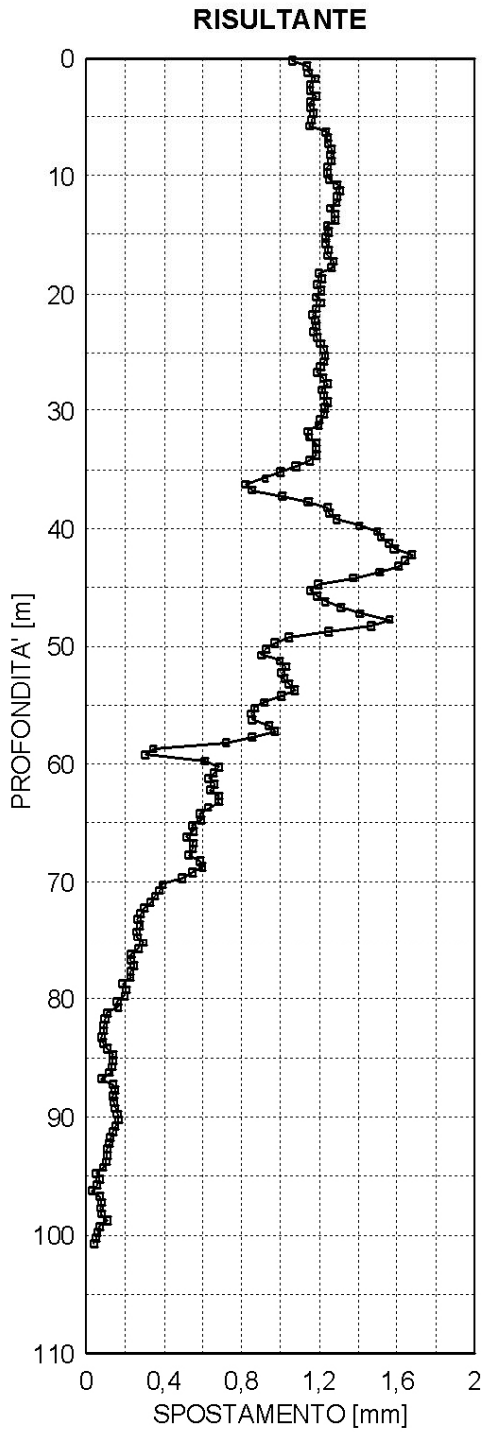
SERVIZIO GEOLOGICO DELLA P.A.T.

Comune: SIROR
Tubo inclinometrico: 332

Località: Loc. Spadez strada per Petina
Prima lettura: 28/01/2015

SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI CUMULATI

(Calcolo dal basso)



LEGENDA: —■— 23/03/2015