

VARIANTE ALLA S.S. 1 "VIA AURELIA"  
Viabilità di accesso all'hub portuale di La Spezia  
Lavori di costruzione della variante alla S.S. 1 Via Aurelia - 3°Lotto  
2° Stralcio Funzionale B dallo Svincolo di Buon Viaggio allo Svincolo di San Venerio  
**COMPLETAMENTO**

PRECEDENTI LIVELLI DI PROGETTAZIONE DELL'APPALTO INTEGRATO ORIGINALE

PD n°1861 del 09/07/03 aggiornato al 10/12/08 - Delibera CIPE n°60 del 02/04/08

PE n° 103 del 14/07/2011 - D.A. CDG-103321-P del 20/07/11

PVT n°112 del 21/01/16 aggiornata al 28/10/16 - D.A. CDG-92950-P del 21/02/17

Progetto Esecutivo Cantierabile Opere da Completare

**PROGETTO ESECUTIVO**

COD. GE266

PROGETTAZIONE: ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI

PROGETTISTA:

*Dott. Ing. Antonio Scalamandrè*  
*Ordine Ing. di Frosinone n. 1063*

IL GEOLOGO

*Dott. Geol. Flavio Capozucca*  
*Ordine Geol. del Lazio n. 1599*

COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE

*Geom. Emiliano Paiella*

VISTO IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

*Dott. Ing. Fabrizio Cardone*

PROTOCOLLO

DATA

**STUDI, INDAGINI E RELAZIONI SPECIALISTICHE**  
**GEOLOGIA E IDROGEOLOGIA**

VERSANTE CAROZZO

Relazione sul modello della frana e sul monitoraggio Versante Carozzo

CODICE PROGETTO		NOME FILE		REVISIONE	SCALA
PROGETTO	LIV. PROG.	T00GE00GEORE20B.dwg			
DPGE0266	E 20	CODICE ELAB. T00GE00GEORE20		B	-
D					
C					
B	Emissione in seguito ad istruttoria DIV	Dicembre 2020	AK Ingegneria	Geol. Paone M.	Geol. Capozucca F.
A	COMMENTI	2020	AK Ingegneria	Geol. Paone M.	Geol. Capozucca F.
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

## INDICE

1	INTRODUZIONE	2
2	DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE GEOTECNICA INSTALLATA NEI FORI DI SONDAGGIO DELLA CAMPAGNA INDAGINI 2018-2019	3
2.1	DESCRIZIONE SISTEMA MUMS	3
2.2	DESCRIZIONE SISTEMA DMS	3
3	DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE GEOTECNICA INSTALLATA NEI FORI DI SONDAGGIO DELLE PRECEDENTI CAMPAGNE INDAGINI	7
3.1	NUOVE LETTURE ESEGUITE SUI SONDAGGI PREGRESSI	7
4	RISULTATI DEL MONITORAGGIO 2018-2019	9
4.1	SETTORE INCLINOMETRI SF DMS E SF MUMS	9
4.1.1	SF DMS	9
4.1.2	SF MUMS	12
4.2	SETTORE INCLINOMETRO SG MUMS	15
4.2.1	SG MUMS	15
4.3	SETTORE INCLINOMETRO SE DMS	18
4.3.1	se dms	18
4.4	SETTORE INCLINOMETRO SC MUMS	21
4.4.1	SC MUMS	21
4.5	SETTORE INCLINOMETRO SD DMS	26
4.5.1	SD DMS	26
4.6	SETTORE INCLINOMETRI SA DMS E SA MUMS	29
4.6.1	SA DMS	29
4.6.2	SA MUMS	33
4.7	SETTORE INCLINOMETRO SB	37
4.7.1	SB INCL	37
4.8	SINTESI DEL MONITORAGGIO INCLINOMETRICO	41
4.9	SINTESI DEL MONITORAGGIO PIEZOMETRICO	42
5	CONFRONTO DEI DATI E DEFINIZIONE DEL MODELLO DELLA FRANA	42
6	CENNI SUGLI INTERVENTI DI SISTEMAZIONE DEL VERSANTE	487

## 1 INTRODUZIONE

Lo stralcio B del III lotto della variante alla SS 1 Aurelia ha come criticità principale il complesso movimento gravitativo sottostante l'abitato di Carozzo e la sua interazione con la galleria Felettino I. Questo particolare contesto (versante instabile, abitazioni a monte, galleria naturale in costruzione in contesto suburbano) ha provocato diverse difficoltà e rallentamenti durante lo svolgimento dei lavori, fino all'abbandono del cantiere da parte di due ATI, con società mandatarie rispettivamente Coestra S.r.l. e Toto spa.

Anas ha quindi deciso di affrontare con risorse interne un nuovo studio del versante, attraverso una campagna integrativa di indagini e monitoraggi geologico-geotecnici, progettando e realizzando un campo monitoraggi con le più performanti tecnologie oggi disponibili sul mercato.

Il presente documento illustra quindi i risultati del monitoraggio inclinometrico e piezometrico, principalmente eseguito nel corso della citata campagna indagini 2018-2019, con particolare riguardo al periodo compreso tra i mesi di Dicembre 2018 e Luglio 2019 e definisce, attraverso tali dati, il modello geomorfologico del fenomeno gravitativo presente sul versante. Queste fasi, interessando aree territoriali non di competenza Anas, sono state condivise con i responsabili dell'Ufficio Difesa del Suolo della Regione Liguria, con sede a La Spezia, attraverso incontri e sopralluoghi congiunti.

L'analisi e l'interpretazione dei dati sono state principalmente eseguite in base ai risultati elaborati dalle società **ASE S.r.l.** e **C.S.G. S.r.l.**, rispettivamente fornitori dei sistemi inclinometrici automatici di tipo MUMS e di tipo DMS installati (si rimanda allo specifico elaborato "*Fascicolo sul monitoraggio*" per la descrizione di dettaglio della strumentazione installata e sulle misure acquisite nel corso del monitoraggio).

Inoltre, insieme ai dati provenienti dagli strumenti installati nell'ultima campagna indagini, sono stati analizzati anche i dati di nuova acquisizione misurati nella strumentazione geotecnica delle precedenti campagne indagini, relativi a misure piezometriche e inclinometriche di tipo tradizionale.

## 2 DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE GEOTECNICA INSTALLATA NEI FORI DI SONDAGGIO DELLA CAMPAGNA INDAGINI 2018-2019

Come accennato in precedenza, i dati di monitoraggio analizzati fanno principalmente riferimento a quelli acquisiti dalla strumentazione geotecnica installata nell'ultima campagna indagini (Figura 2), nello specifico da:

- n.4 **catene** inclinometriche automatiche di tipo MUMS (*Modular Underground Monitoring System*), provviste di sensori piezometrici automatici per la misura della falda;
- n.4 **catene** inclinometriche automatiche di tipo DMS (*Differential Monitoring Of Stability*), provviste di sensori piezometrici automatici per la misura della falda;
- n.1 **tubo** inclinometrico tradizionale, nel quale è prevista la misura per mezzo della sonda inclinometrica manuale;
- n.1 piezometro a tubo aperto.

In due diversi settori, in particolare sulla parte superiore e sul settore medio-basso del versante, sono state attrezzate coppie di sondaggi (eseguiti a poca distanza l'uno dall'altro) con entrambe le tipologie di strumenti. Si è voluto creare quindi un "*sistema di monitoraggio ridondante*" che, effettuando un'analisi in parallelo lungo la medesima verticale di misura (per l'ubicazione in pianta dei sondaggi attrezzati si rimanda anche all'elaborato "Planimetria delle indagini eseguite"), ha permesso una valutazione accurata della affidabilità dei due metodi di rilevamento parametrico.

### 2.1 DESCRIZIONE SISTEMA MUMS

Il sistema inclinometrico MUMS (Modular Underground Monitoring System), è progettato per monitorare i movimenti di versante (spostamenti orizzontali e/o verticali), le deformazioni di strutture geotecniche, le misure di convergenza e radiali in galleria. È possibile implementare la catena MUMS anche con ulteriori sensori capaci di monitorare diversi parametri fisici, quali: spostamento, inclinazione, pressione interstiziale, temperatura e livelli piezometrici della falda.

Lo strumento si presenta come una catena di sensori di differente natura posti a distanze configurabili a seconda della problematica oggetto di studio. La centralina di raccolta dati acquisisce le misure in completa autonomia e da remoto, con una risoluzione in near-real time che può essere modificata a seconda delle necessità. Successivamente i dati grezzi (punti elettrici), sono salvati su supporto di memoria locale (SD card) ed inviati una volta al giorno al centro di elaborazione, situato a Parma, mediante la rete 4G. Una volta ricevuto il dato, questo viene salvato su un Database con backup giornaliero automatico, elaborato mediante un software proprietario e reso disponibile su piattaforma web ad accesso controllato (si rimanda allo specifico elaborato "Fascicolo sul monitoraggio" per la descrizione di dettaglio della strumentazione installata).

### 2.2 DESCRIZIONE SISTEMA DMS

Le colonne multiparametriche DMS (Differential Monitoring of Stability) sono un sistema di monitoraggio geotecnico multiparametrico, fisso ed automatico, estraibile e riutilizzabile.

Lo scopo principale è il monitoraggio in continuo ed in tempo reale della stabilità di versanti, fronti di scavo

e opere ingegneristiche, attraverso sensori inclino-piezometrici, termici ed altro, in grado di garantire un monitoraggio in continuo e completamente automatizzato dei fenomeni di interesse per il presente studio. Le colonne di monitoraggio sono composte da unità rigide strumentate, contenenti sensori di monitoraggio ed elettronica di controllo locale, ed unità rigide non strumentate, collegate tra loro da speciali giunti in gomma armata aventi caratteristiche di rigidità torsionale e deformabilità tali da assicurare la conservazione della direzionalità del sistema durante la fase di inserimento in foro.

E' fondamentale la garanzia dell'Azimut di spostamento offerta da questo sistema, a differenza del sistema MUMS, il cui dato di azimut è derivato, non rilevato.

I dati rilevati in continuo ed archiviati in registrazione nella modalità 1record/1h sono disponibili in tempo reale tramite FTP per l'accesso mediante il software DMS EW client (si rimanda allo specifico elaborato "Fascicolo sul monitoraggio" per la descrizione di dettaglio della strumentazione installata).

Pertanto è possibile monitorare principalmente con riferimento al caso in esame:

- Spostamenti x, y e z lungo il suo intero sviluppo;
- Livello piezometrico di 1 o più falde separate idraulicamente;
- Temperatura (log termico).

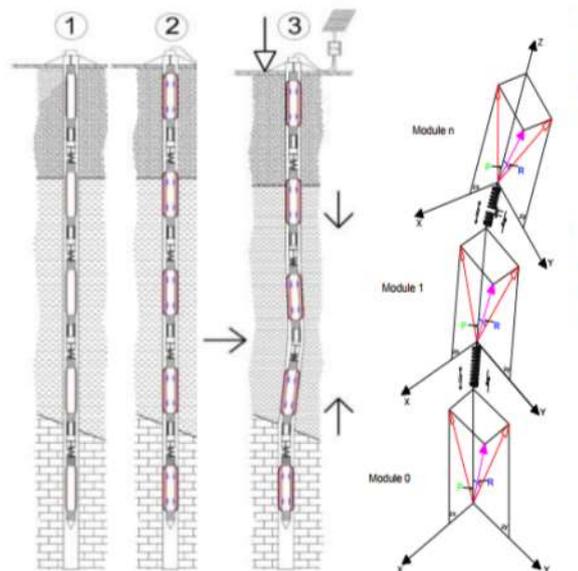


Figura 1: Esempio di funzionamento di una colonna tipo DMS.

Figura 2: Tabella riassuntiva campagna indagini 2018-2019.

SONDAGGI INTEGRATIVI PER IL SITO DI CAROZZO (2018-2019)									
Sigla	Tecnica di perforazione	Profondità (m)	Attrezzatura	Tratta di installazione della strumentazione inclinometrica (m)	Tratta di installazione della strumentazione piezometrica (m)	Quota falda m da p.c.	Periodo di installazione	Coordinate Geografiche UTM WGS84 fuso 32T	Quota (m slm)
SA DMS	Carotaggio continuo con carotiere doppio	72.7	Sensori inclino-piezometrici tipo DMS	0-60	tra 4.5-10.5 e tra 33-39	12.8	dal 04/12/18 al 20/12/18; al 07/01	Nord 4886570.635 Est 568463.622	67.0
SA MUMS	Distruzione di nucleo	20	Sensori inclino-piezometrici tipo MUMS	0-20	13 e 19	8.2		Nord 4886571.081 Est 568470.15	67.5
SB INCL	Carotaggio continuo con carotiere doppio	30.6	Inclinometro tradizionale	0-28		10.2	dal 18/01/19 al 24/01/19	Nord 4886425.427 Est 568475.168	50.4
SB PZ	Distruzione di nucleo	30	Piezometro			10.1		Nord 4886425.361 Est 568477.738	50.4
SC MUMS	Carotaggio continuo con carotiere doppio	50	Sensori inclino-piezometrici tipo MUMS	0-20	tra 9-12 e tra 18-21	4	dal 13/11/18 al 28/11/18	Nord 4886642.613 Est 568480.328	74.9
SD DMS	Carotaggio continuo con carotiere doppio	31	Sensori inclino-piezometrici tipo DMS	0-31	tra 9-12 e tra 24-27	4	dal 6/11/18 al 11/11/18	Nord 4886582.763 Est 568560.583	79.5
SE DMS	Carotaggio continuo con carotiere doppio	30	Sensori inclino-piezometrici tipo DMS	0-24	tra 9-12 e tra 18-21	3.4	dal 15/10/18 al 27/10/18	Nord 568549.245 Est 4886704.393	93.9
SEbis	Carotaggio continuo con carotiere doppio	9				3.2	dal 24/10/18 al 25/10/18	Nord 4886705.018 Est 568550.689	93.6
SF DMS	Carotaggio continuo con carotiere doppio	25	Sensori inclino-piezometrici tipo DMS	0-25	2-22	2.05	dal 23/02/19 al 28/02/19	Nord 4886781.223 Est 568572.219	108.0
SF MUMS	Distruzione di nucleo	20	Sensori inclino-piezometrici tipo MUMS	0-20	15	1.4		Nord 4886782.589 Est 568568.405	107.7
SG MUMS	Carotaggio continuo con carotiere doppio	21	Sensori inclino-piezometrici tipo MUMS	0-21	14-18	3.40	dal 29/01/19 al 21/02/19	Nord 4886744.855 Est 568608.971	105.7

Figura 3bis: installazione verticali DMS campagna indagini 2018-2019



### 3 DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE GEOTECNICA INSTALLATA NEI FORI DI SONDAGGIO DELLE PRECEDENTI CAMPAGNE INDAGINI

Nel corso delle precedenti campagne indagini, 2006-2007 e 2014-2015, sono stati installati n. 5 tubi inclinometrici tradizionali sui quali, principalmente nel periodo Maggio 2015-Giugno 2016, è stato eseguito il monitoraggio inclinometrico.

Contemporaneamente, su ulteriori n. 6 sondaggi attrezzati con piezometri (a tubo aperto e con celle piezometriche), eseguiti in prossimità degli inclinometri, è stato eseguito un monitoraggio piezometrico della posizione della falda freatica (per l'ubicazione in pianta dei sondaggi attrezzati si rimanda anche all'elaborato "Planimetria delle indagini eseguite").

I risultati di questi precedenti monitoraggi sono stati integrati ed in parte utilizzati per la definizione del Modello Geotecnico e Geomorfologico del versante redatto in questo studio, posto alla base del progetto della campagna integrativa, il cui scopo era chiarire alcune criticità dei modelli precedentemente redatti e definire il più esattamente possibile **volume, geometrie e cinatismi dei movimenti gravitativi sottostanti l'abitato di Carozzo**.

#### 3.1 NUOVE LETTURE ESEGUITE SUI SONDAGGI PREGRESSI

Nel corso dell'ultima campagna indagini 2018-2019 e contemporaneamente al relativo monitoraggio sono state anche eseguite una serie di nuove letture inclinometriche e piezometriche su alcuni dei fori strumentati realizzati nelle precedenti campagne indagini, ancora funzionanti.

In particolare, sono state eseguite nuove letture lungo i tubi inclinometrici:

- I7
- N11
- N21
- N41
- N7

Per i risultati delle letture su questi vecchi inclinometri si rimanda all'elaborato "Fascicolo sul monitoraggio".

Allo stesso tempo, sono state eseguite nuove letture nei piezometri (Figura 2):

- N4p (tubo aperto)
- N2p (Cella a -12m)
- N2p (Cella a -30m)

I restanti piezometri PZ7, N5p e N3p non erano invece più misurabili.

<b>MONITORAGGIO PIEZOMETRICO</b>			
<b>DATA</b>	<b>N4 P</b>	<b>N2 P</b>	
		<b>CELLA -12 m</b>	<b>CELLA - 30 m</b>
		23/11/2018	-7,75
26/11/2018	-6,65	-4,41	-4,45
29/11/2018	-6,98	-4,35	-4,38
04/12/2018	-7,43	-4,35	-4,38
12/12/2018	-7,35	-4,63	-4,64
19/12/2018	-7,41	-4,63	-4,64
12/01/2019	-7,62	-4,66	-4,64
25/01/2019	-7,65	-4,8	-4,7
05/02/2019	-7,58	-4,53	-4,4
25/02/2019	-7,6	-4,85	-4,8
05/03/2019	-7,8	-4,95	-4,9
08/04/2019	-7,15	-4,09	-3,82
10/05/2019	-7,1	-4,25	-4,17

Figura 4: Nuove letture piezometriche eseguite nel 2018-2019 nei piezometri progressi.

#### 4 RISULTATI DEL MONITORAGGIO 2018-2019

Di seguito sono presentati i principali risultati del monitoraggio inclinometrico, descritti per i diversi settori e le relative verticali in cui sono state installate le strumentazioni.

Come già accennato, si rimanda anche allo specifico elaborato "Fascicolo sul monitoraggio" per la descrizione di dettaglio della strumentazione installata e delle misure acquisite.

##### 4.1 SETTORE INCLINOMETRI SF DMS E SF MUMS

###### 4.1.1 SF DMS

La colonna SF DMS è multi-parametrica e consente di monitorare in continuo e in tempo reale gli spostamenti orizzontali, le variazioni piezometriche, accelerometriche e di temperatura nell'intervallo di profondità 0-10 m p.c.. Il piezometro è unico e posizionato alla base della colonna a profondità di 10m.

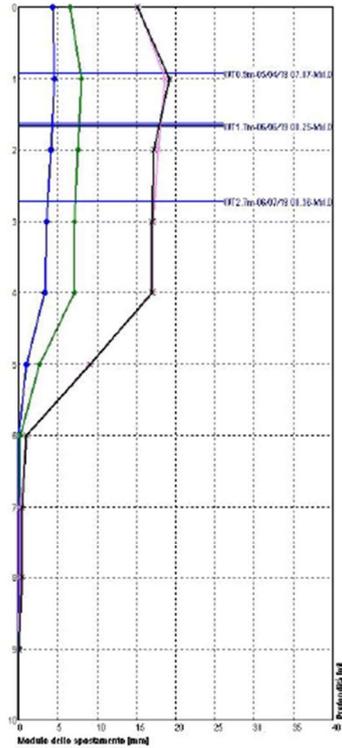
La strumentazione è stata installata in data 06/03/2019, la data della lettura zero di riferimento è del 11/03/2019 e l'ultima lettura è stata eseguita in data 06/07/2019.

###### Spostamenti orizzontali

Per quanto riguarda gli spostamenti orizzontali, la colonna presenta alla data del 06/07/2019 uno spostamento cumulato in testa di 15.0 mm, riferito alla lettura zero (11/03/2019). Il valore massimo di spostamento cumulato è registrato in 19.1 mm a 1 m. p.c. in debole retroflessione nel settore sommitale (Figura 5).

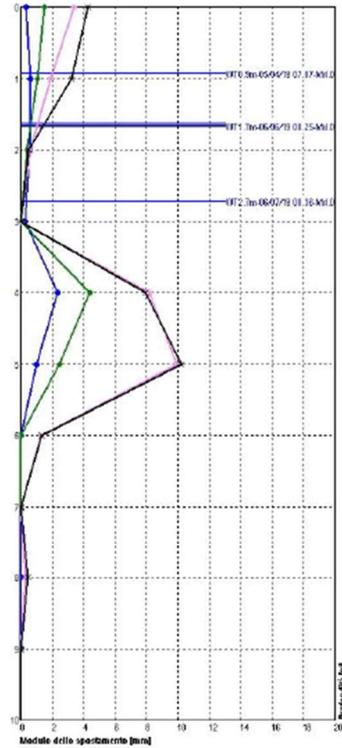
**Modulo dello spostamento cumulato**

Rif. lettura zero 11/03/2019



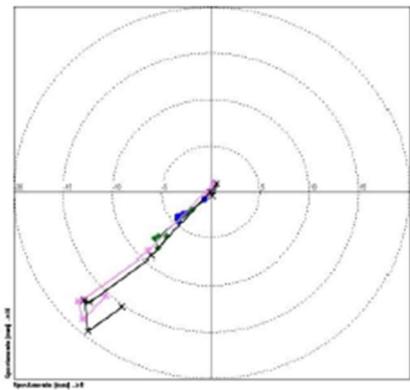
**Modulo dello spostamento differenziale**

Rif. lettura zero 11/03/2019



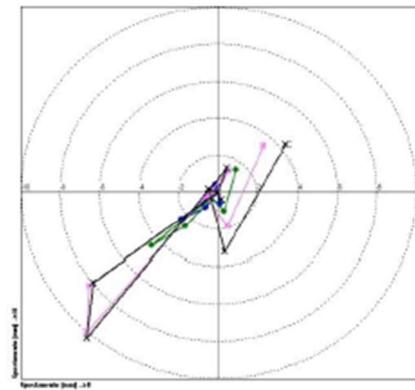
**Diagramma polare cumulato**

Rif. lettura zero 11/03/2019



**Modulo dello spostamento differenziale**

Rif. lettura zero 11/03/2019



**Legenda:**  
 06 Luglio 2019 00:36 — 06 Giugno 2019 00:25 — 03 Maggio 2019 16:04 — 05 Aprile 2019 07:07 — 11/03/2019

Figura 5: Grafici spostamenti differenziali e cumulativi e relativi vettori di spostamento per l'inclinometro SF DMS.

Il diagramma degli spostamenti differenziali rileva in particolare una zona di scivolamento a profondità compresa tra 4-6 m. p.c., direzione 230°N che ha raggiunto 18 mm. Il diagramma dell'andamento dello spostamento nel settore 4-6 m. p.c., direzione 230°N, evidenzia 8 micro-eventi registrati nel breve periodo di osservazione. In particolare spostamenti progressivi di maggiore entità sono stati osservati a partire dal 4 aprile ore 09.50 a.m. fino al 8 aprile ore 3 a.m.; il trend massimo giornaliero durante l'evento è stato di 4.60 mm/d (ore 17 - ore 24 del 4 aprile), in progressiva attenuazione nei giorni successivi.

Dopo l'evento principale, riattivazioni sono state registrate in particolare nei seguenti periodi: 14-15/04, 23-24/04, 04-06/05, 09-13/05, 20-21/05, 29/05-02/06. I trend massimi relativi di spostamento registrati in questi periodi sono stati rispettivamente di 3.5 mm/d in data 09 maggio e 2.8 mm/d in data 29/05 (Figura 6).

#### Variazioni dei livelli di falda nel versante

Comparando il dato di spostamento con il monitoraggio piezometrico WT1 si è osservato l'innalzamento contestuale della falda durante il primo evento a partire dal 04 Aprile ore 08 a.m. con un massimo raggiunto nella stessa data di -0.85 m. p.c. alle ore 21, data da cui si attenua progressivamente anche l'entità dei micro-spostamenti (Figura 6).

Il monitoraggio piezometrico WT1 ha rilevato l'innalzamento contestuale della falda in tutti gli eventi di spostamento con un massimo nel periodo complessivo di osservazione raggiunto di -0.6 m. p.c. in data 29 maggio ore 11; massimi relativi sono raggiunti nelle date 15/04 ore 1am e 25/04 ore 1am, 04/05 con valore coincidente di -1.20 m. p.c.; in data 04/05 ore 05am e 05/05 ore 22 con valore coincidente -1 m. p.c., ed in data 09/05 ore 9 con valore -0.85 m. p.c.

A partire dal 29/05 ore 12 il trend evidenzia decrescita dei valori piezometrici che hanno ora raggiunto -2.7 m. p.c.; la variazione massima riscontrata della piezometrica durante il periodo di osservazione è di 2.1m c.a.

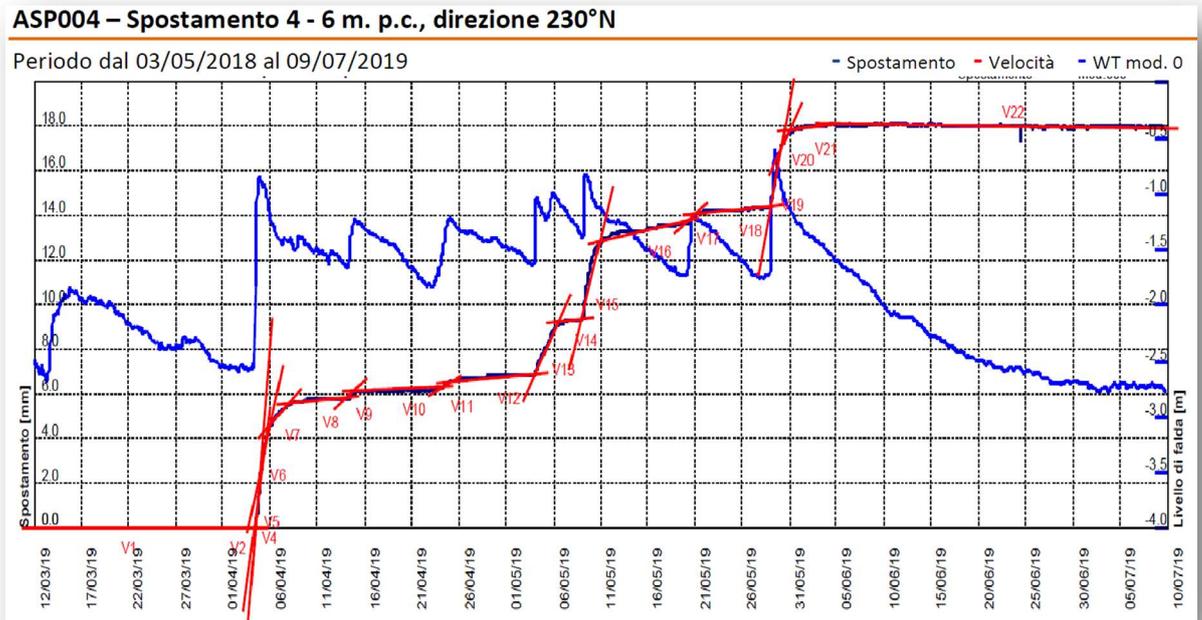


Figura 6: Grafico del modulo di spostamento (in blu scuro) con indicazione delle velocità (in rosso) e dell'andamento della posizione della falda (blu elettrico) per l'inclinometro SF DMS.

#### 4.1.2 SF MUMS

Nella colonna inclinometrica SF MUMS il periodo di stabilizzazione iniziale è terminato il 13 marzo 2019, mentre il periodo di *baseline measure* risulta compreso fra 13 marzo e 2 aprile, nel quale si può identificare la misura di riferimento al 2 aprile 2019.

#### Spostamenti orizzontali

I dati di spostamento differenziale locale e cumulato rilevati dal sensore MEMS evidenziano, in direzione di massima pendenza, che gli spostamenti principali si attestano alle profondità di circa 8 e 4 metri (Figura 7).

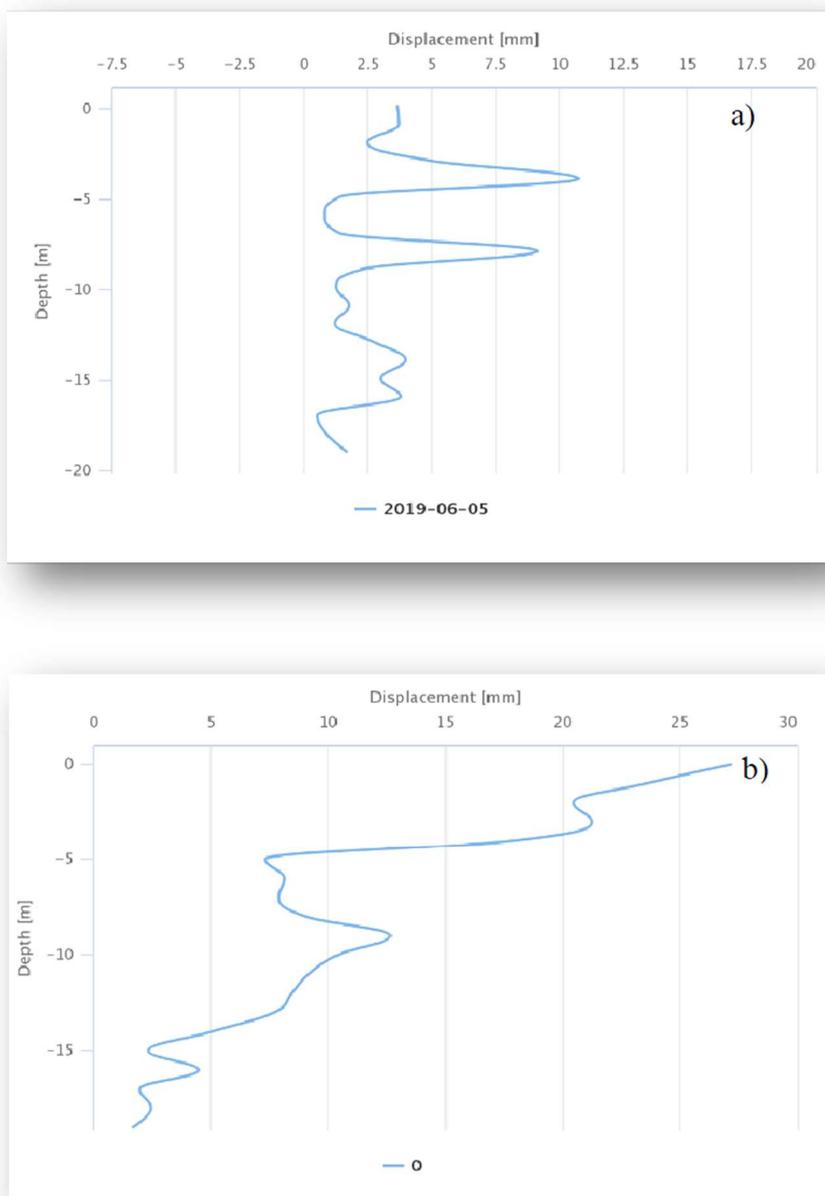


Figura 7: Confronto fra i dati di spostamento differenziale locale in direzione di massima pendenza registrati a) dal MEMS e b) dalla cella elettrolitica per l'inclinometro SF MUMS.

L'andamento nel tempo di tali spostamenti, evidenziano un comportamento di natura differente, dove a 8 metri di profondità si ha uno spostamento a velocità costante fino all'11 aprile, seguito da una fase intermedia stabile per circa due settimane, ed un nuovo trend (molto meno marcato rispetto al precedente) dal 5 al 13 maggio circa. Al contrario, a 4 metri di profondità si ha una situazione decisamente diversa, con accelerazioni locali in date ben precise e successivi periodi di stabilità (Figura 8). Le date di accelerazione

sono rispettivamente il 4-5 aprile, l'8-9 maggio (anticipato in parte fra il 3 ed il 4) ed il 28-30 maggio. L'azimut degli spostamenti cumulati in testa calcolato a partire dalla data di zero è pari a circa 150°.

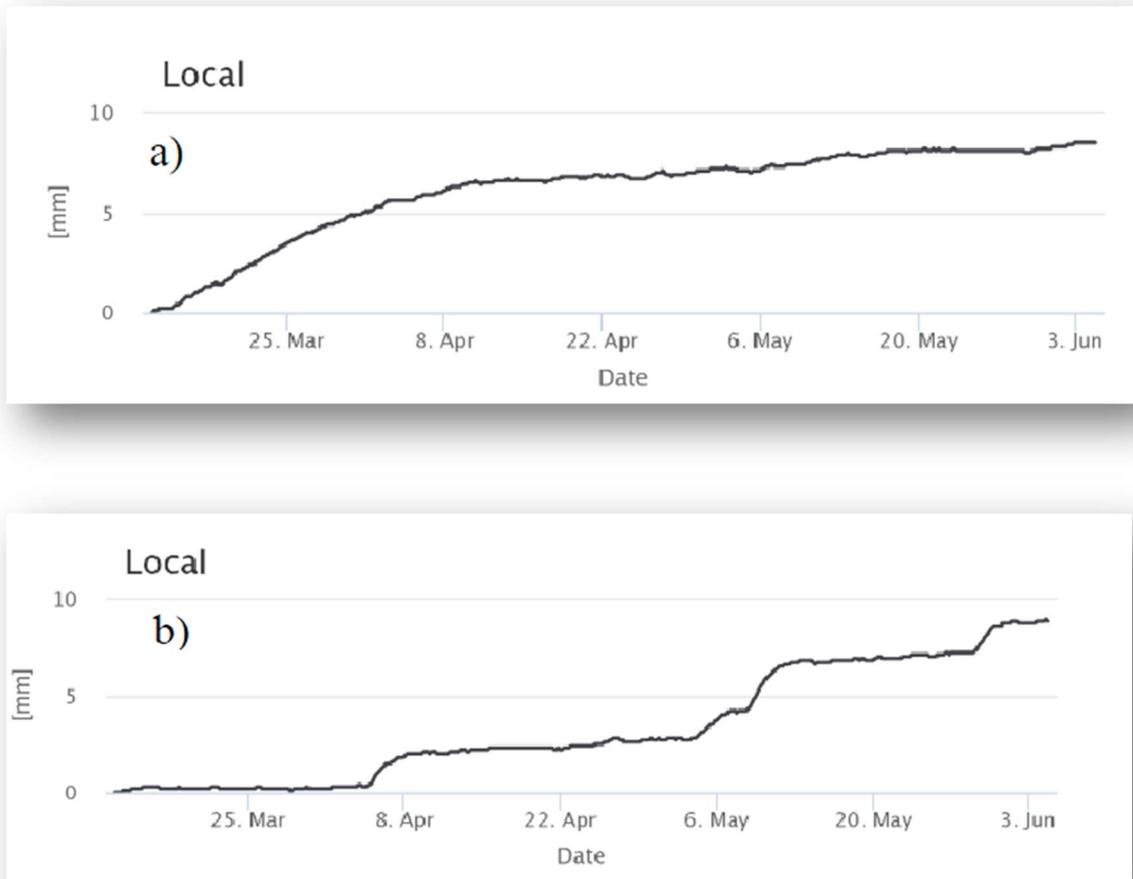


Figura 8: Andamento nel tempo degli spostamenti locali registrati a a) 8 e b) 4 m di profondità (MEMS) per l'inclinometro SF MUMS.

#### Variazioni del livello di falda

Per quanto riguarda i livelli idrici e la pressione assoluta registrati dal piezometro posto alla profondità di 15 metri, si osserva inizialmente la presenza di una falda ad una profondità di soli 0.5 metri, immediatamente al di sotto del piano campagna, seguito poi da valori corrispondenti a una falda praticamente a piano campagna (probabilmente in pressione). Tale risultato è confermato anche da fuoriuscite d'acqua che, durante la messa in opera dello strumento, hanno causato il riempimento del foro inclinometrico.

Confrontando gli spostamenti differenziali locali registrati a 8 e 4 metri di profondità ed il livello della falda idrica (Figura 9), si può apprezzare una precisa corrispondenza fra le accelerazioni degli spostamenti superficiali (4 metri di profondità) e l'aumento delle pressioni interstiziali negli eventi del 4-5 aprile e del 28-30

maggio.

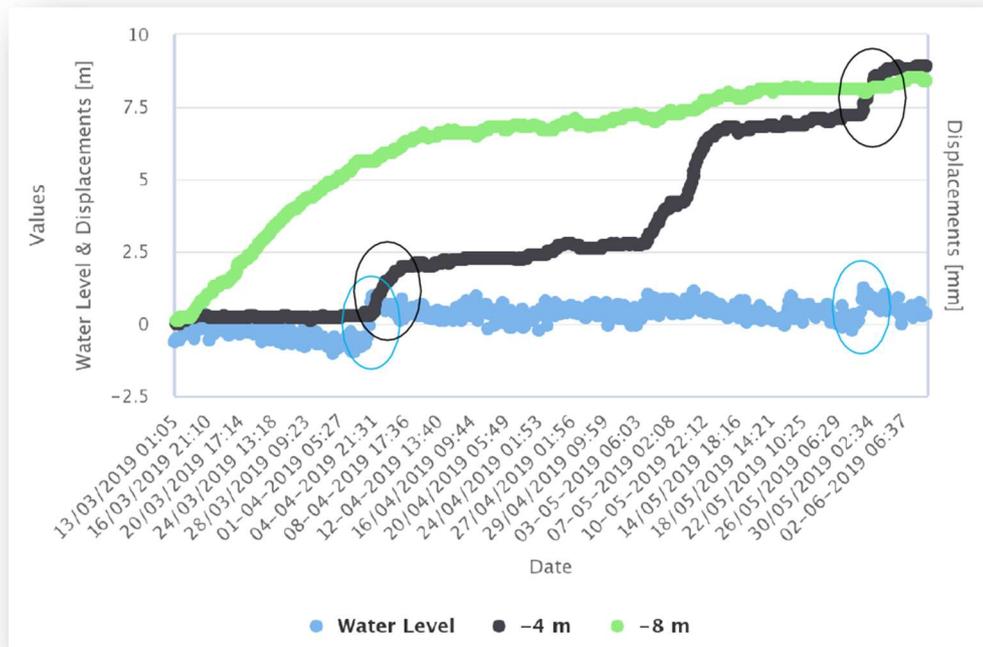


Figura 9: Confronto fra spostamenti differenziali locali alla profondità di 8 e 4 metri e livello idrico per l'inclinometro SF MUMS.

## 4.2 SETTORE INCLINOMETRO SG MUMS

### 4.2.1 SG MUMS

Nella colonna inclinometrica SG MUMS il periodo di stabilizzazione iniziale è terminato il 18 marzo 2019, mentre il periodo di baseline measure risulta compreso fra 25 marzo e 1 aprile, nel quale si può identificare la misura di riferimento all'1 aprile 2019.

#### Spostamenti orizzontali

I dati di spostamento differenziale locale e cumulato rilevati dal sensore MEMS evidenziano, in direzione di massima pendenza, una superficie di scivolamento principale a circa 7 metri di profondità (Figura 10).

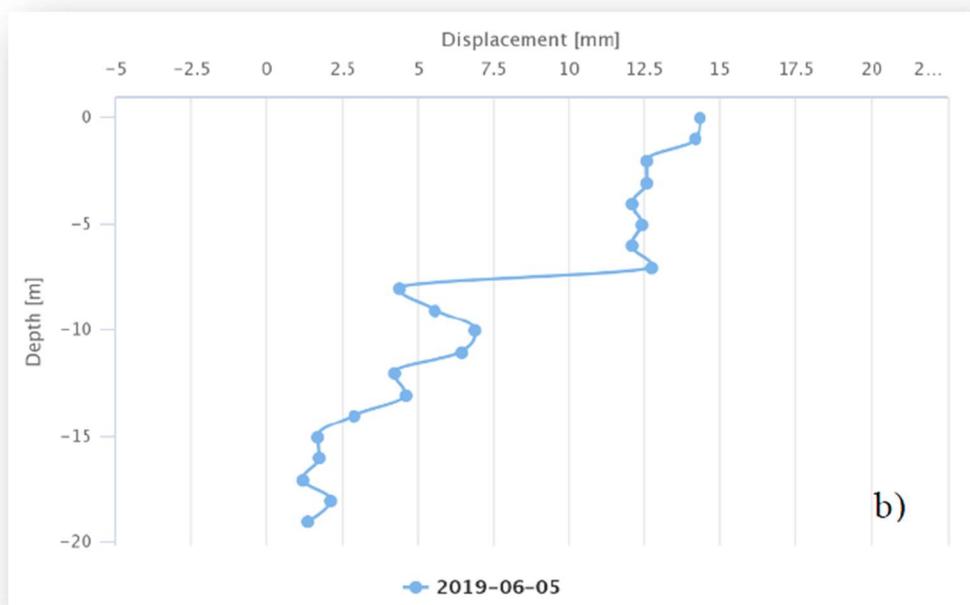
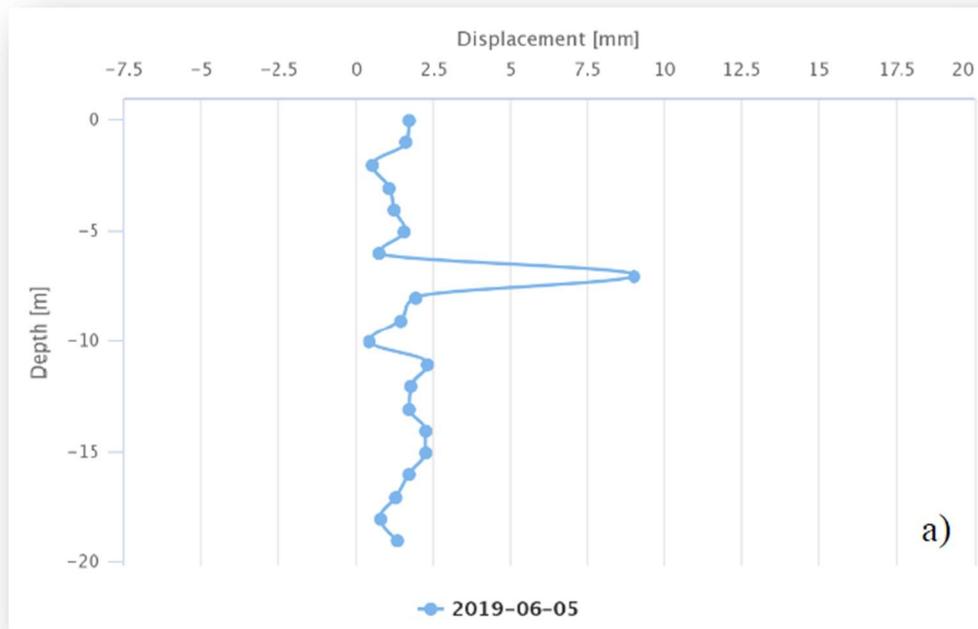


Figura 10: Confronto fra i dati di spostamento differenziale locale in direzione di massima pendenza registrati a) dal MEMS e b) dalla cella elettrolitica per l'inclinometro SG MUMS.

L'andamento nel tempo di tali spostamenti, evidenziano accelerazioni locali in corrispondenza del 3 aprile,

con conclusione l'8 aprile, e nei periodi 3-6 maggio, 8-13 maggio (Figura 11).

L'azimut degli spostamenti cumulati in testa calcolato a partire dalla data di zero è pari a circa 151°.

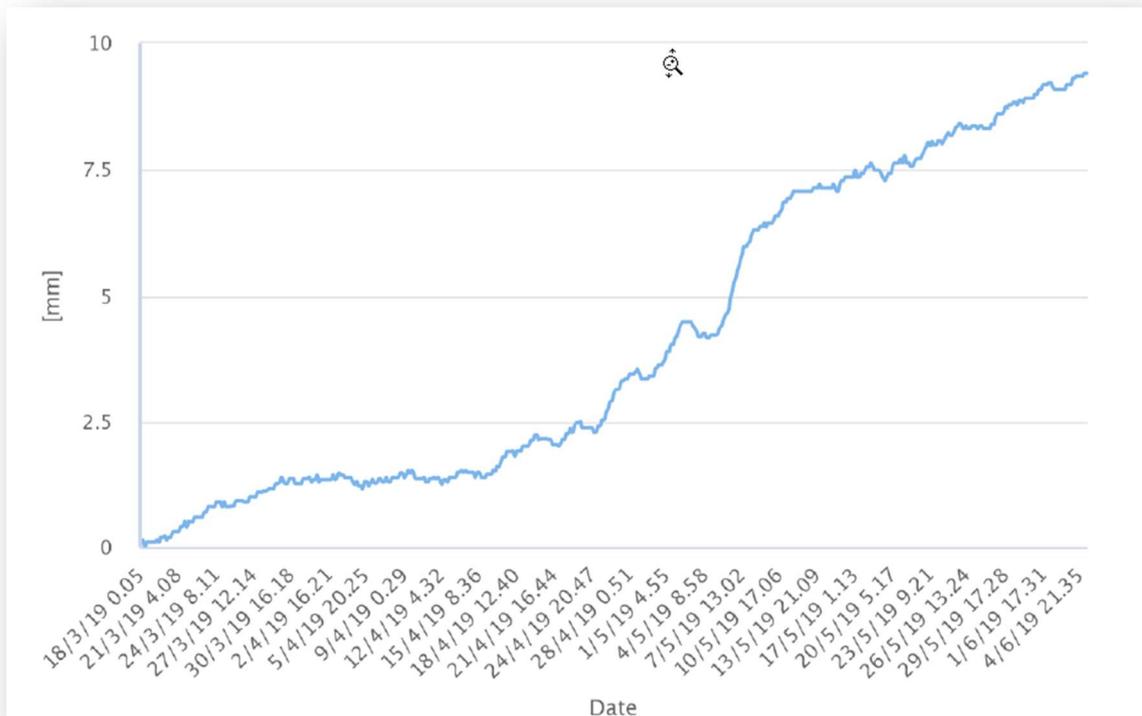


Figura 11: Andamento nel tempo degli spostamenti locali registrati a 7 metri di profondità (MEMS) per l'inclinometro SG MUMS.

### Variazioni del livello di falda

Per quanto riguarda i livelli idrici e la pressione assoluta registrati dal piezometro posto alla profondità di 15 metri, i dati mostrano un iniziale dissipazione dell'acqua presente nel foro inclinometrico durante la fase di installazione, fino al raggiungimento di un livello costante, con locali variazioni, attestabile su circa 8 metri di profondità.

Confrontando gli spostamenti differenziali locali registrati a 7 metri di profondità ed il livello della falda idrica (Figura 12), non si rilevano corrispondenze evidenti fra le fasi di accelerazione dello spostamento e l'oscillazione del livello idrico.

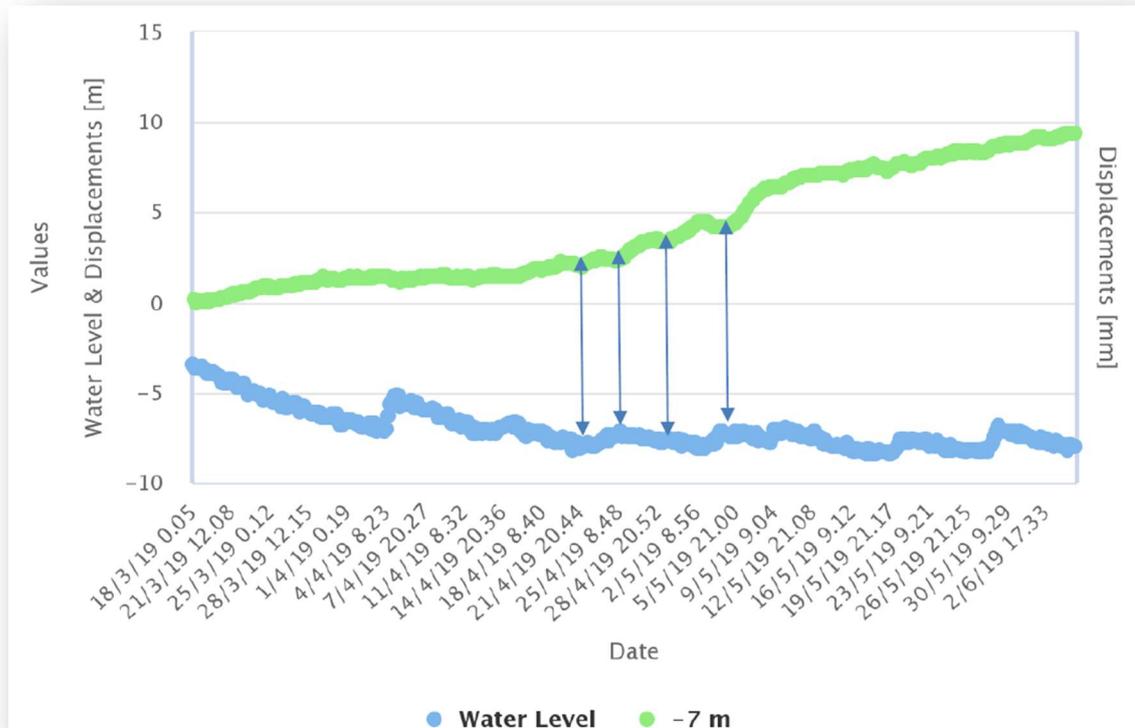


Figura 12: Confronto fra spostamenti differenziali locali alla profondità di 7 metri e livello idrico per l'inclinometro SG MUMS.

#### 4.3 SETTORE INCLINOMETRO SE DMS

##### 4.3.1 SE DMS

La colonna SE DMS è multi-parametrica e consente di monitorare in continuo e in tempo reale gli spostamenti orizzontali e le variazioni piezometriche e di temperatura nell'intervallo di profondità 0-25 m p.c.. La colonna è dotata di un packer posizionato a profondità di 14m tra i piezometri collocati a profondità rispettivamente di 10 e 20 m. p.c.

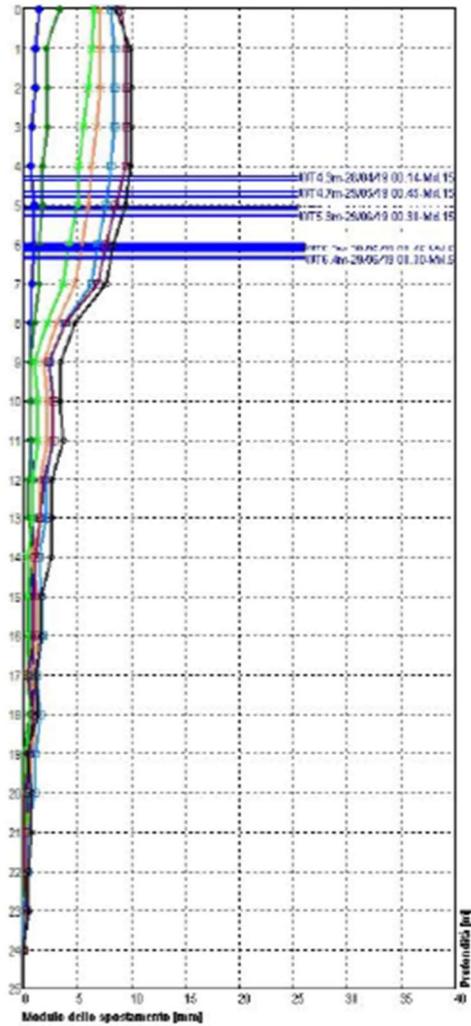
La strumentazione è stata installata in data 29/11/2018, la data della lettura zero di riferimento è del 05/12/2018 e l'ultima lettura è stata eseguita in data 29/06/2019.

##### Spostamenti orizzontali

Per quanto riguarda gli spostamenti orizzontali, la colonna presenta alla data del 29/06/2019 uno spostamento cumulato in testa di 8 mm, riferito alla lettura zero del 05/12/2018 (Figura 13).

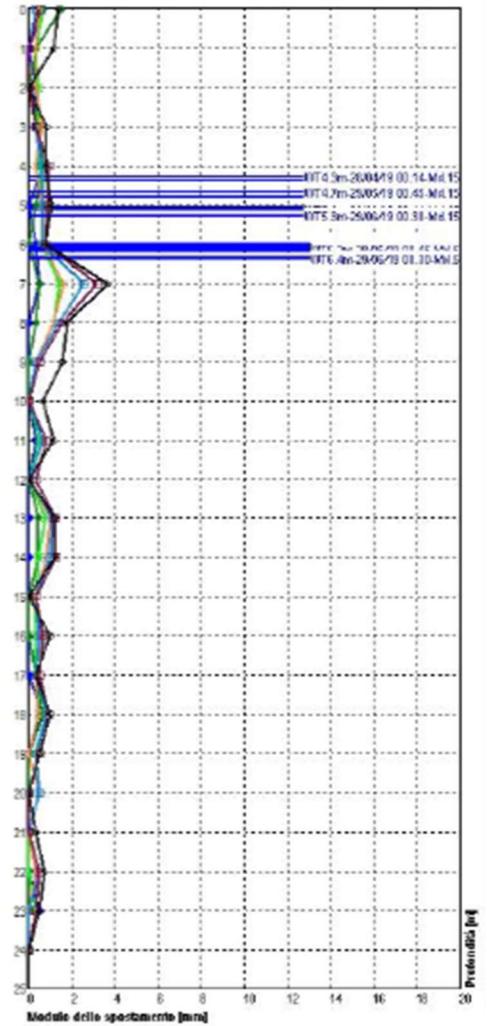
**Modulo dello spostamento cumulato**

Rif. lettura zero 05/12/2018



**Modulo dello spostamento differenziale**

Rif. lettura zero 05/12/2018



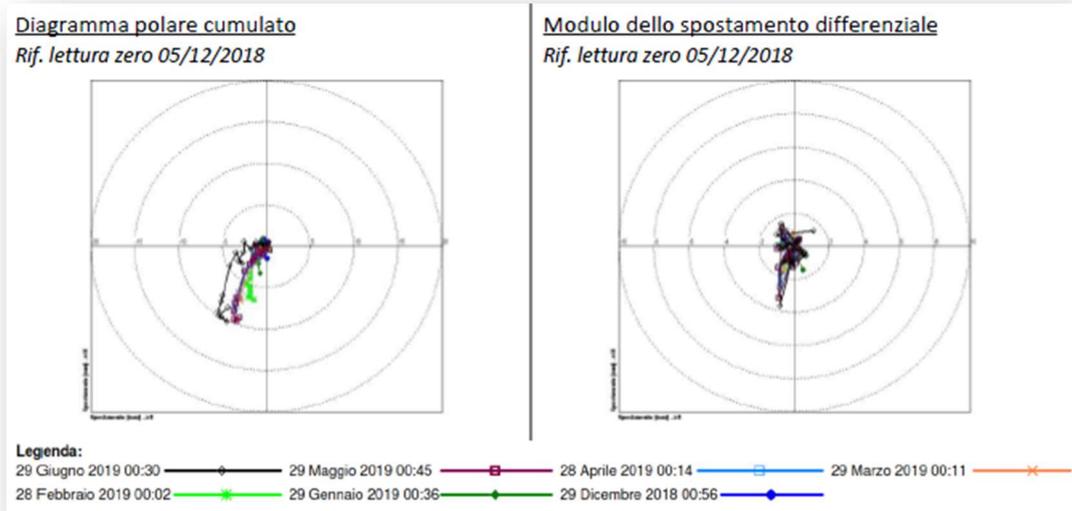


Figura 13: Grafici spostamenti differenziali e cumulativi e relativi vettori di spostamento per l'inclinometro SD DMS.

Il diagramma degli spostamenti differenziali rileva variazioni in particolare alla profondità compresa tra 7-9 m. p.c., con direzione  $210^{\circ}N$  che hanno raggiunto 5mm. Nel diagramma dell'andamento dello spostamento nel tempo nella zona 7-9 m. p.c., direzione  $210^{\circ}N$ , a partire dall'avvio del monitoraggio, si evidenziano microspostamenti in particolare attivatisi in 5 periodi, rispettivamente nelle date: 21-25/12/2018, 01-07/02/2019, 05-07/04/2019, 06-11/05/2019 e 29-31/05/2019.

Nel periodo osservato i microspostamenti di maggiore intensità si riferiscono all'evento di febbraio (01-04/02/2019) dove è stata registrata una velocità media di 0.5mm/giorno; il secondo evento per intensità è stato registrato nel periodo di aprile 05-07/04/2019 con velocità media 0.3 mm/giorno (Figura 14).

#### Variazioni del livello di falda

Comparando i dati di spostamento nella zona a profondità compresa tra 7-9 m con il monitoraggio piezometrico WT1 e WT2 si osserva l'innalzamento contestuale della falda più superficiale (WT1 mod id 15 posto a profondità di 10m) a partire dal 01 Febbraio ore 03am con un massimo di - 3.5m. p.c. raggiunto in data 04/02, data in cui si attenua anche la velocità dei micro-spostamenti a 0.13mm/giorno. La variazione massima riscontrata della piezometrica durante l'evento è di 1.70m che prossima alla variazione massima osservata nell'intero periodo di monitoraggio (delta=2m). Variazioni piezometriche di rilievo sono osservate sempre dal monitoraggio della falda superficiale a partire dal 04 aprile ore 12 a.m. con un massimo relativo raggiunto in data 05 aprile ore 22 (-3.85 m. p.c.) con delta 1.55m; a partire dalla stessa data si attenuano anche i micro-spostamenti (Figura 14).

Per quanta riguarda la rilevazione piezometrica di WT2 (mod id 05 posto alla profondità di 20 m), separato

da packer, il sensore ha registrato variazioni di entità decisamente minore, con  $\Delta = 0.5\text{m}$  nel primo evento (ritardo di 40h rispetto alla risalita di WT1) e  $\Delta = 0.25\text{ m}$ , nel secondo evento; il trend si inverte a partire dal 07/04 rispetto al piezometro più superficiale.

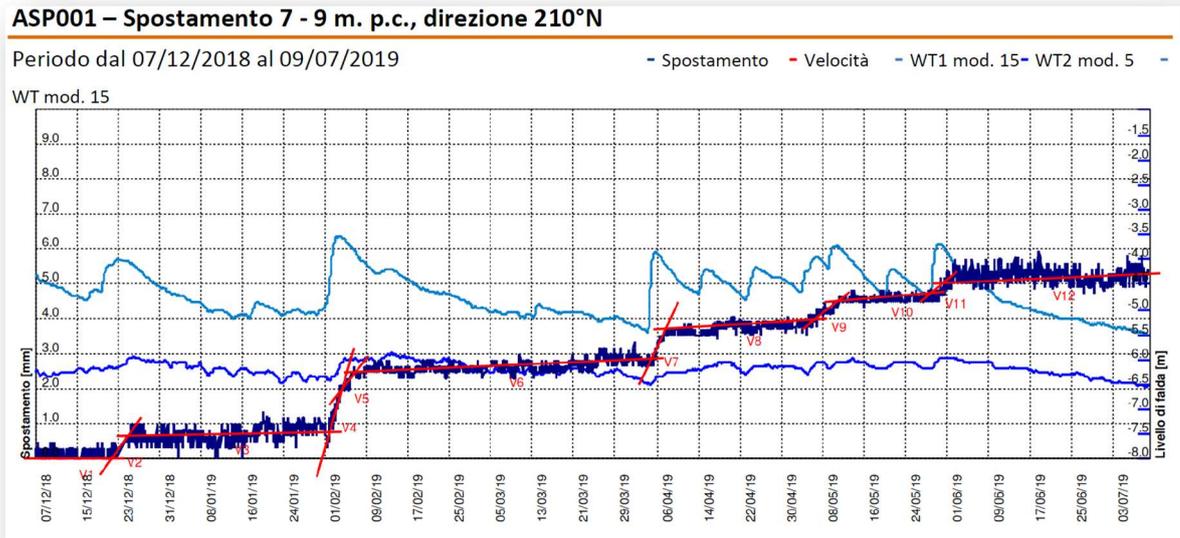


Figura 14: Grafico del modulo di spostamento (in blu scuro) con indicazione delle velocità (in rosso) e dell'andamento della posizione della falda (in azzurro e blu elettrico) per l'inclinometro SF DMS.

#### 4.4 SETTORE INCLINOMETRO SC MUMS

##### 4.4.1 SC MUMS

Nella colonna inclinometrica SC MUMS il periodo di stabilizzazione iniziale è terminato il 13 dicembre 2018, mentre il periodo di *baseline measure* risulta compreso fra 13 dicembre e 6 gennaio, nel quale si può identificare la misura di riferimento al 6 gennaio 2019, con un assetamento cumulato in testa pari a 7.40 mm.

##### Spostamenti orizzontali

I dati di spostamento differenziale locale e cumulato rilevati dal sensore MEMS evidenziano, in direzione di massima pendenza, uno spostamento principale alla profondità di 15 m di profondità (Figura 15), ed una fascia di movimenti compresi fra 10 e 6 m di profondità.

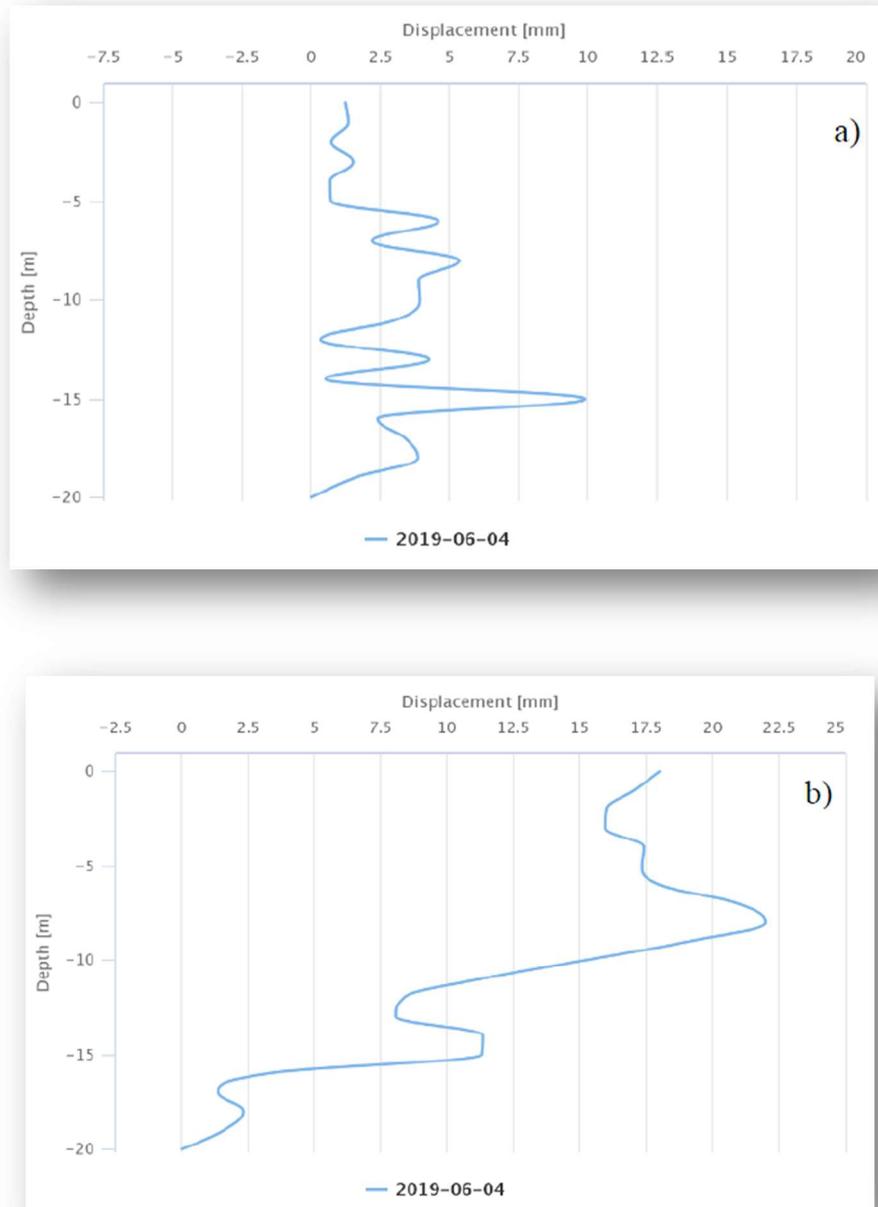


Figura 15: Spostamenti differenziali locali e cumulati in direzione di massima pendenza registrati dai Tilt Link HR 3D V per l'inclinometro SC MUMS.

A 15 metri di profondità lo spostamento ha seguito un andamento progressivo fino all'11 marzo, con una significativa accelerazione in corrispondenza del 9 marzo (Figura 3315).

Nella fascia compresa fra 10 e 6 metri di profondità si è invece assistito ad un comportamento caratterizzato da due trend di spostamento costante, con una leggera accelerazione nel periodo compreso fra il 9 e circa

il 20 marzo. In particolare, vi è una perfetta corrispondenza di trend fra le coppie di sensori 19-21 e 23-27 (Figura 3416).

Il maggior spostamento locale è stato registrato ad una profondità di 15 m ed è pari a 9.89 mm. Lo spostamento cumulato in testa risulta pari a 18 mm.

L'azimut degli spostamenti cumulati in testa calcolato a partire dalla data di zero è pari a circa 209°.

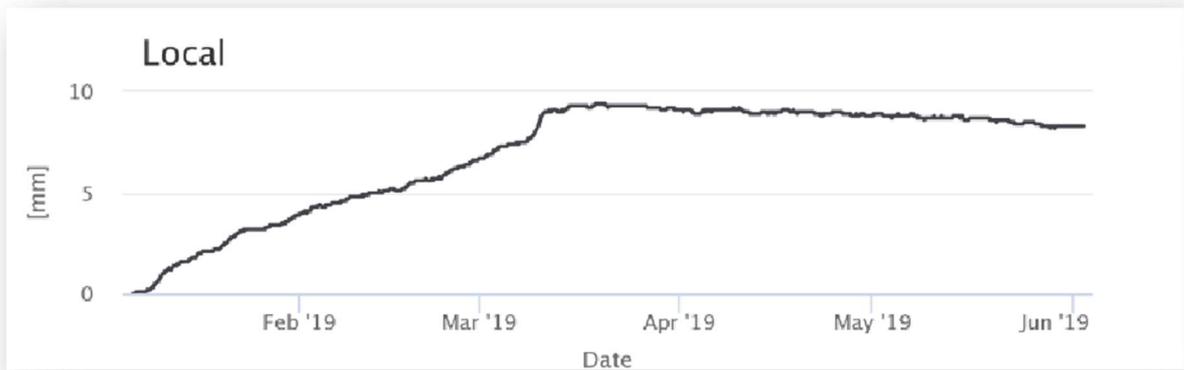
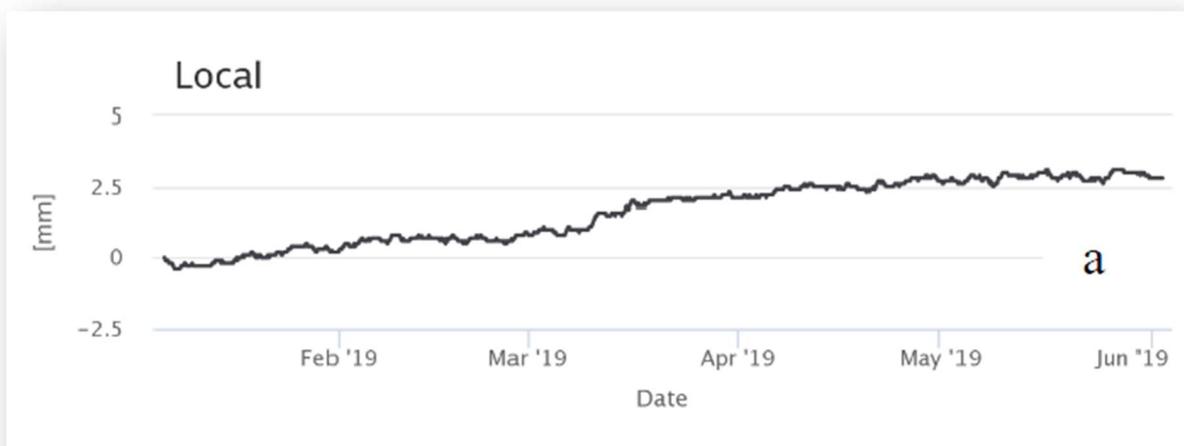


Figura 16: Andamento nel tempo degli spostamenti differenziali locali in direzione di massima pendenza registrati a 15 m di profondità per l'inclinometro SC MUMS.



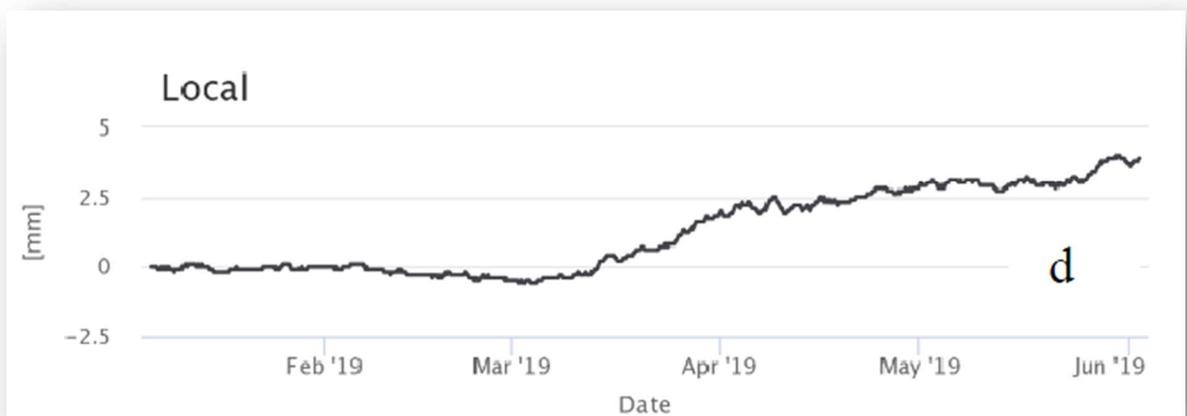
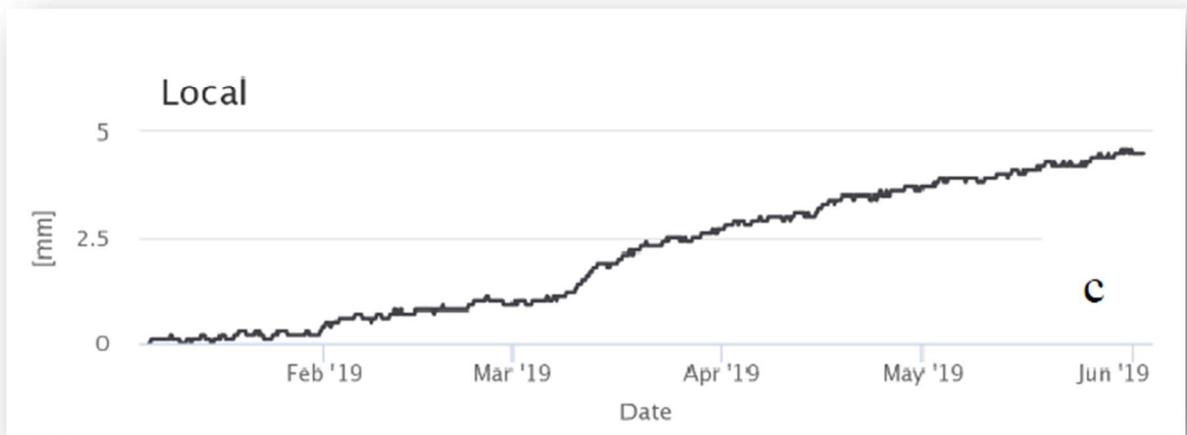
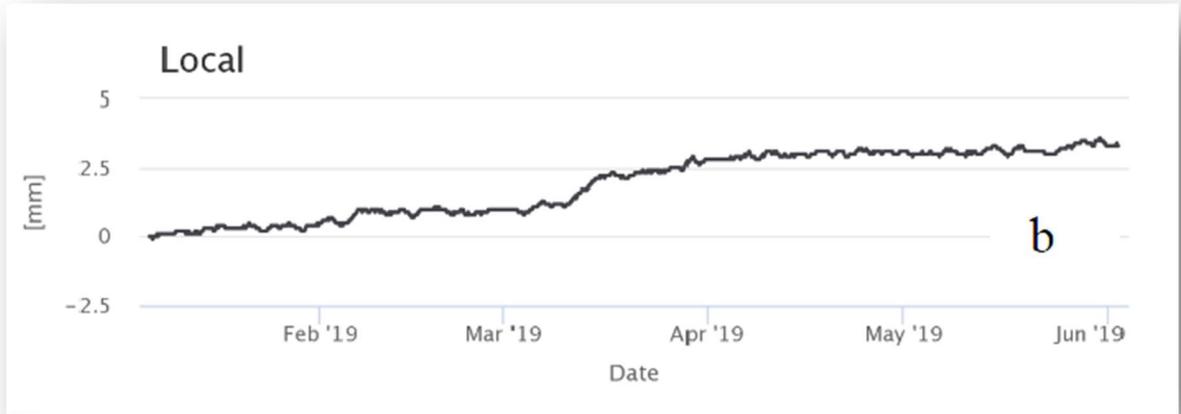


Figura 17: Andamento nel tempo degli spostamenti differenziali locali in direzione di massima pendenza registrati rispettivamente alle profondità di a) 10, b) 9, c) 8 e d) 6 m per l'inclinometro SC MUMS.

#### Variazioni del livello di falda

Per quanto riguarda i livelli idrici e la pressione assoluta registrati dai due piezometri, posti rispettivamente alla profondità di 13 metri e 19 metri, il sensore collocato a 13 metri di profondità rileva la presenza di una falda ad una quota variabile tra 5 metri e 6 metri dal piano campagna, con andamento lievemente crescente. Il secondo sensore, nonostante si trovi ad una profondità maggiore, registra la presenza di acqua ad una profondità pari a piano campagna. Questo risultato è probabilmente dovuto alla presenza di uno strato intermedio di terreno impermeabile che separa i due strumenti generando una discontinuità idraulica tale da condizionare i valori rilevati al piezometro più profondo, con alta probabilità in pressione. Confrontando lo sviluppo nel tempo del valore di falda ed i principali spostamenti locali (Figura 18), non si rilevano relazioni dirette tra falda e spostamenti, probabilmente in ragione del fatto che non si è assistito a significativi aumenti delle pressioni interstiziali.

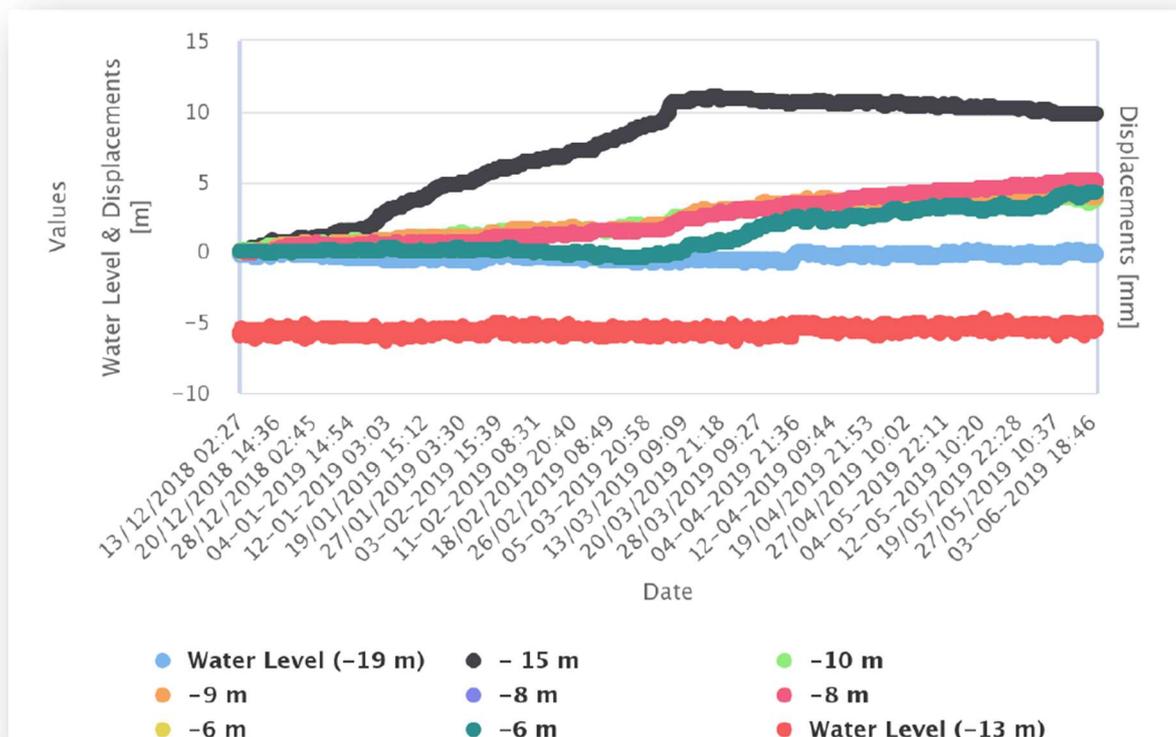


Figura 18: Confronto fra i principali spostamenti differenziali locali e livello della falda idrica registrata dai due piezometri per l'inclinometro SC MUMS.

#### 4.5 SETTORE INCLINOMETRO SD DMS

##### 4.5.1 SD DMS

La colonna SD DMS è multi-parametrica e consente di monitorare in continuo e in tempo reale gli spostamenti orizzontali e le variazioni piezometriche e di temperatura nell'intervallo di profondità 0-25 m p.c.. La colonna è dotata di un packer posizionato a profondità di 14m tra i piezometri collocati a profondità rispettivamente di 10 e 20 m. p.c.

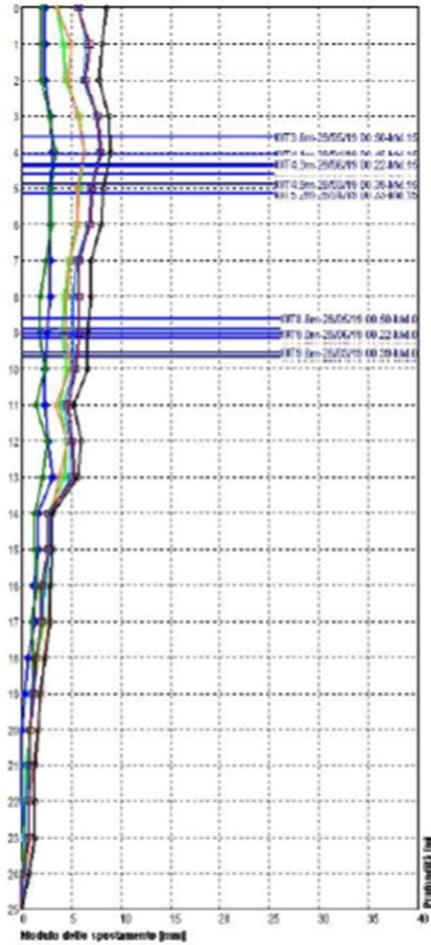
La strumentazione è stata installata in data 28/11/2018, la data della lettura zero di riferimento è del 05/12/2018 e l'ultima lettura è stata eseguita in data 29/06/2019.

##### Spostamenti orizzontali

Per quanto riguarda gli spostamenti orizzontali, la colonna presenta alla data del 29/06/2019 uno spostamento cumulato in testa di 8 mm, riferito alla lettura zero del 05/12/2018 (Figura 19).

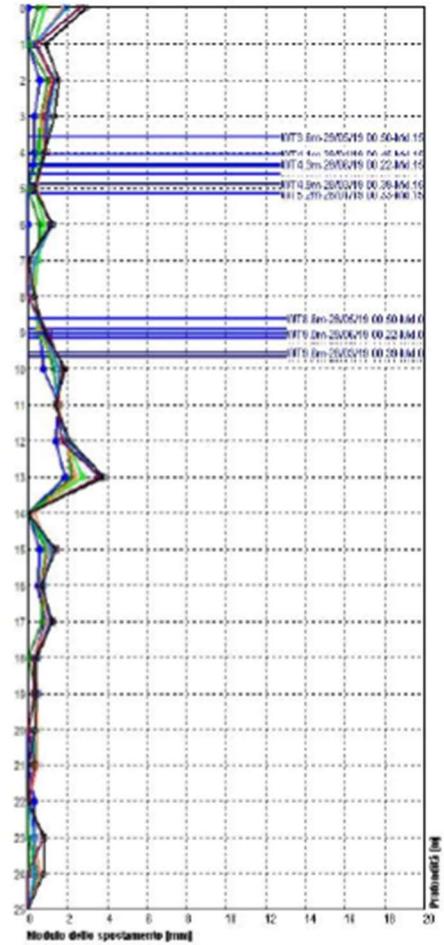
**Modulo dello spostamento cumulato**

Rif. lettura zero 05/12/2018



**Modulo dello spostamento differenziale**

Rif. lettura zero 05/12/2018



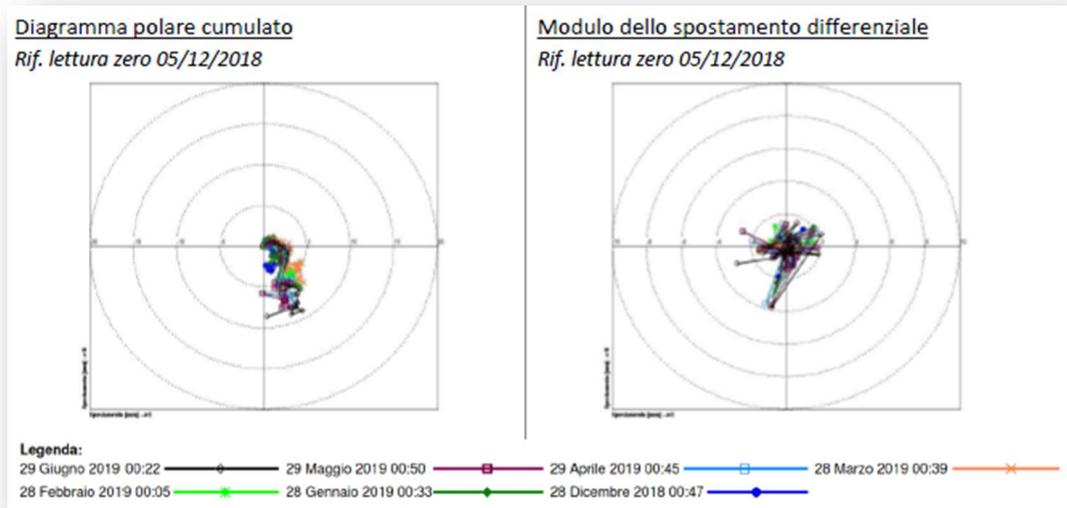


Figura 19: Grafici spostamenti differenziali e cumulativi e relativi vettori di spostamento per l'inclinometro SD DMS.

Il diagramma degli spostamenti differenziali rileva variazioni in particolare a profondità compresa tra 13-14 m. p.c., direzione 200°N, che hanno raggiunto 4 mm. Nel diagramma dell'andamento dello spostamento nella zona 13-14 m. p.c., direzione 200°N, si osservano micro-spostamenti in particolare nei seguenti periodi: 06- 30/12/2018, 01/-06/04/2019; è in particolare nel secondo periodo che si registra la velocità media maggiore con 0.17mm/g (Figura 20).

#### Variazioni del livello di falda

Per quanto riguarda la rilevazione piezometriche WT1 (mod id 15 posto alla profondità di 10 m) e WT2 (mod id 0 posto alla profondità 25m) separato da packer hanno registrato nel periodo di monitoraggio valori massimi rispettivamente di -3.2 e -8.30 m. p.c. in data 01/06/2019 e delta nel periodo di osservazione rispettivamente di 2 e 1.6 m (Figura 20).

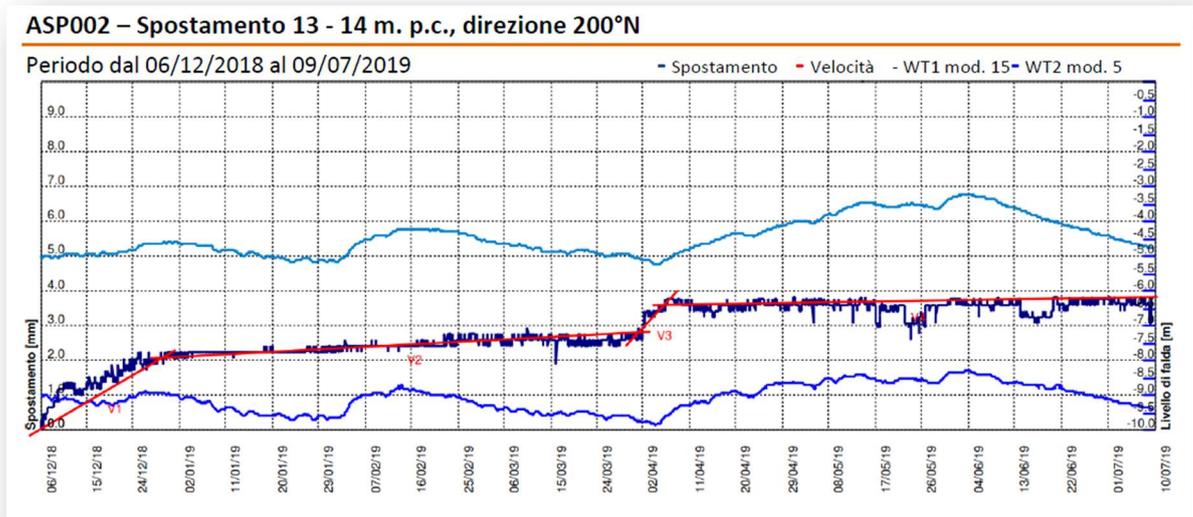


Figura 20: Grafico del modulo di spostamento (in blu scuro) con indicazione delle velocità (in rosso) e dell'andamento della posizione della falda (in azzurro e blu elettrico) per l'inclinometro SD DMS.

## 4.6 SETTORE INCLINOMETRI SA DMS E SA MUMS

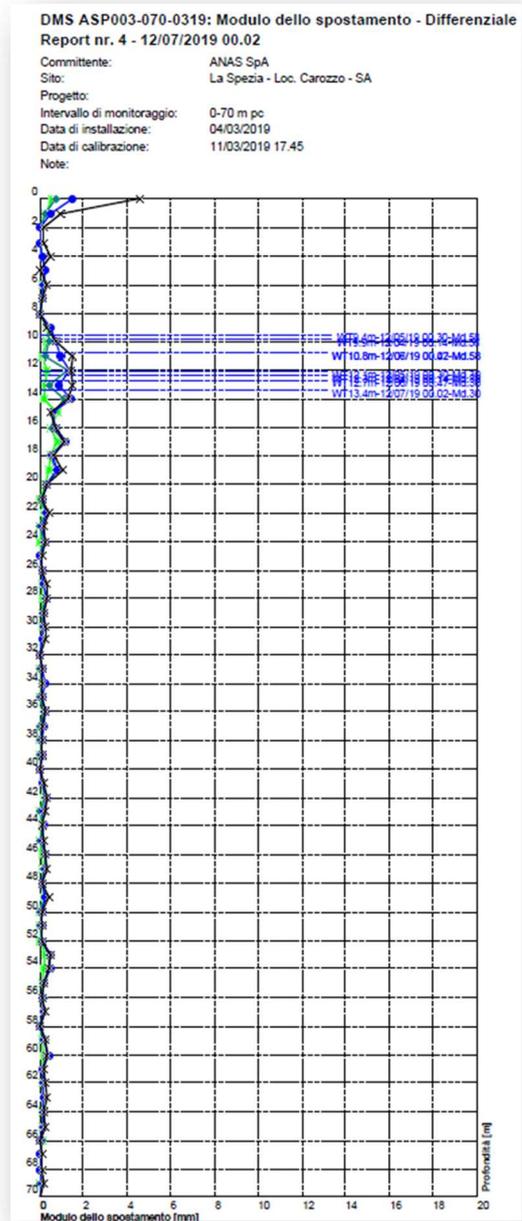
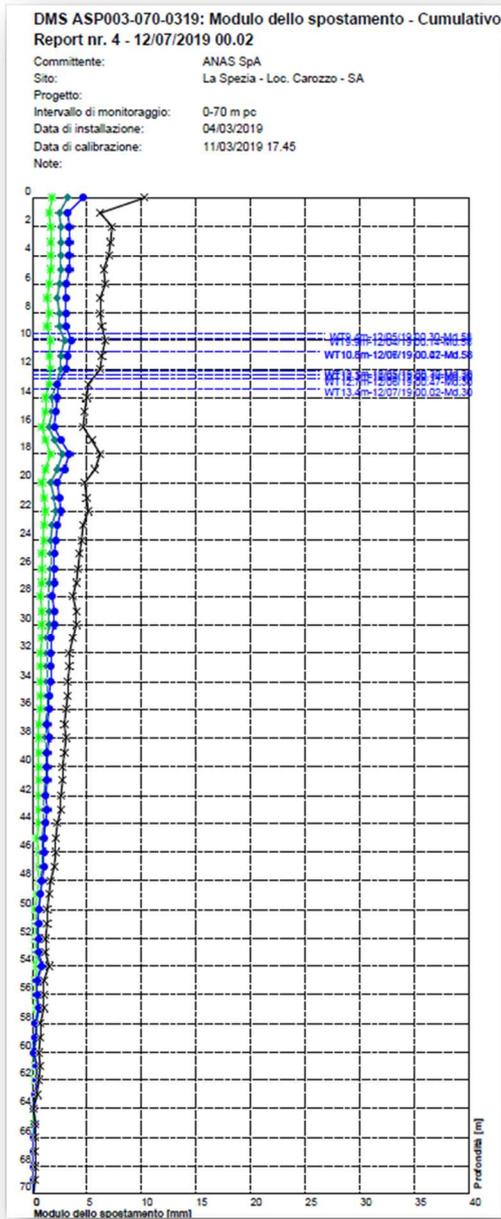
### 4.6.1 SA DMS

La colonna SA DMS è multi-parametrica, attrezzata con un sensore di spostamento particolarmente sensibile e consente di monitorare in continuo e in tempo reale gli spostamenti orizzontali, le variazioni piezometriche, accelerometriche e di temperatura nell'intervallo di profondità 0-70 m p.c.. La colonna è dotata di un packer posizionato a profondità di 13m tra i piezometri collocati a profondità rispettivamente di 12 e 40 m. p.c. La strumentazione è stata installata in data 04/03/2019, la data della lettura zero di riferimento è del 11/03/2019 e l'ultima lettura è stata eseguita in data 12/07/2019.

L'esigenza di un monitoraggio a queste profondità scaturisce dai dati di perforazione, in cui la presenza di un'ampia fascia di terreni fortemente disturbati ad elevata profondità, ha indotto a verificare la presenza di movimenti profondi di versante.

#### Spostamenti orizzontali

Per quanto riguarda gli spostamenti orizzontali, la colonna della lunghezza continua di 70 m presenta alla data del 12/07/2019 uno spostamento cumulato in testa di 10.3 mm rispetto alla lettura zero (11/03/2019) con direzione NE (Figura 21).



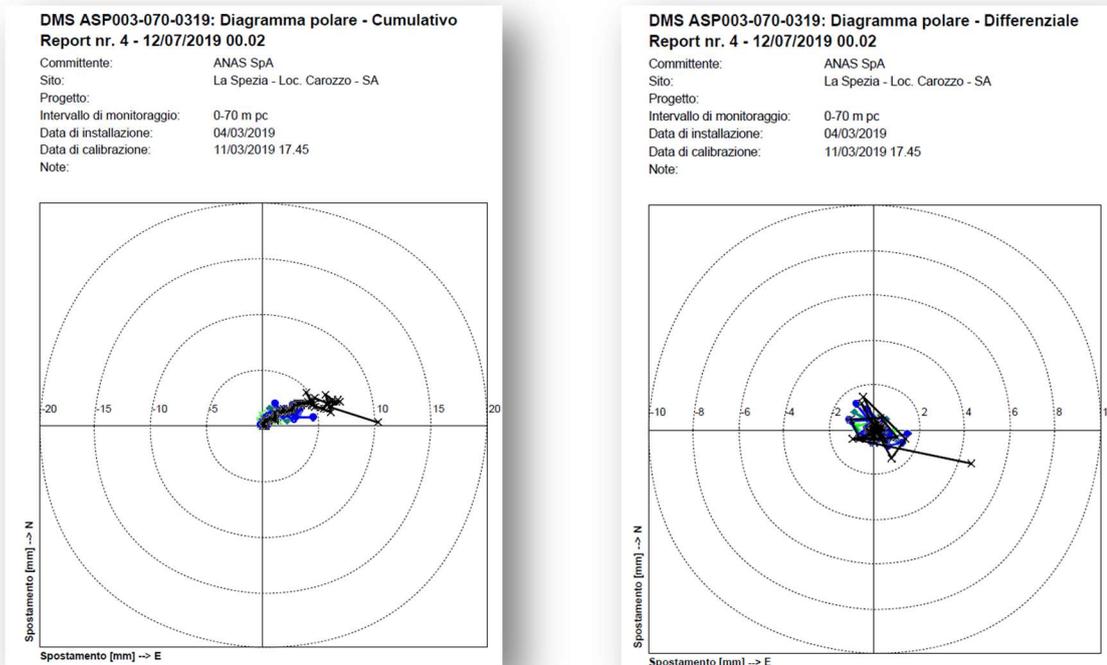


Figura 21: Grafici spostamenti differenziali e cumulativi e relativi vettori di spostamento per l'inclinometro SA DMS.

Il diagramma degli spostamenti differenziali rispetto alla lettura zero mostra variazioni locali entro 1.6 mm a profondità comprese tra 9-20 m. p.c., con un andamento a spirale associabile ad un assestamento tardivo della tubazione all'interno del diametro di perforazione; evidenze simili di minore entità sono riscontrabili a profondità compresa tra 53-55 m. p.c..

Pertanto, il monitoraggio ha escluso movimenti lenti di versante (*creeping da DGPV*), confermati dal nuovo modello geostrutturale emerso dalle indagini integrative.

#### Variazioni del livello di falda

Per quanto riguarda il monitoraggio piezometrico la colonna è dotata di 2 sensori di pressione posizionati rispettivamente a quota 12 m. p.c. e 40 m. p.c. separati da packer collocato a profondità di 13 m. p.c.; nel periodo di osservazione sono stati registrati in totale 7 eventi con innalzamento dei livelli in particolare nelle date 04/04, 17/04, 25/04, 07/05, 10/05, 20/05 e 29/05.

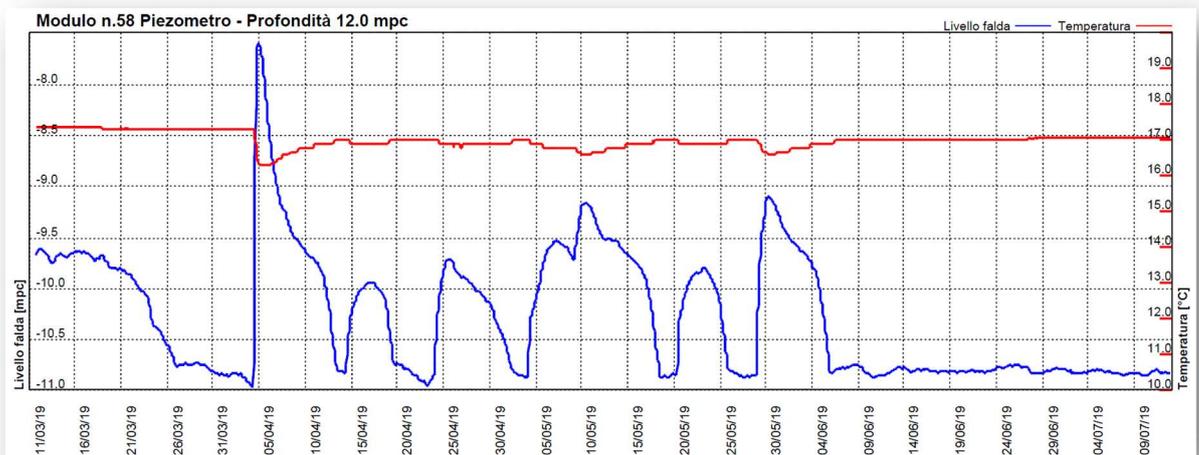
Le variazioni più significative sono state registrate a partire dal giorno 04/04/2019 ore 9 (WT1) e dopo circa 2 ore WT2 con un massimo raggiunto in WT1 nella stessa data alle ore 21 c.a. (- 7.6 m. p.c.). Il trend nelle ore seguenti si inverte per il WT1 mentre per il WT2 permane in crescita raggiungendo -12.3 m p.c.

La variazione massima riscontrata della piezometrica durante l'evento è +3.50m (WT1) mentre in WT1 la variazione raggiunta è +1m. Negli eventi meteorici che hanno caratterizzato il periodo successivo sono stati

raggiunti massimi relativi in WT1 compresi tra -9.1 -9.8 m. p.c. e delta di 1.6 m c.a.  
 In WT2 le variazioni sono di entità minore (0.45m) con un trend medio decrescente.

Variazioni di temperatura

Per quanto riguarda il log termico, i 70 trasduttori PT1000 in colonna evidenziano un gradiente positivo con temperature comprese tra 15°C in superficie e 18.8°C a 70m di profondità; per quanto riguarda le variazioni termometriche del periodo si osservano riduzioni rapide delle temperature in concomitanza degli eventi di precipitazione; si segnala in particolare la riduzione rapida delle temperature registrata durante l'evento meteorico dei primi giorni di aprile a partire dalle ore 12 del giorno 04/04, con un decremento massimo di -1.5°C (rispetto alle temperature medie) localizzato alla profondità di 9 m. p.c., per l'ingresso di acque più fresche. Negli eventi successivi le variazioni negative rilevate sempre in corrispondenza di WT1 sono di -0.3°C c.a (Figura 22).



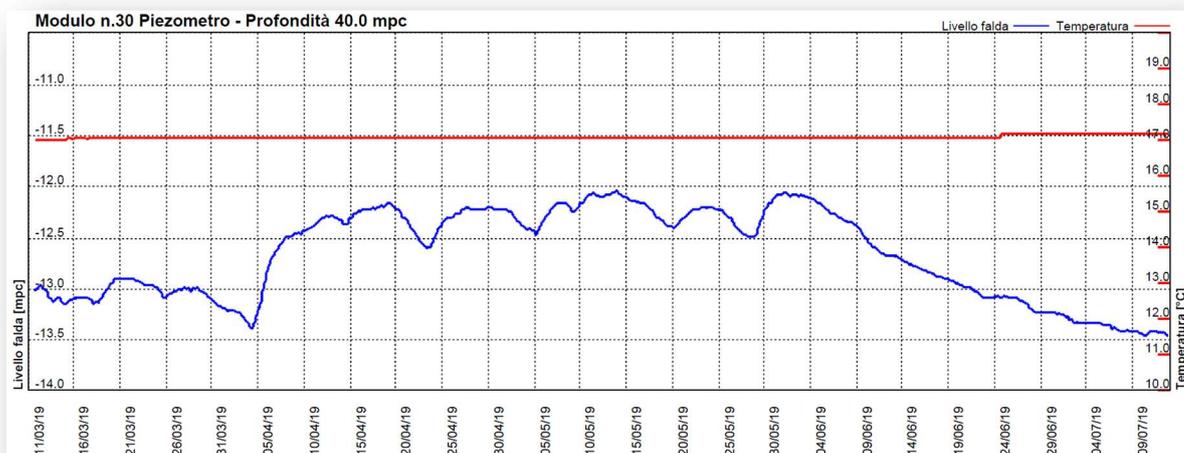


Figura 22: Grafici dell'andamento della posizione della falda (in blu) e della temperatura misurate rispettivamente nei sensori WT1 e WT2. Per l'inclinometro SA DMS.

#### 4.6.2 SA MUMS

Nella colonna inclinometrica SA MUMS, in seguito all'installazione e alla prima lettura occorsa il 6 marzo 2019 è possibile individuare la data di zero in corrispondenza dell'8 marzo 2019, mentre la data di riferimento può essere considerata il 23 marzo 2019.

#### Spostamenti orizzontali

I dati di spostamento differenziale locale e cumulato rilevati dal sensore MEMS evidenziano, in direzione di massima pendenza, una fascia di spostamento compresa fra circa 17 e 13.8 m di profondità (Figura 23).

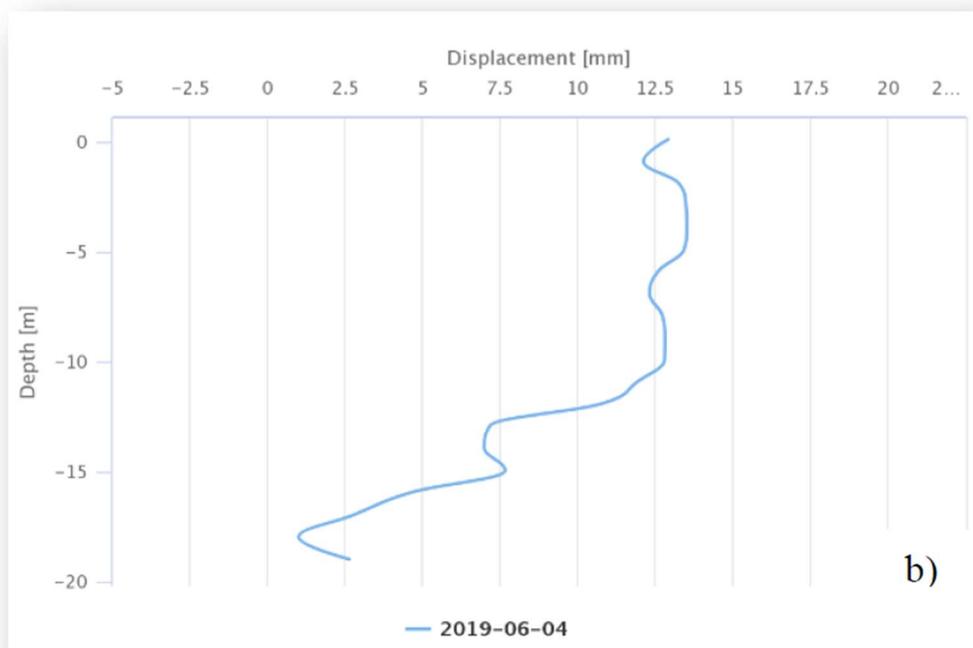
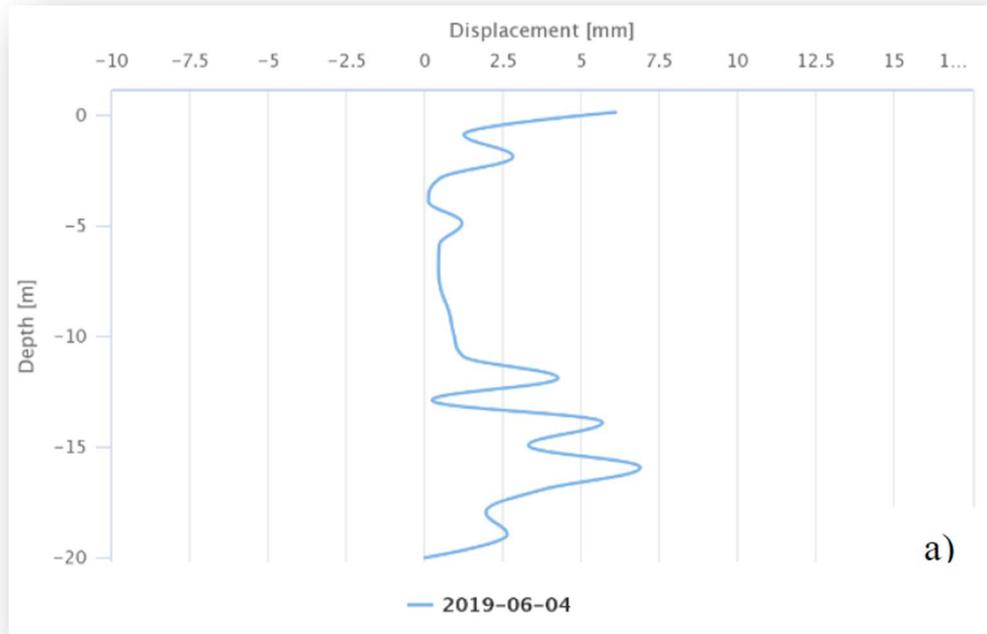


Figura 23: Dati di spostamento differenziale locale e cumulato in direzione di massima pendenza registrati dai sensori MEMS per l'inclinometro SA MUMS.

Analizzando l'andamento nel tempo degli spostamenti differenziali locali alle profondità menzionate, si possono individuare alcune particolarità:

- a) i sensori MEMS ed elettrolitico mostrano un'ottima corrispondenza di trend, con differenze di valori numerici attribuibili alla differenza di sensibilità fra le due tipologie di sensore;
- b) dopo un primo periodo iniziale di movimenti simili rispetto al periodo di assestamento del materiale di riempimento (conclusosi intorno al 14 marzo), si è osservato un diverso comportamento alle differenti profondità;
- c) a -17 m (Figura 24a) di profondità si è assistito ad un deciso incremento degli spostamenti a partire dal 24 marzo, conclusosi con un'accelerazione finale il 5 aprile 2019, a cui è seguito un periodo in cui non si sono registrati movimenti significativi, fino alla data odierna;
- d) a -16 m (Figura 24b) di profondità si è riscontrata una situazione differente, con una variazione del trend degli spostamenti a partire dal 2 aprile, una seconda accelerazione il 15 aprile ed una successiva fase stabile a partire dal 25 aprile;
- e) a -15 m (Figura 24c) la situazione è abbastanza analoga, con un incremento degli spostamenti a partire dal 2 aprile, conclusosi in questo caso il 18 aprile;
- f) a -14 m (Figura 24d) invece si sono registrati movimenti solo nel periodo iniziale, terminati intorno al 20 marzo. La forma del trend di tali spostamenti suggerisce un possibile assestamento locale in seguito all'installazione;
- g) infine a -12 m (Figura 25) di profondità si ha un comportamento molto simile alla situazione a -16 m da piano campagna.
- h)

Il maggior spostamento locale è stato registrato ad una profondità di -16 m ed è pari a 6.87 mm. Lo spostamento cumulato in testa risulta pari a 12.9 mm.

L'azimut degli spostamenti cumulati in testa calcolato a partire dalla data di zero è pari a circa 204°.

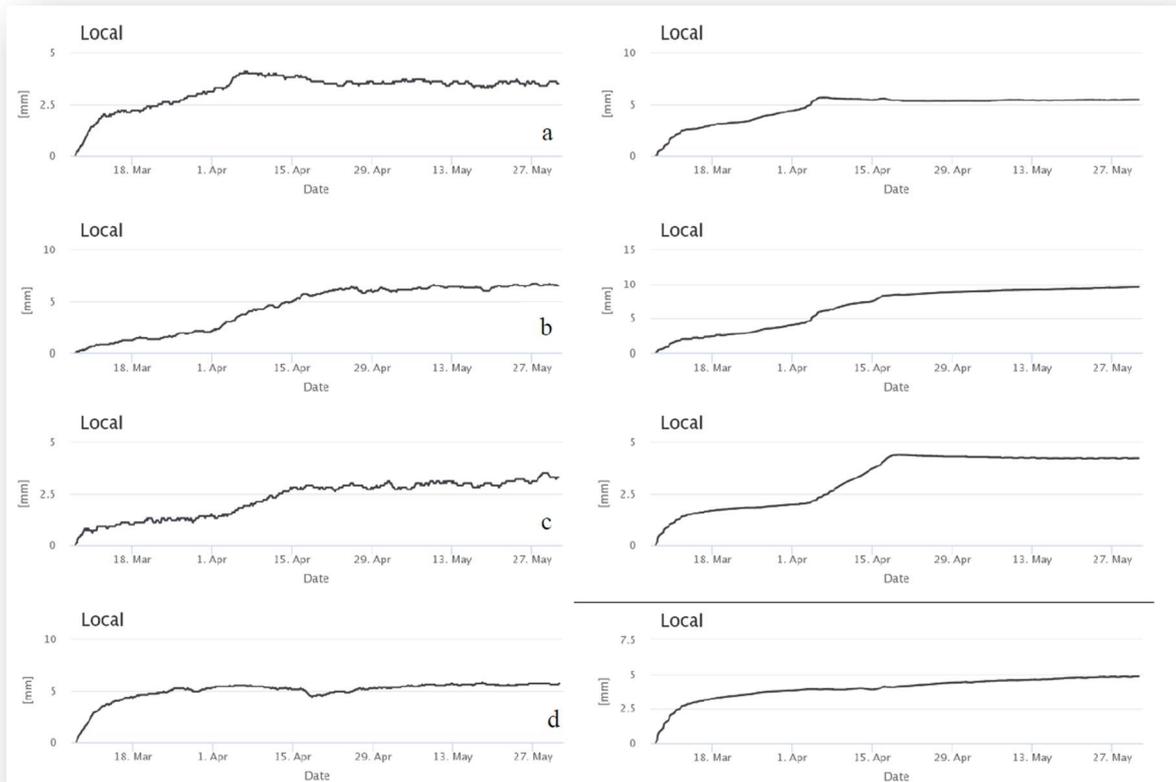


Figura 24: Andamento nel tempo degli spostamenti locali registrati da MEMS 3D (sinistra) e sensore elettrolitico 2D (destra) alle profondità rispettivamente (dall'alto) di a) 17, b) 16, c) 15 e d) 14 m per l'inclinometro SA MUMS.

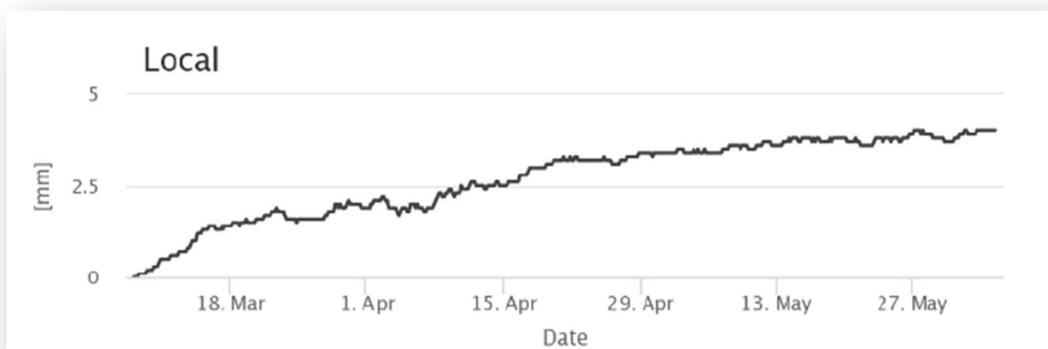


Figura 25: Andamento nel tempo degli spostamenti locali registrati da MEMS 3D alla profondità di 12 m. per l'inclinometro SA MUMS.

Variazioni del livello di falda

Per quanto riguarda i livelli idrici e la pressione assoluta registrati dai due piezometri, posti rispettivamente alla profondità di 13 metri e 19 metri, entrambi gli strumenti rilevano la presenza di un'unica falda situata ad una profondità inizialmente attestabile sui 5 metri rispetto al piano campagna, risalita a circa 4.5 m in seguito ad un picco registrato fra il 4 ed il 5 aprile. Si sono inoltre registrati picchi secondari i giorni 10, 30 e 31 maggio.

Confrontando lo sviluppo nel tempo del valore di falda ed i principali spostamenti locali (Figura 26), è possibile rilevare una buona corrispondenza fra un'accelerazione locale degli spostamenti a 16 metri di profondità ed il massimo di falda registrato fra il 4 ed il 5 di aprile.

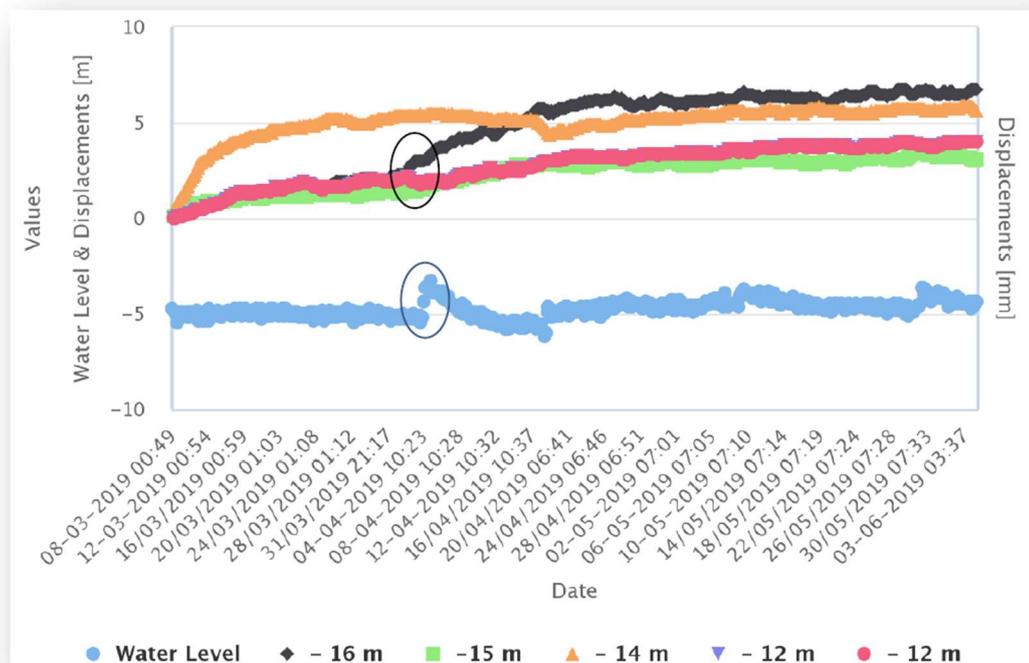


Figura 26: Confronto fra i principali spostamenti differenziali locali e livello della falda idrica registrata dai due piezometri per l'inclinometro SA MUMS.

4.7 SETTORE INCLINOMETRO SB

4.7.1 SB INCL

L'inclinometro SB è costituito da un tubo inclinometrico di tipo tradizionale, nel quale la lettura è prevista con l'uso di una sonda inclinometrica manuale.

La lettura di riferimento è stata eseguita il 12/03/2019, dopodiché sono state eseguite altre due letture rispettivamente nei giorni 08/04/2019 e 11/05/2019.

### Spostamenti orizzontali

L'analisi dei risultati acquisiti evidenzia spostamenti locali con limitate deviazioni dalla verticale, dell'ordine di 2 mm circa. Tuttavia i grafici delle misure mostrano curve di spostamento con andamento a spirale, verosimilmente associabile ad un assestamento tardivo della tubazione all'interno del diametro di perforazione. Tale anomalo comportamento è anche confermato dagli azimut dei vettori di spostamento, che sono molto dispersi e pertanto poco significativi.

In base a tali risultati, si può assumere per l'inclinometro SB INCL l'assenza di spostamenti significativi.

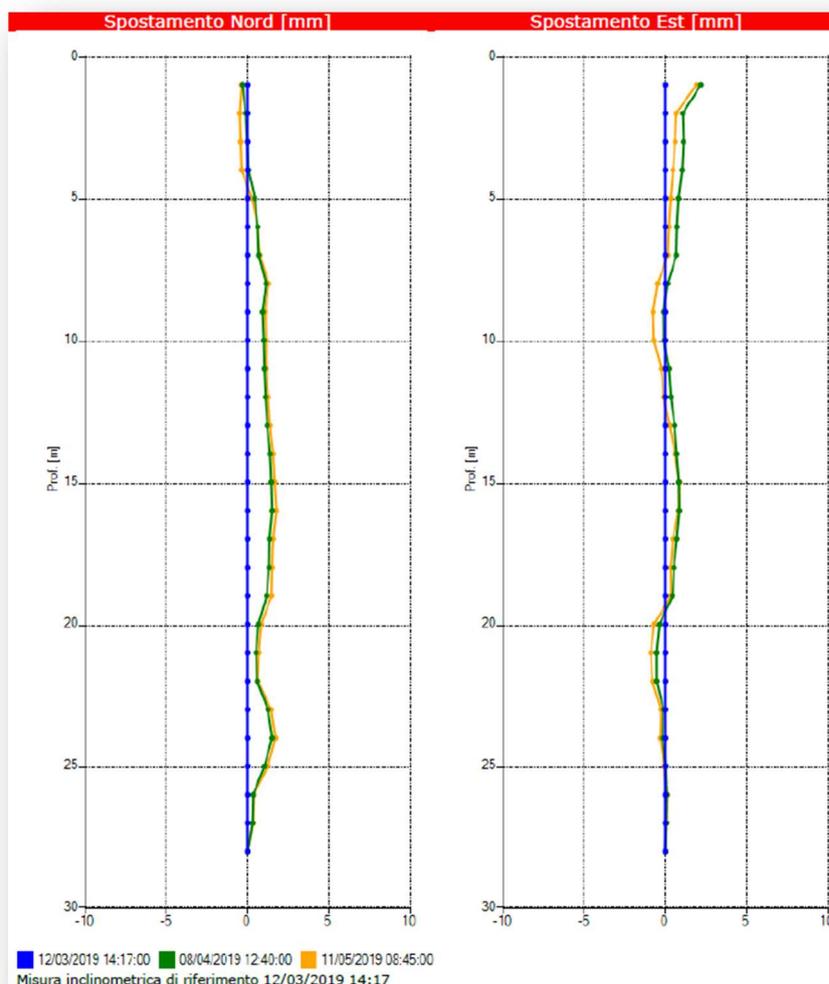


Figura 27: Grafici degli spostamenti differenziali locali (Nord ed Est) registrati nell'inclinometro SB INCL.

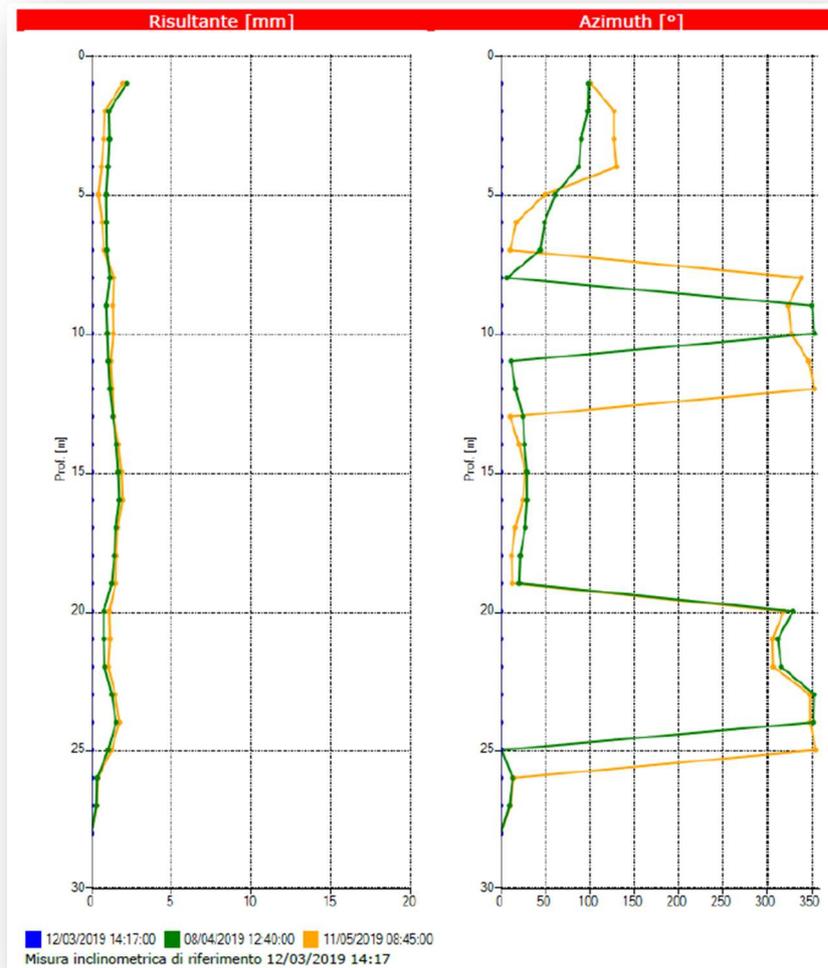


Figura 28: Grafici degli spostamenti cumulati e azimutali registrati nell'inclinometro SB INCL.

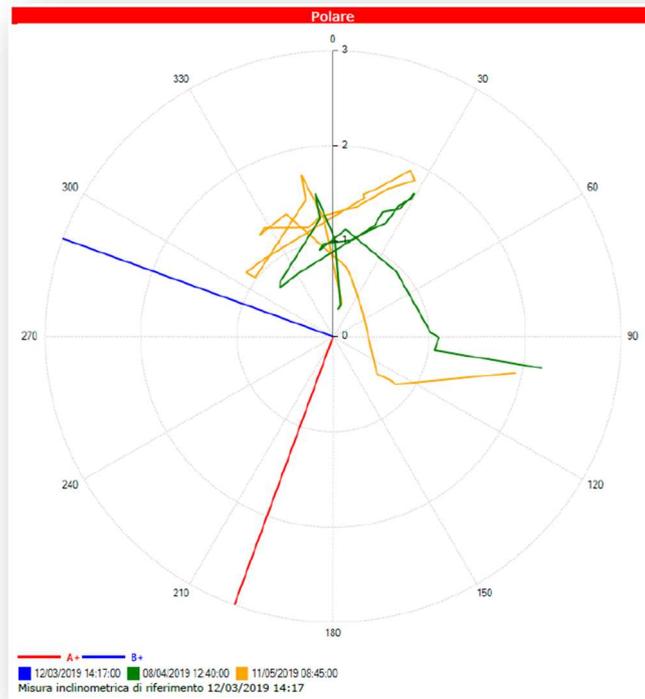


Figura 29: Diagramma polare degli azimut degli spostamenti registrati nell'inclinometro SB INCL.

#### Variazioni del livello di falda

Accoppiato all'inclinometro SB INCL è presente un foro attrezzato a piezometro a tubo aperto nel quale è stato eseguito nel periodo tra il 05 Febbraio e l'11 Maggio 2019 il monitoraggio della soggiacenza della falda.

In questo caso, rispetto agli altri dati piezometrici descritti nei precedenti inclinometri, non si hanno a disposizione misure in continuo della variazione del livello di falda, tuttavia le misure acquisite hanno evidenziato un valore medio di soggiacenza di -9.9 m da p.c., con oscillazioni di circa 1 m durante il periodo di monitoraggio.

La puntualità e la limitatezza dei dati a disposizione, soprattutto se comparati con il monitoraggio in quasi continuo eseguito negli altri strumenti, non permettono di eseguire un'analisi di dettaglio soprattutto del confronto degli spostamenti/posizione nel tempo, come invece fatto nelle colonne inclinometriche automatiche.

Tuttavia, in base a quanto già anticipato relativamente gli spostamenti orizzontali, è verosimile che nel settore considerato le oscillazioni della falda non influiscano sulla stabilità locale di tale porzione di versante.

#### 4.8 SINTESI DEL MONITORAGGIO INCLINOMETRICO

Come già accennato nel Capitolo 1, le letture inclinometriche eseguite tra Dicembre 2018-Luglio 2019, hanno contribuito a definire il Modello Geotecnico e Geomorfologico del versante di Carozzo. Il sistema di monitoraggio ha continuato a leggere sulla verticale SA fino a marzo 2020.

In particolare, l'analisi e l'incrocio delle misure dei movimenti registrati hanno consentito di ricostruire, con una elevata affidabilità, l'andamento plano-altimetrico della superficie di scivolamento basale.

Sotto il profilo livello altimetrico, il fenomeno franoso si estende verosimilmente dalla porzione medio-alta del versante, all'incirca da quota 140 m s.l.m. in corrispondenza dell'abitato di Carozzo, fino alla parte medio-bassa del versante, a circa quota 70 m s.l.m.. Non si esclude inoltre, sebbene con maggior incertezza, che la superficie di scivolamento possa anche estendersi fino a circa quota 60 m s.l.m..

Dal punto di vista areale, il settore di versante in frana dovrebbe essere compreso tra le due principali incisioni presenti a valle dell'abitato di Carozzo.

Come già descritto in dettaglio nei paragrafi precedenti, il monitoraggio inclinometrico ha evidenziato le seguenti profondità di movimento ( **in cromia le verticali accoppiate per confronto strumentale**):

➤ SF DMS <b>movimenti tra i -4 e -6 m da p.c.</b>
➤ SF MUMS <b>movimenti tra -3 e -5 m da p.c.</b>
➤ SG MUMS <b>movimenti tra -6 e -8 m da p.c.</b>
➤ SE DMS <b>movimenti tra -7 e -9 m da p.c.</b>
➤ SC MUMS <b>movimenti tra -6 e -10 m da p.c. e tra -14 e -16 m da p.c.</b>
➤ SD DMS <b>movimenti tra -13 e -15 m da p.c.</b>
➤ SA DMS <b>nessun movimento registrato</b>
➤ SA MUMS <b>movimenti tra -14 e -17 m da p.c.</b>
➤ SB INCL <b>nessun movimento registrato.</b>

Tra i dati sopra riportati si pone l'accento sul fatto che:

- ✓ nell'inclinometro SC MUMS, i dati di movimento registrati alla profondità tra -14 e -16 m da p.c., risultano di dubbia affidabilità, in quanto sia contrasto con il modello geomorfologico e geotecnico ricostruito attraverso gli altri dati strumentali, sia in contraddizione con le misure dei precedenti vicini inclinometri N2i e I7, i quali hanno registrato movimenti tra loro concordanti e unicamente a profondità di -7 m da p.c.

Per tali motivi, nella definizione del modello frana, si è deciso di non tenere conto di una eventuale superficie di movimento alla profondità di -14/-15 m sulla verticale dell'SC MUMS. Diversamente i movimenti più superficiali, registrati nello stesso inclinometro tra -6 a -8 m da p.c., presentano una

buona corrispondenza con gli altri dati inclinometrici;

- ✓ nell'inclinometro SA MUMS, i movimenti registrati tra -14 e -17 m da p.c., sono affetti da dubbia affidabilità e in contraddizione con quanto identificato nel vicino inclinometro SA DMS, il quale, al contrario, non sembra rilevare movimenti certi.

Allo stesso tempo anche il precedente inclinometro N4i, con le nuove misure manuali eseguite, non sembra mostrare movimenti significativi, sebbene nel precedente periodo di monitoraggio (2014-2016) le misure avessero indicato spostamenti a circa -9 m di profondità. In considerazione della generale indeterminatezza dei dati, si è pertanto deciso di inserire tale settore all'interno di un'area classificata come "possibile estensione del corpo di frana", indicata come incerta. L'attivazione di tale volume potrebbe essere innescato da precipitazioni di eccezionale durata od intensità, come accaduto nell'area nella stagione invernale 2013\2014.

#### 4.9 SINTESI DEL MONITORAGGIO PIEZOMETRICO

Per quanto riguarda le misure piezometriche, i dati provenienti dai sensori installati nei sondaggi eseguiti, evidenziano le seguenti variazioni della posizione della falda freatica nel periodo di monitoraggio:

➤ SA MUMS <b>variazione della falda tra i</b> -4.5 e -5 m da p.c.
➤ SC MUMS <b>variazione della falda tra</b> -5 e -6 m da p.c.
➤ SF MUMS <b>la falda risulta a</b> piano campagna.
➤ SG MUMS <b>variazione della falda tra</b> -7 e -8 m da p.c.
➤ SA DMS <b>variazione della falda SENSORE 1 (12m) tra i</b> -9.15 e -9.9 m da p.c, <b>con delta massimi di 2m ca; SENSORE 2 (40m), le variazioni sono decisamente minori (0.5m) con un trend medio crescente nel periodo.</b>
➤ SD DMS <b>variazione della falda SENSORE 1 (10m) a</b> -4.84 m da p.c.; SENSORE 2 (25m) a -9.5 m da p.c., <b>con delta di variazione per entrambi i sensori di &lt;0.2m.</b>
➤ SE DMS <b>variazione della falda SENSORE 1 (10m) a</b> -3.85 m da p.c. <b>con delta di 1.55 m; SENSORE 2 (20m) con variazioni minori (non indicato) con delta di 0.25m.</b>
➤ SF DMS <b>variazione della falda tra</b> -0.85 e -1.2 m da p.c.
➤ SB PZ <b>variazione della falda tra</b> -9.3 e -10.15 m da p.c.

#### 5 CONFRONTO DEI DATI E DEFINIZIONE DEL MODELLO DELLA FRANA

Come già anticipato nel Capitolo 4, il confronto dei moduli di spostamento con le registrazioni del livello della falda ha evidenziato, in numerosi casi, un chiaro legame tra l'attivazione dei movimenti e i principali episodi meteorici avvenuti nel periodo di monitoraggio, responsabili, questi ultimi, dell'aumento del livello della falda freatica.

A titolo di esempio, si riporta in Figura 30 il confronto del modulo di spostamento registrato nell'inclinometro SE DMS, alla profondità tra -7 e -9 m da p.c., e l'andamento della falda monitorata attraverso i due sensori piezometrici, installati nella stessa verticale, a una profondità di -12 m e -40 m da p.c.

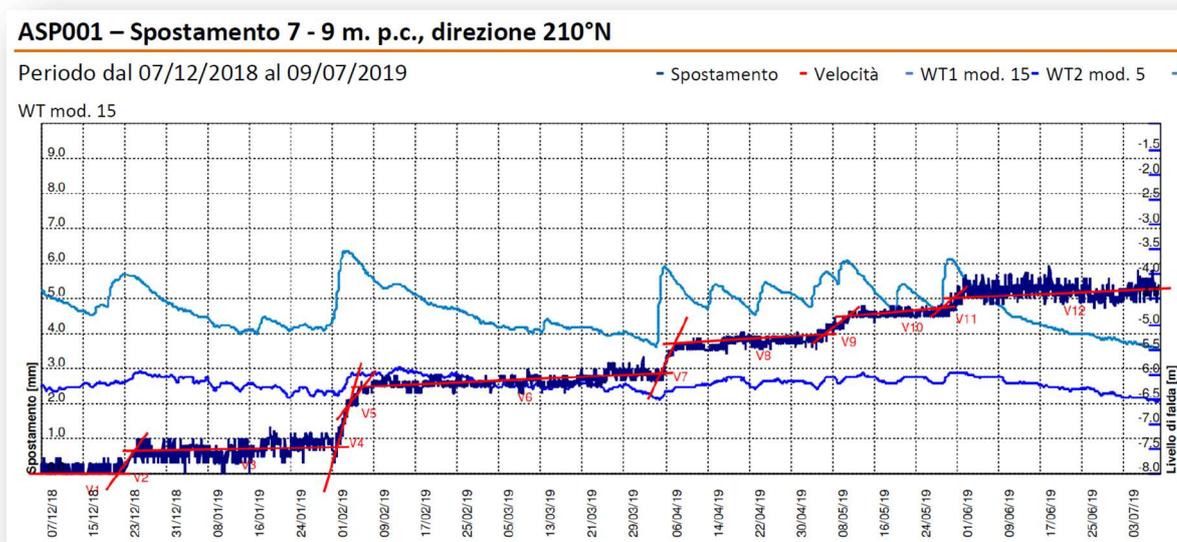


Figura 30: Confronto del modulo di spostamento (in blu scuro) con il monitoraggio della posizione della falda (in azzurro e blu elettrico).

Nel grafico riportato, è ben evidente la relazione esistente tra le oscillazioni della falda e le attivazioni dei movimenti.

In corrispondenza dei principali picchi di risalita della falda, verificatisi in occasione degli eventi di fine Dicembre 2018, inizio Febbraio 2019, inizio Aprile 2019 e nel mese di Maggio 2019, si manifestano le principali attivazioni dei movimenti, evidenziati nel grafico dai rami di crescita della relativa curva (tratti V1-V2; V4-V5 e V7-V8 in rosso).

Sempre dal grafico si rileva inoltre quasi un'immediatezza temporale tra l'attivazione dei movimenti e le variazioni piezometriche (Figura 30); allo stesso tempo le oscillazioni piezometriche presentano una risposta quasi istantanea al verificarsi dei principali eventi meteorici del periodo (Figura 32), registrati dalle stazioni meteo ARPA Liguria, in particolare nella stazione pluviometrica di Monte Beverone ubicata in linea d'aria circa 1,5 km a NE di Carozzo (Figura 31).

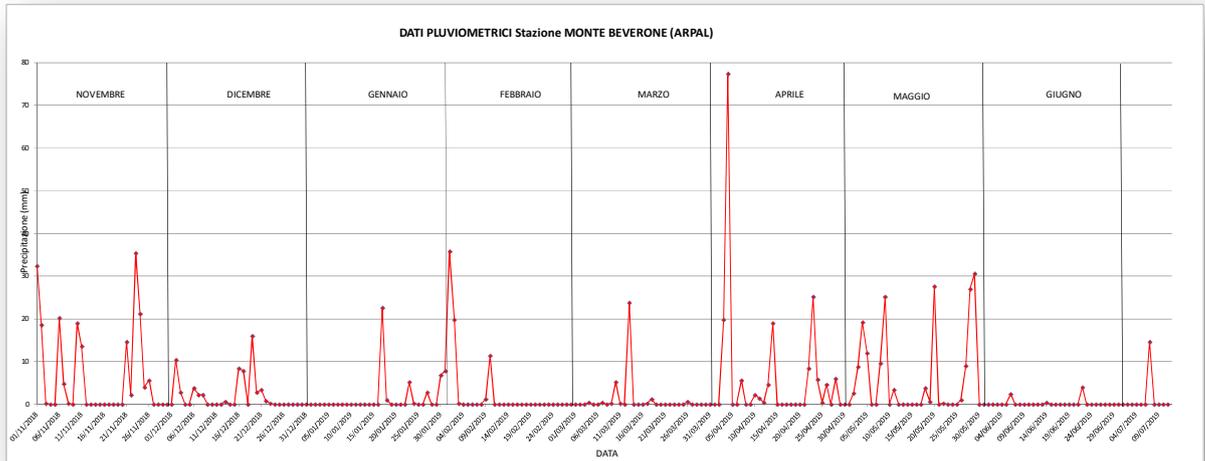


Figura 31: Grafico delle precipitazioni cumulate nel periodo Novembre 2018-Maggio 2019 registrate dalla stazione pluviometrica di Monte Beverone.

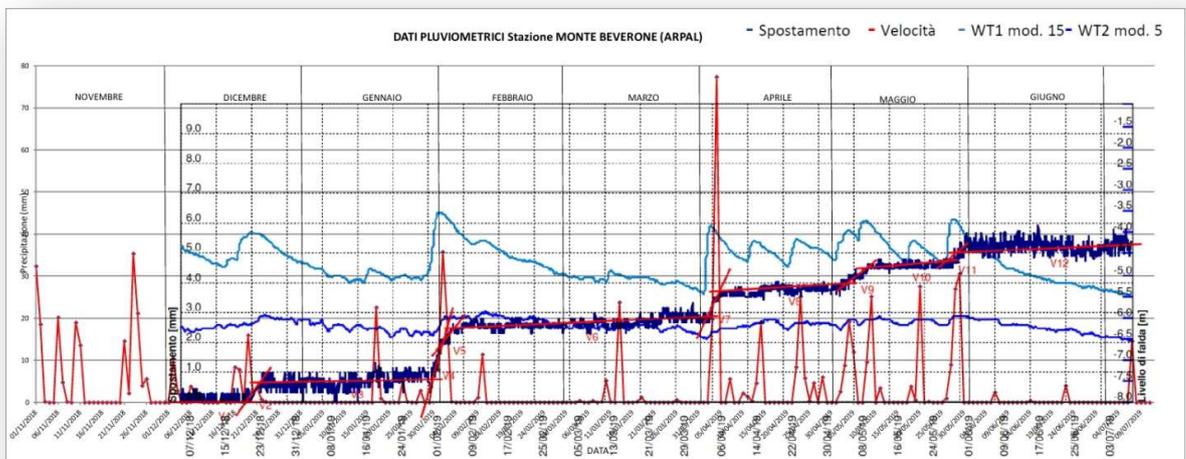


Figura 32: Sovrapposizione grafico modulo spostamento-monitoraggio piezometrico di Figura 30 con il grafico delle precipitazioni cumulate nel periodo Novembre 2018-Maggio 2019 registrate dalla stazione pluviometrica di Monte Beverone Figura 31.

Quanto sopra descritto, permette di configurare un meccanismo di ricarica molto rapida della falda in occasioni dei periodi di intense precipitazioni.

Mediamente si riscontra una certa corrispondenza tra la posizione della superficie di scivolamento basale e la posizione media della falda, in generale tra loro molto prossime e in taluni casi quasi coincidenti (Figura 34).

Infine, il monitoraggio ha permesso di evidenziare che nei periodi scarsamente piovosi o in generale privi di fenomeni meteorici intensi, non si registrano movimenti significativi (esempio ultimo mese di monitoraggio, Giugno 2019).

Questo avvalora ulteriormente il presupposto del legame diretto tra l'apporto meteorico fornito dalle precipitazioni, registrato con le variazioni della falda freatica, e l'attivazione dei movimenti. L'assenza di movimenti nei periodi asciutti presuppone, probabilmente, l'assenza di fenomeni di *creeping* o in generale di scivolamenti lenti e continui. Più verosimilmente il fenomeno è caratterizzato da movimenti puntuali, con tempi d'innescio repentini alternati a periodi di generale arresto.

Ciò contribuisce, unitamente agli approfondimenti derivanti dal rilevamento geostrutturale e geomorfologico di dettaglio, a ritenere infondato il modello geologico precedente, basato sulla presenza di una DGPV con locali riattivazioni all'interno del volume principale.

Nella Figura 33 è presentato uno stralcio della carta geomorfologica sulla quale è stata indicata la perimetrazione della frana riconosciuta attraverso le misure inclinometriche. Con tratteggio rosso è stata contrassegnata l'area estrapolata attraverso le misure ritenute di buona affidabilità; con tratteggio di colore magenta, è invece indicata un'ipotesi di estensione dello stesso fenomeno franoso, ricostruito in base a dati meno certi rispetto i precedenti, e correlabile nell'ipotesi ad episodi meteorici di eccezionale intensità, come precedentemente illustrato.

Tale incertezza potrà essere chiarita con il proseguimento del monitoraggio sugli inclinometri SA DMS e SA MUMS, le cui successive misure permetteranno di confermare o meno l'effettiva estensione del fenomeno franoso anche in questo settore del versante (area in magenta).

E' infatti prevista progettualmente una ripresa del monitoraggio sull'intero versante, attraverso la riallocazione della strumentazione DMS nelle verticali già predisposte, od in posizioni ritenute più utili alla verifica del modello 3D ricostruito grazie alla notevole quantità e qualità dei dati acquisiti dalla campagna descritta nei capitoli precedenti.

La riattivazione dell'intero sistema di monitoraggio consentirà inoltre il monitoraggio in corso d'opera dell'efficacia degli interventi di stabilizzazione progettati, fornendo elementi quantitativi per eventuali modifiche durante i lavori, in piena sicurezza delle maestranze e degli abitanti del versante.

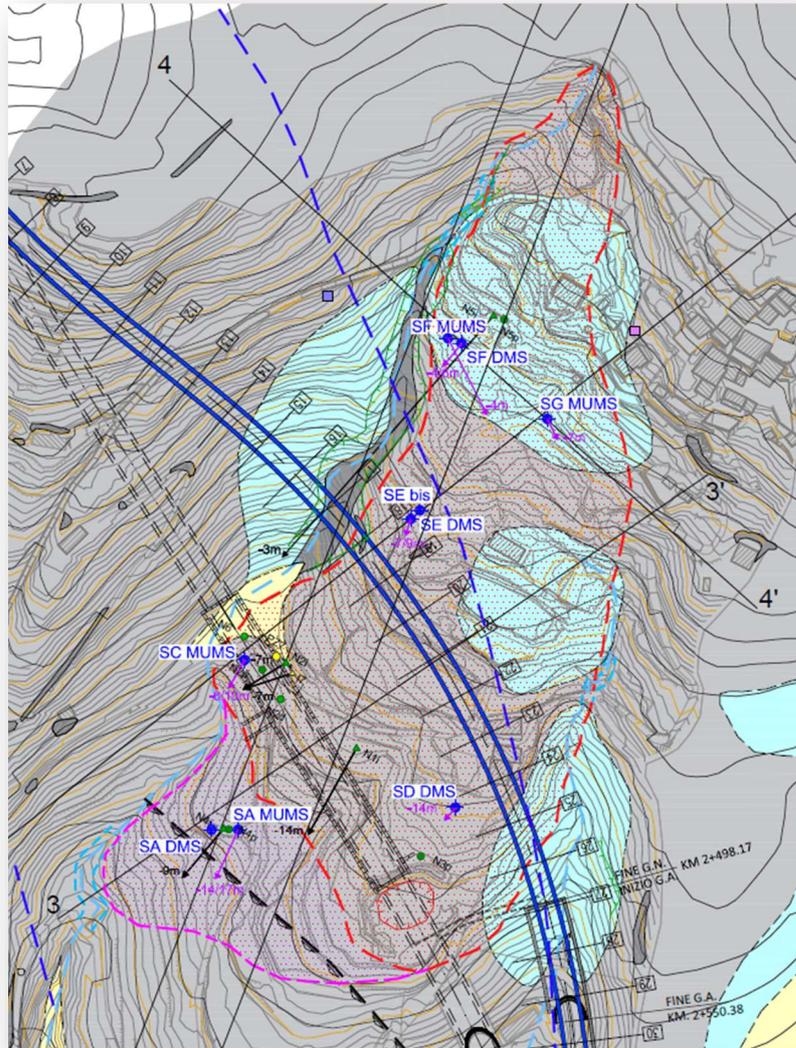


Figura 33: Stralcio della carta geomorfologica con indicazione dell'area in frana (certa in tratteggio rosso e incerta in tratteggio magenta) ricostruita attraverso i dati inclinometrici. In carta risulta un'ipotesi di variante di monte (in blu), successivamente scartata.

Dal punto di vista della profondità, i dati acquisiti confermano le ipotesi anticipate nel precedente studio del 2018, in particolare il carattere non particolarmente profondo del fenomeno franoso, che assume spessore massimo di circa 15m in corrispondenza del sondaggio SD DMS.

I movimenti riconosciuti come certi, sono perciò localizzati esclusivamente all'interno di quella che è stata definita come unità geotecnica UG1, nel dettaglio UG1b, vale a dire all'interno dei depositi incoerenti di natura eluvio-colluviale e nella porzione superiore del substrato roccioso, intensamente alterato e in taluni casi da parzialmente destrutturato a inconsistente e argillificato (si veda Figura 34 e gli altri elaborati delle

sezioni geotecniche).

I dati di monitoraggio non sembrano perciò evidenziare superfici profonde, con movimenti coinvolgenti il substrato roccioso più saldo, sebbene quest'ultimo abbia caratteristiche geotecniche generalmente scadenti e sia interessato da strutture tettoniche a basso angolo importanti. Nel modello interpretativo, il substrato è solo limitatamente lambito dalle superfici di scivolamento, definite come incerte, rilevate nel solo inclinometro SA MUMS.

Gli imponenti settori disturbati, parzialmente brecciati e disfatti, riconosciuti nelle perforazioni a profondità superiori ai 20 m (e in taluni casi oltre i 70 m da p.c.), sono pertanto attribuibili a processi tettonici particolari, noti in letteratura nell'area e studiati dall'Università di Pisa.

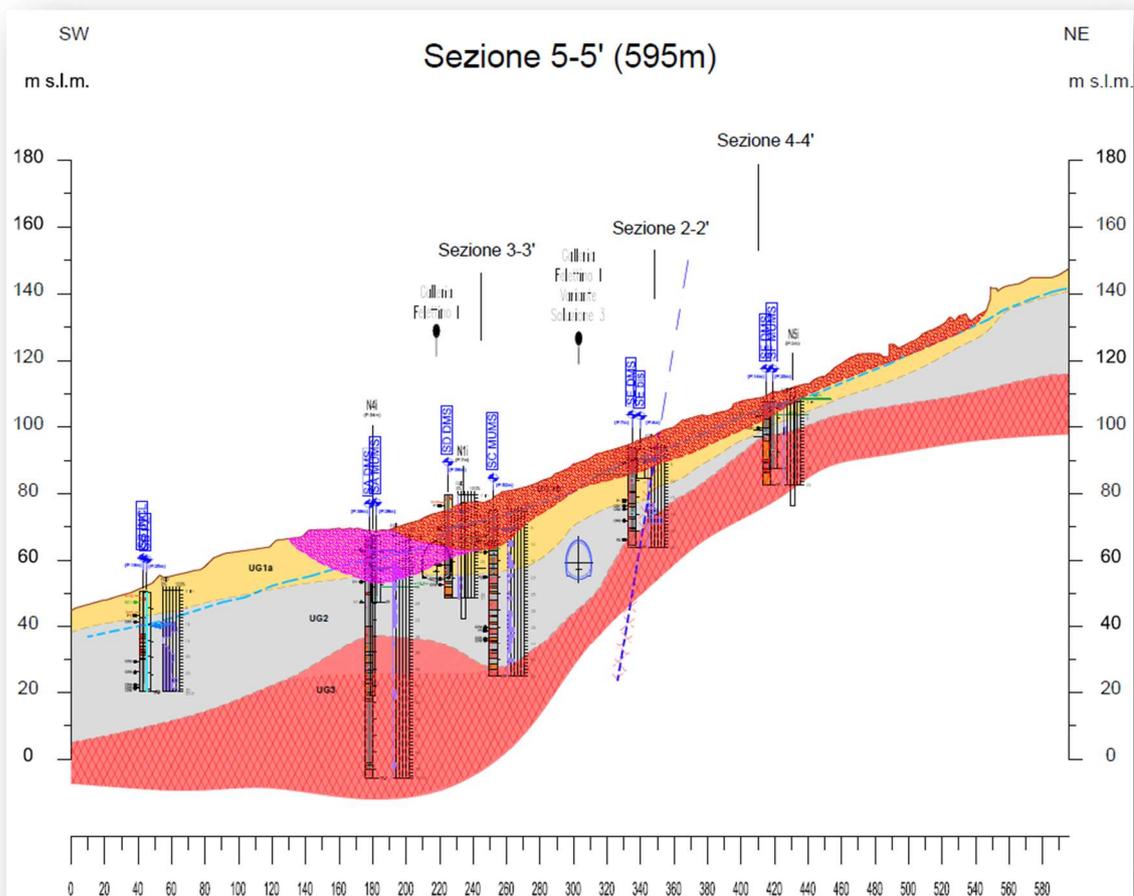


Figura 34: Sezione geotecnica 5-5', ricostruita lungo la massima pendenza del versante nel settore identificato in frana. Con la campitura puntinata rossa è indicata l'area in frana riconosciuta come certa, con la campitura puntinata

magenta l'area in frana riconosciuta come incerta, entrambe ricadenti nell'unità UG1b, in giallo l'unità UG1a (non in frana), in grigio l'unità UG2 e in rosso l'unità UG3. A monte una ipotesi di variante della galleria, successivamente scartata.

## 6 CENNI SUGLI INTERVENTI DI SISTEMAZIONE DEL VERSANTE

Sul settore di versante a valle dell'abitato di Carozzo, in particolare lungo la porzione interessata dai movimenti gravitativi descritti, in seguito ad approfondite analisi numeriche, sono stati previsti interventi diversificati, finalizzati a limitare gli effetti dei fattori predisponenti, riconducibili sostanzialmente all'azione delle acque superficiali scarsamente regimate e delle infiltrazioni nelle coperture di più scadenti caratteristiche geotecniche.

Il modello geologico- geotecnico ed idrogeologico 3D, realizzato del corpo di frana grazie alla quantità e qualità dei dati acquisiti, ha consentito di ipotizzare e valutare attentamente gli effetti degli interventi previsti, come descritto in dettaglio negli elaborati geotecnici.

Si riporta di seguito un breve elenco degli interventi previsti, così denominati:

- Tipo A - Drenaggi in profondità mediante pozzi drenanti;
- Tipo B - Regimazione delle acque superficiali;
- Tipo C - Protezione spondale contro l'erosione operata dai corsi d'acqua.
- Tipo D – drenaggi sub-superficiali mediante dreni suborizzontali microfessurati

L'intervento di tipo A è ubicato in zona centrale del corpo di frana secondo una disposizione piano altimetrica suborizzontale, atta ad intercettare, raccogliere e convogliare le acque di falda entro i corsi d'acqua attualmente esistenti.

L'intervento tipo B prevede la regimazione superficiale delle acque ruscellanti sul versante ed attualmente convogliate in cunette non impermeabilizzate, al fine di limitare l'infiltrazione efficace di tali acque entro il corpo di frana.

L'intervento tipo C prevede la sistemazione dell'alveo dei corsi d'acqua presenti sul versante, al fine di limitare l'erosione dei depositi detritici e del piede dell'accumulo di frana attivo.

L'intervento tipo D, il più a monte, ubicato nei pressi della nicchia principale di distacco, prevede l'abbattimento della falda nella zona cinematicamente più attiva del corpo di frana principale, i cui effetti si propagano più a valle secondo meccanismi ben analizzati dal modello 3D.