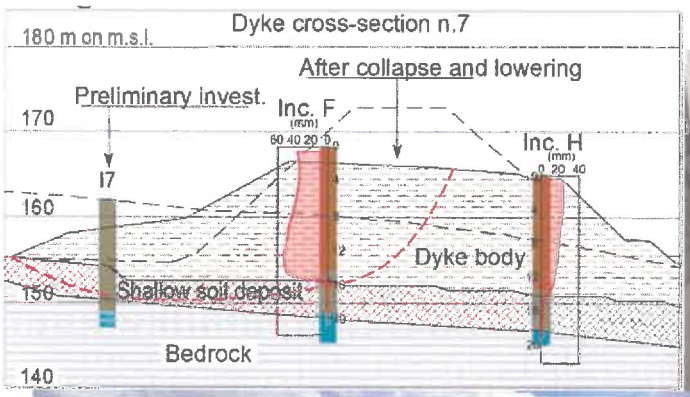
GES – Geotechnical Engineering Services S.r.l.
Nato come Spin–Off dell'Università Politecnica delle Marche
e-mail: info@ges-geotecnica.it

ASA S.r.l. AZIENDA SERVIZI AMBIENTALI

Analisi dei dati di monitoraggio dell'argine di valle della Zona di Ampliamento della Discarica di Corinaldo (AN)

RAPPORTO n.8
Aggiornamento a APRILE 2024



Consulenti tecnici: Dott. Ing. David Segato
Dott. Ing. Alessandro Vita
Consulenti scientifici: Prof. Giuseppe Scarpelli
Prof. Paolo Ruggeri

Il Responsabile Scientifico
Ing. Paolo Ruggeri

Il Direttore Tecnico GES
Ing. David Segato

Ns.RIF.	Revisione	Data
2023-ASA_3	EMISSIONE	28-6-2024

Sommario

1 PREMESSA 3

2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO 4

3 SINTESI DELLE ATTIVITA' DI CONSOLIDAMENTO DELL'ARGINE 5

4 ESITO DEL SOPRALLUOGO 7

5 EVOLUZIONE DEL RIEMPIMENTO DELLA DISCARICA 9

6 RISULTATI AGGIORNATI DEL MONITORAGGIO IN CORSO 14

6.1 MONITORAGGIO INCLINOMETRICO 14

6.2 MONITORAGGIO PIEZOMETRICO 29

6.3 MONITORAGGIO DELLE PORTATE EMUNTE DAI POZZI DI PICCOLO DIAMETRO 37

6.4 MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI LOCALI DI 2 PALI DEI SETTI A PETTINE 46

7 CONCLUSIONI E SUGGERIMENTI PER IL PROSIEGUO DEL MONITORAGGIO 55

APPENDICE 1 - PIANO DI MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI VERTICALI DELL'ARGINE

APPENDICE 2 - PIANO DI MONITORAGGIO SULLA RISPOSTA AL CARICO DELLA FORMAZIONE PLIOCENICA

1 PREMESSA

Con ordine n. 746/RP/ma del 8/06/2023 l'ASA S.r.l. - Azienda Servizi Ambientali ha affidato alla GES – Geotechnical Engineering Services s.r.l. la prosecuzione di un incarico specialistico finalizzato all'analisi dei dati di monitoraggio geotecnico dell'argine di valle della Zona di Ampliamento della Discarica di Corinaldo (AN).

In particolare, l'incarico prevede un sopralluogo con cadenza quadrimestrale e la redazione di un rapporto tecnico con l'elaborazione dei dati di monitoraggio raccolti nel periodo, il confronto con i dati storici e l'interpretazione delle misure nel quadro della sicurezza geotecnica dell'argine.

La presente relazione, che costituisce il **RAPPORTO n.8,** include l'aggiornamento dei dati registrati nel quadrimestre **GENNAIO-APRILE 2024.** Nell'elaborato, dopo un breve richiamo alle attività di consolidamento realizzate sull'arginatura, viene presentato l'esito del sopralluogo e lo stato aggiornato del monitoraggio in corso con particolare riferimento a:

- monitoraggio inclinometrico (aprile 2024);
- monitoraggio piezometrico (aprile 2024);
- monitoraggio delle portate emunte dai pozzi di piccolo diametro (giugno 2024);
- monitoraggio delle deformazioni locali di 2 pali dei setti a pettine (aprile 2024);

Il documento è stato completato con i dati ricevuti a giugno 2024 e comprende l'aggiornamento dei dati pluviometrici della stazione meteo localizzata in area impianto.

2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

i. Rapporto finale sull'esito dell'intervento sulla base del monitoraggio post-operam e valutazione dello stato finale dell'argine della discarica (Università Politecnica delle Marche, Dip. SIMAU, 11 Novembre 2019)

ii. Report mensili del monitoraggio inclinometrico (a cura della ISOGEA S.r.l.) aggiornato ad **Aprile 2024**

iii. Report mensili del monitoraggio piezometrico (a cura della ISOGEA S.r.l.) aggiornato ad **Aprile 2024**

iv. Letture delle celle piezometriche elettriche (Portale Monitoraggi Datalogger della O.T.R. S.r.l. di Piacenza) aggiornato al **30 Aprile 2024**

v. Letture agli estensimetri installati nei pali sei setti a pettine (Portale Monitoraggi Datalogger della O.T.R. S.r.l. di Piacenza) aggiornato al **30 Aprile 2024**

vi. Dati relativi alle portate emunte dai pozzi verticali di piccolo diametro (a cura di ASA S.r.l.) aggiornato al **22 Giugno 2024**

vii. Rilievo plano-altimetrico della discarica da drone (a cura del Geom. Luigi Prussiani) aggiornato al **30 Marzo 2024**

viii. Dati pluviometrici relativi alla stazione meteorologica situata presso la discarica di Corinaldo (a cura di ASA S.r.l.) aggiornati a **Maggio 2024**

3 SINTESI DELLE ATTIVITA' DI CONSOLIDAMENTO DELL'ARGINE

Le opere di consolidamento dell'arginatura si sono rese necessarie per fronteggiare il dissesto che, nel novembre 2016, aveva interessato la porzione ovest - lato nord dell'opera di sbarramento della vallata propedeutica alla realizzazione dell'ampliamento della discarica. Avendo individuato nella presenza in fondazione di un paleoalveo colmato da terreni colluviali poco consistenti e nell'insorgenza di elevate sovrappressioni interstiziali nel corpo arginale le cause principali del dissesto, le attività di stabilizzazione e consolidamento hanno previsto interventi combinati di tipo strutturale ed idraulico. Gli interventi realizzati sono indicati nella planimetria di Figura 1.

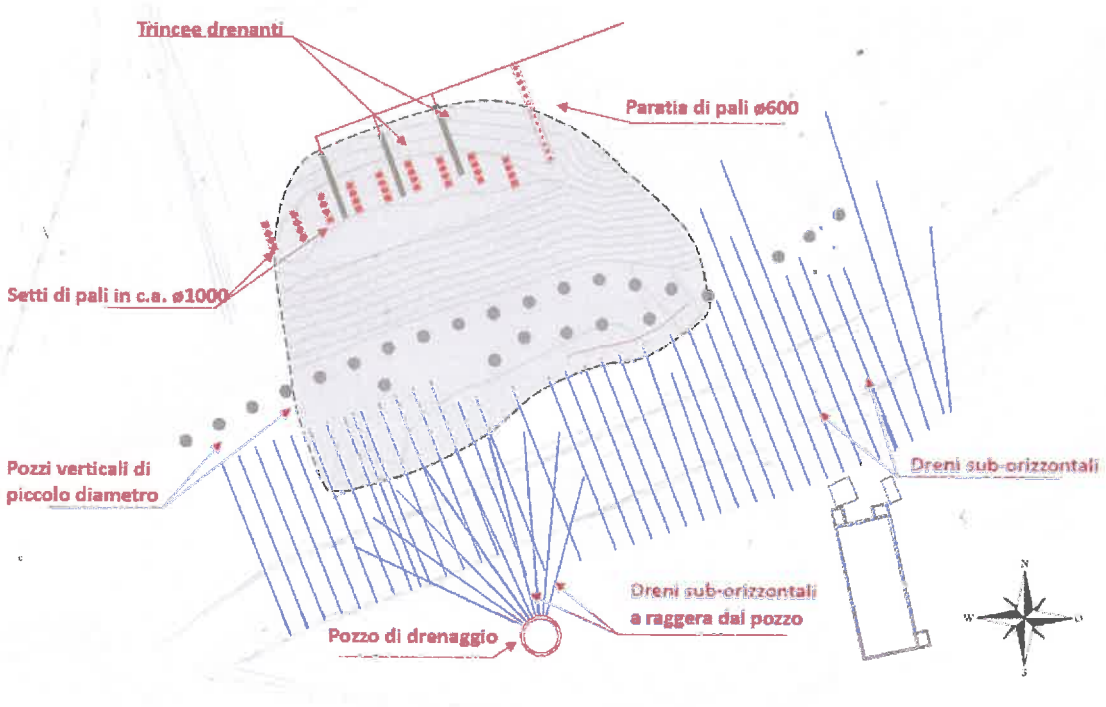


Figura 1 – Planimetria dell'area con indicazione degli interventi di consolidamento

Gli interventi sono consistiti in:

- a monte dell'argine (lato nord):
  - 9 setti disposti a pettine, costituiti ciascuno da gruppi di 4 pali affiancati ø1000 collegati in sommità da una trave di coronamento, con il compito di realizzare un rinforzo al piede di monte dell'argine, nell'area più critica del dissesto;
  - una paratia di pali ø600, concepita come opera provvisionale, per consentire l'abbancamento in sicurezza dei rifiuti nella vasca bassa, nell'area est dell'impianto e non interessata dal dissesto;
  - trincee drenanti sull'unghia del dissesto, allineate ai setti di pali, collegate al drenaggio sotto telo già presente;
- a valle dell'argine (lato sud):

- una fitta rete di drenaggi sub-orizzontali che attraversano il rilevato arginale per una lunghezza media di circa 30 m, così da drenare la metà esterna del corpo arginale;
- un pozzo strutturale di grande diametro, collocato in asse al paleoalveo, da cui sono stati realizzati a ventaglio 4 livelli di dreni sub-orizzontali; quest'opera è particolarmente significativa sia come presidio di stabilità rispetto a possibili cinematismi verso valle sia perché ha permesso il drenaggio dei terreni di fondazione dell'argine;

- dalla sommità dell'argine:
  - pozzi verticali di drenaggio da cui estrarre, mediante pompaggio, le acque presenti nella porzione dell'argine non raggiunta dai dreni sub-orizzontali.

Per interpretare correttamente i dati di monitoraggio è utile individuare i periodi in cui sono stati realizzati gli interventi di consolidamento:

- dreni sub-orizzontali dal paramento di valle dell'argine: **LUG. - DIC. 2018**
- setti di pali ø1000 a pettine: **OTT. - DIC. 2018**
- pozzo strutturale di grande diametro: **GEN. – FEB. 2019**
- pozzi verticali di piccolo diametro dalla sommità dell'argine: **MAR. – APR. 2019**
- dreni sub-orizzontali a raggiera dal pozzo di grande diametro: **MAG. – LUG. 2019**

4 ESITO DEL SOPRALLUOGO

In data **29 maggio 2024** l'ing. Paolo Ruggeri, accompagnato dal Direttore Tecnico dott. Lorenzo Magi Galluzzi, ha eseguito il previsto sopralluogo presso l'argine della discarica.

In Figura 2 sono mostrate due fotografie della zona arginale, una scattata dalla sommità dell'argine (presa da ovest verso est), lungo la cresta dello stesso e la seconda che evidenzia il fronte di valle dell'arginatura. A livello visivo non risultano aspetti particolari da segnalare. Si nota il recente abbancamento a monte dell'arginatura, realizzato nell'ultimo quadrimestre, riconoscibile per la scarpata non vegetata.

Figura 2 – Fotografie della sommità dell'argine e del fronte di valle prese nel sopralluogo del 29-5-2024

In Figura 3 è rappresentata una vista della zona interna dell'impianto presa da nord verso sud-est che mostra il livello di riempimento raggiunto.

Figura 3 – Fotografia della zona di abbancamento dei rifiuti (l'argine è sulla destra, 29-5-2024)

Percorrendo la cresta arginale si è verificato l'interrimento di un pozzetto dove è presente un piezometro Casagrande. Si auspica quindi un intervento di pulizia e ripristino dello strumento.

L'ispezione del pozzo strutturale e di drenaggio a valle dell'arginatura ha evidenziato un apporto modesto d'acqua con stillicidio diffuso a molti dei dreni sub-orizzontali collocati a tutte le quote.

5 EVOLUZIONE DEL RIEMPIMENTO DELLA DISCARICA

Per interpretare le risultanze del monitoraggio, è utile tenere conto che la discarica è da tempo in pieno esercizio e che parte delle aree a ridosso dell'argine sono state oggi colmate dai rifiuti. Utilizzando i rilievi aerei realizzati da drone, in questo paragrafo si rappresenta l'evoluzione del riempimento della discarica nell'area di interesse per l'arginatura. In Figura 4 è riportata una planimetria della discarica in prossimità dell'argine sud, al momento di inizio dello sversamento dei rifiuti: si notano le due vasche a monte, definite "vasca alta" e "vasca bassa" in relazione alla quota del fondo delle stesse.

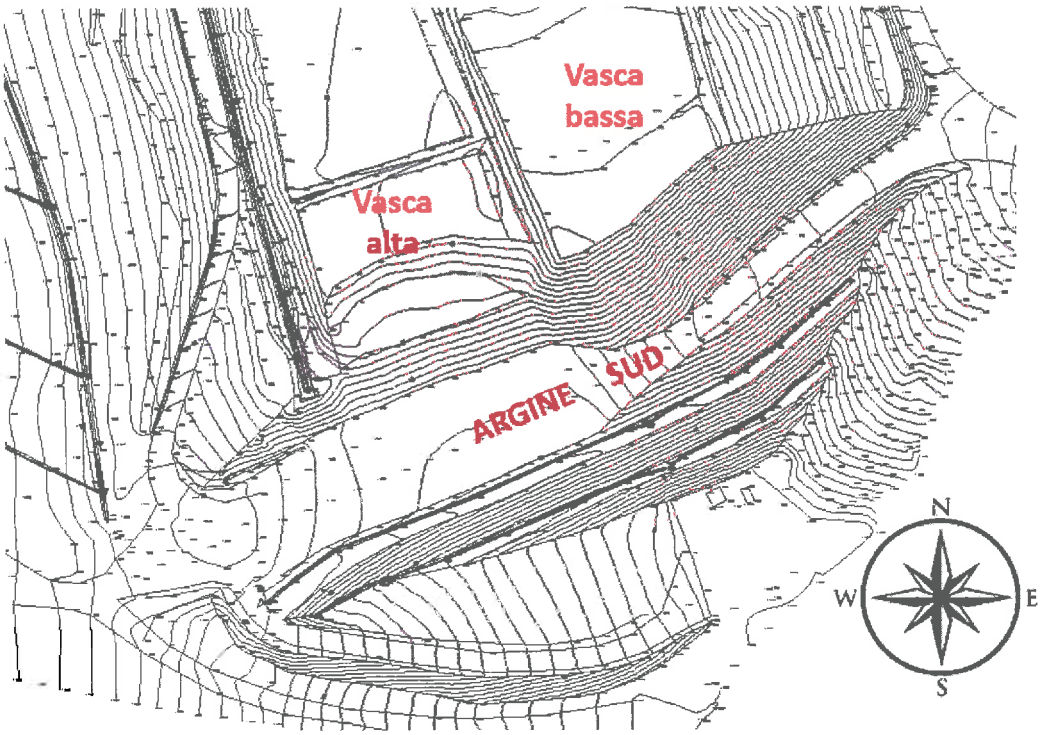


Figura 4 – Rilievo della discarica in prossimità dell'argine sud con la distinzione di "vasca alta" e "vasca bassa" in relazione alla quota del fondo

In sintesi risulta:

- al 29-09-2019 (Figura 5 sx): ci sono circa 10 m di rifiuti in vasca bassa (vasca est) a ridosso dell'argine, mentre nella vasca alta (vasca ovest) la quota del riempimento è circa pari alla quota dell'unghia interna (5 m circa);
- al 15-12-2019 (Figura 5 dx): sversati circa altri 5 m di rifiuti in vasca alta (vasca ovest) fino a ridosso dell'argine;
- al 24-05-2020 (Figura 6 sx): ulteriore bancata in vasca bassa fino a Q=170 m l.m.m.
- al 6-09-2020 (Figura 6 dx): ampliamento della bancata in vasca bassa (Q=170 m l.m.m.)
- al 5-04-2021 (Figura 7 sx): ampliamento della discarica verso Nord, non ci sono variazioni significative a ridosso dell'argine;

- al 26-09-2021 (Figura 7 dx): estensione della bancata a quota Q=170 m su l.m.m. in prossimità dell'argine;
- al 12-04-2022 (Figura 8 sx): estensione verso ovest della bancata a quota Q=175 m su l.m.m., in una porzione un po' arretrata rispetto all'argine;
- al 12-10-2022, non risultano ulteriori abbancamenti in prossimità dell'argine, la coltivazione della discarica sta proseguendo in posizione più arretrata;
- al 12-2022 un nuovo rilievo (Figura 8 de e Figura 9): non ci sono abbancamenti in prossimità dell'argine, la coltivazione della discarica prosegue nella porzione nord;
- al 4-2023, pur non disponendo di un nuovo rilievo, le fotografie delle attività in corso evidenziano che la coltivazione della discarica avviene in posizione molto arretrata rispetto alla posizione dell'argine;
- al 1-10-2023, il nuovo rilievo evidenzia che la coltivazione della discarica prosegue nella porzione a nord, distante dall'argine (Figura 10, in alto);
- **al 30-3-2024, il nuovo rilievo evidenzia che la coltivazione della discarica si sta avvicinando all'argine, con un sovralzo della porzione centrale (Figura 10, in basso).**

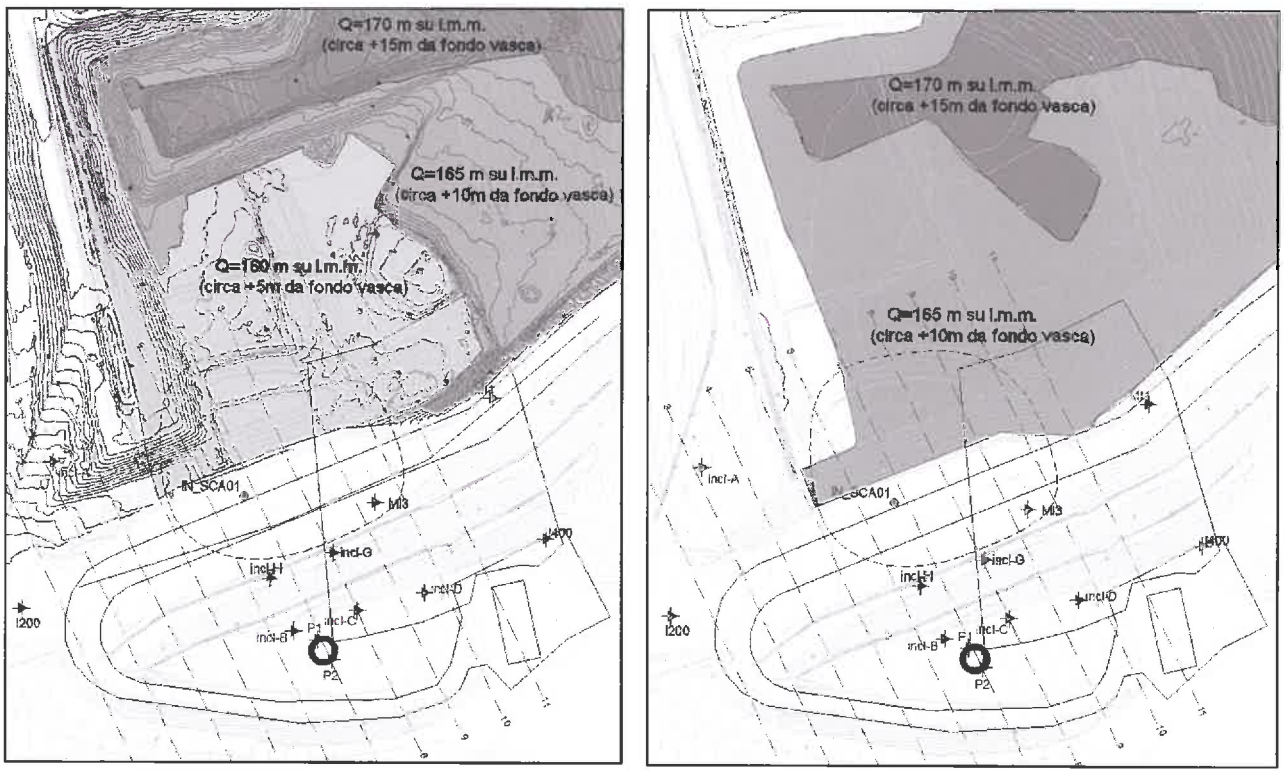


Figura 5 – Rilievo plano-altimetrico della discarica al 29-09-2019 (a sx) e al 15-12-2019 (a dx)

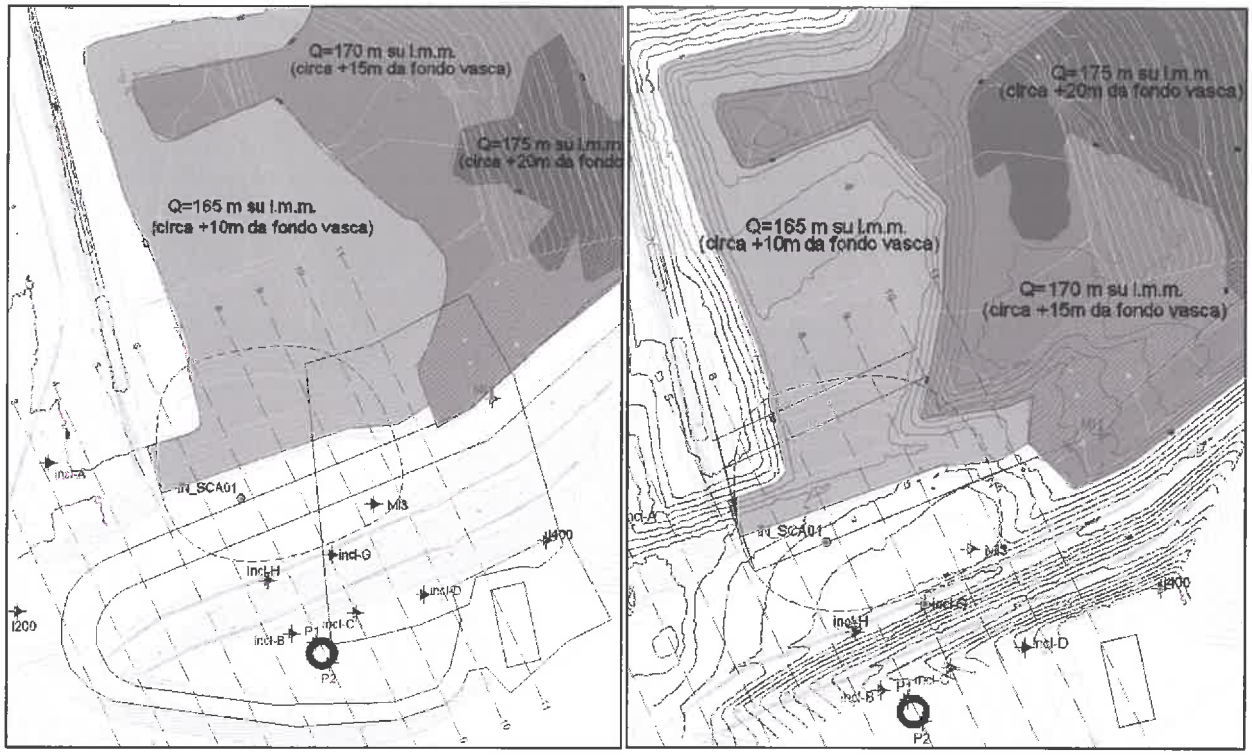


Figura 6 – Rilievo plano-altimetrico della discarica al 24-05-2020 (a sx) e al 6-09-2020 (a dx)

Figura 7 – Rilievo plano-altimetrico della discarica al 5-04-2021 (a sx) e al 26-09-2021 (a dx)

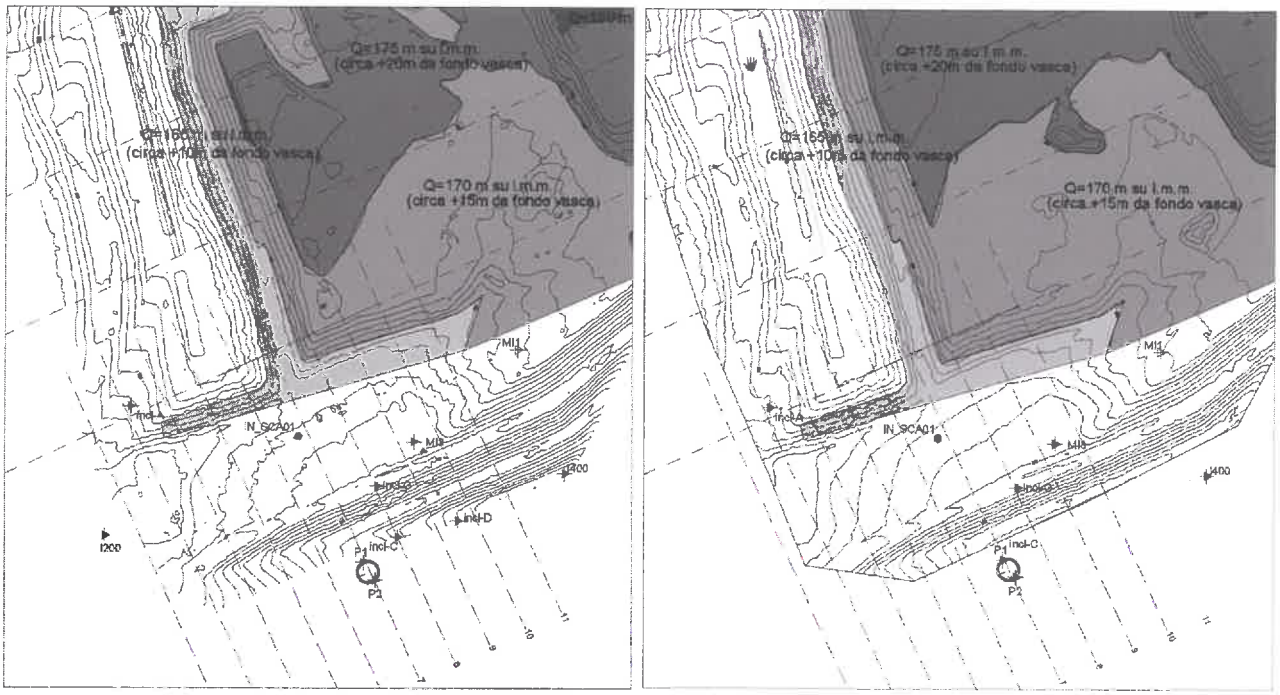


Figura 8 – Rilievo plano-altimetrico della discarica al 12-04-2022 (a sx) e al 12-2022 (a dx)

Figura 9 – Rilievo plano-altimetrico della discarica al 12-2022, esteso a monte

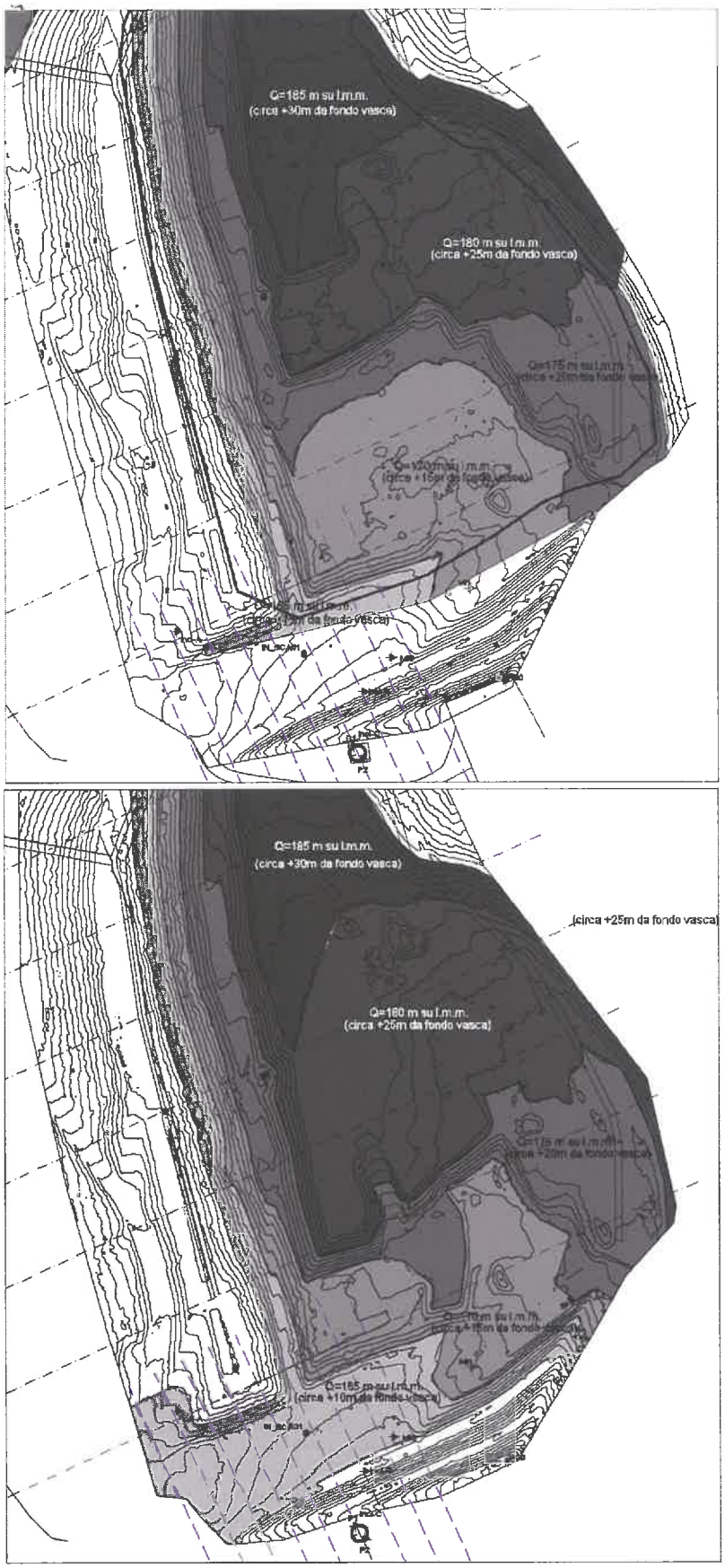


Figura 10 – Rilievi plano-altimetrici della discarica al 1-10-2023 e al 30-3-2024, estesi a monte

6 RISULTATI AGGIORNATI DEL MONITORAGGIO IN CORSO

Il sistema di monitoraggio attualmente operativo fornisce misure di spostamento in profondità (verticali inclinometriche), misure di pressione interstiziale (piezometri con cella Casagrande ed elettrici a corda vibrante), misure della portata emunta dai pozzi di piccolo diametro sulla sommità dell'argine e misure delle deformazioni locali in corrispondenza di 2 pali appartenenti ai setti a pettine (pali strumentati con strain-gauges).

6.1 Monitoraggio inclinometrico

Il monitoraggio inclinometrico dell'arginatura è attivo da dicembre 2016, appena poco dopo la fase parossistica del dissesto, allo scopo di comprenderne la cinematica e monitorarne l'evoluzione nel tempo. I dati ottenuti dagli inclinometri hanno permesso di valutare con accuratezza l'efficacia dell'intervento di consolidamento del dissesto così da consentire l'esercizio della discarica anche nelle aree prossime all'argine. Con il progressivo riempimento della discarica anche a ridosso dell'argine gli spostamenti verso l'interno della vasca si sono ovviamente annullati, mentre quelli verso valle risultano intensificati.

Ad oggi sono presenti i **15 tubi inclinometrici** rappresentati in Figura 11; le caratteristiche della strumentazione installata sono dettagliate in Tabella 1.

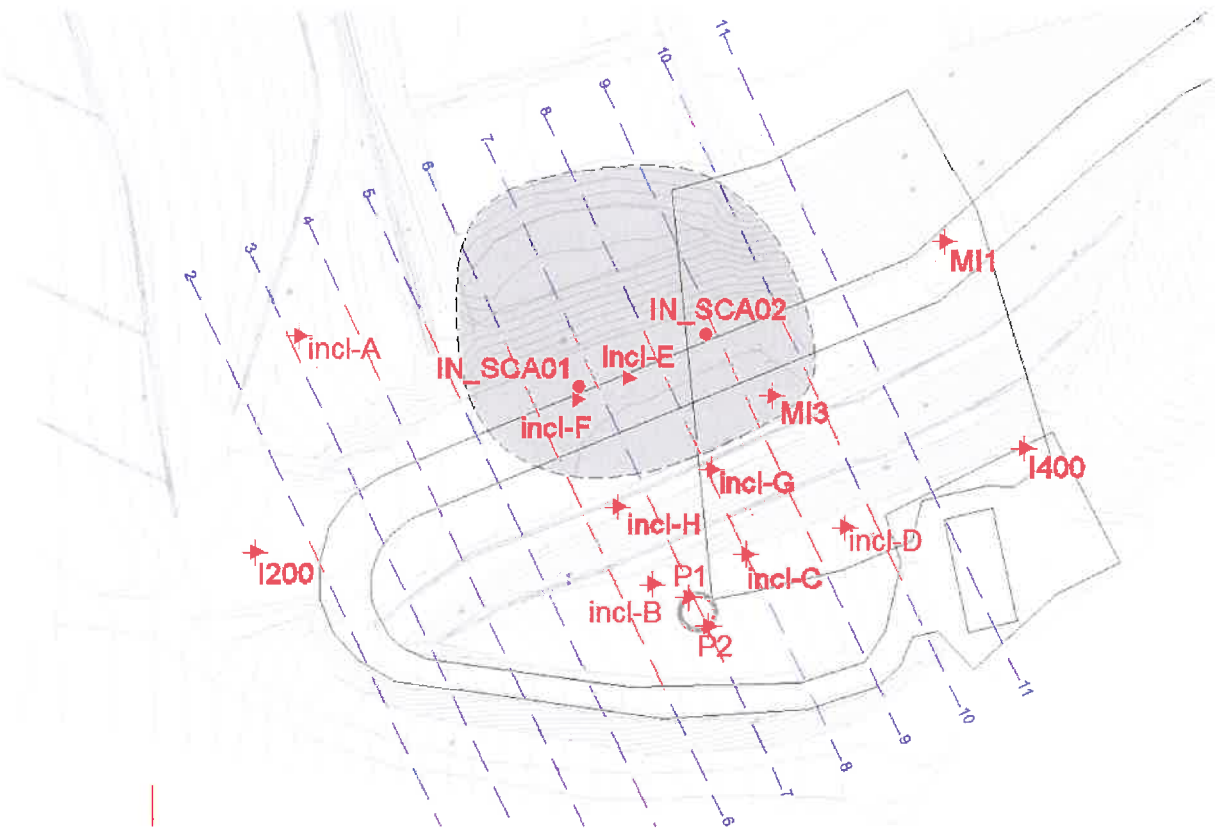


Figura 11 – Planimetria dell'argine con indicazione degli inclinometri operativi ad APRILE 2024

Tabella 1 – Dettaglio degli inclinometri attivi nell'area dell'argine

Codice	L (m)	DATA lettura 0	Letture (Apr.2024)	STATO	Commento
I200	13,50	19-07-2017	**81**	Attivo	
I400	13,50	18-05-2017	**88**	Attivo	
A	9,50	17-05-2017*	**88**	Attivo	Deformaz. a z=5,5 m
B	14,50	18-05-2017*	**88**	Attivo	Deformaz. a z=4 e 8m
C	7,00	18-05-2017*	**88**	Attivo	Def. diffusa tra 0 e 4 m
D	7,00	18-05-2017*	**88**	Attivo	Def. diffusa tra 0 e 3 m
E	13,00	17-05-2017	**88**	Attivo	**Interrotto a 13 m**
F	21,00	13-12-2016	12	**NON ATTIVO da Giu 2017**	**Interrotto a 16 m**
G	16,00	18-05-2017*	**88**	Attivo	Deformaz. a z=3 e 12 m
H	19,50	18-05-2017*	**88**	Attivo	Deformaz. a z=14 m
M1	29,00	23-11-2016*	12+15	**NON ATTIVO da Ago 2018**	Deformaz. a z=13 - 17 m
M1-bis	30,00	31-10-2018	**71**	Attivo	Deformaz. a z=16 e 23 m
M3	20,50	31-10-2018	**71**	Attivo	Def. diffusa tra 6 e 16 m
SCA01	23,50	19-04-2018	4	**NON ATTIVO da Ago 2018**	**Interrotto a z=15 m**
SCA01-bis	23,50	31-10-2018	**71**	Attivo	Deformaz. a z=14 m
SCA02	24,00	19-04-2018	**77**	Attivo	**Interrotto a z=13,5 m**
P2 (pozzo, l. sud)	14,50	28/06/2019	**56**	Attivo	
P1 (pozzo, l. nord)	14,50	28/06/2019	**56**	Attivo	
*tubi che hanno anche campagne di lettura precedenti					

Si ricorda che nel Dicembre 2022 la società **Isogea** che esegue le misure inclinometriche nell'impianto di Corinaldo ha rinnovato la sonda inclinometrica. Per dare continuità al monitoraggio e consentire di leggere la storia e la progressione degli spostamenti inclinometrici, è stata eseguita una lettura con la vecchia sonda il 29 novembre 2022 ed è stata ripetuta la lettura con la nuova sonda il 6 dicembre 2022. Ipotizzando nulli gli spostamenti tra il 29 novembre ed il 6 dicembre, si è utilizzata la lettura del 6 dicembre come "correzione" da applicare alle misure successive ottenute con la nuova sonda per renderle confrontabili con le vecchie letture ottenute con la sonda dismessa. Pur essendo tale procedura non prevista dalle norme internazionali di riferimento (ISO 18674-3) si condivide l'approccio adottato al fine di dare continuità al monitoraggio in corso.

La Figura 12 mostra gli spostamenti orizzontali alla quota del piano campagna registrati nel periodo **ottobre 2018 – aprile 2024** a seguito degli interventi di consolidamento e del riempimento in maniera consistente della discarica anche a ridosso dell'argine. Dalla figura si può osservare che gli spostamenti cumulati sono stati significativi, dell'ordine degli 85 mm per gli inclinometri collocati in sommità arginale (spostamento massimo di 128 mm in M3). L'effetto del riempimento della discarica sugli inclinometri H, G ed M3 risulta sempre evidente.

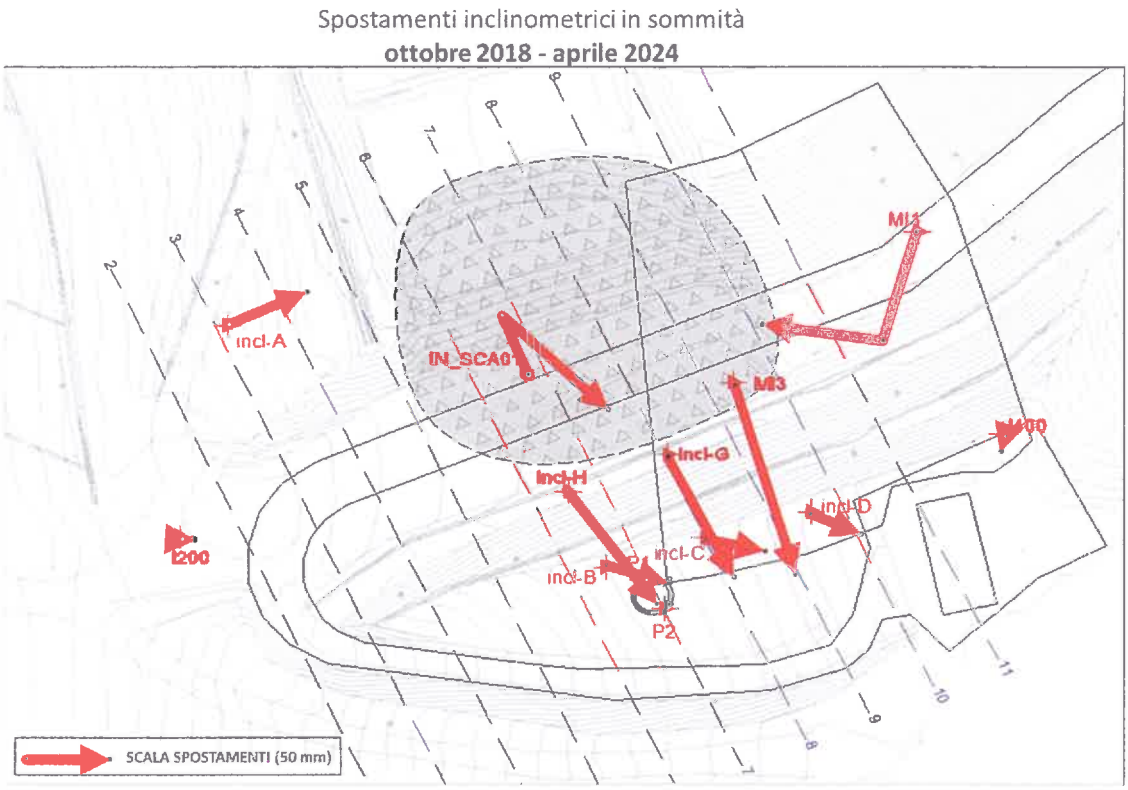


Figura 12 – Spostamenti inclinometrici nel periodo OTTOBRE 2018 – APRILE 2024

Per mettere in relazione spostamenti e lavorazioni nell'impianto si è provveduto a scomporre l'intervallo temporale in "semestri" consecutivi, Gennaio-Giugno 2019, Giugno 2019 - Gennaio 2020, Gennaio-Giugno 2020, Giugno 2020 - Gennaio 2021, Gennaio-Giugno 2021 e Giugno 2021 - Gennaio 2022, Gennaio-Giugno 2022, Giugno-Dicembre 2022, Gennaio-Giugno 2023, Giugno-Dicembre 2023 a cui **si è aggiunto lo spostamento dell'ultimo quadrimestre DICEMBRE 2023 – APRILE 2024** (Figura 18). In Figura 13, Figura 14, Figura 15, Figura 16 e Figura 17 sono riportate le planimetrie dell'argine con i vettori orientati dello spostamento rilevato dagli inclinometri rappresentati in tutte le figure nella medesima scala. Si osserva che nel semestre giugno 2019 – gennaio 2020 si concentra buona parte della deformazione complessiva dell'argine e che tali spostamenti possono essere ben correlati al riempimento della discarica a ridosso del rilevato, con uno spessore di rifiuti pari a circa 10 m. Nel semestre successivo, dove la quota dei rifiuti è aumentata solo nel settore est, si osserva infatti che l'entità degli spostamenti diminuisce drasticamente. Osservando con attenzione si può individuare che il contributo del riempimento nel settore est, che ha portato lo spessore dei rifiuti a circa 20 m dal fondo vasca, ha determinato gli incrementi di spostamento dell'inclinometro MI1 verso sud-ovest nel periodo gennaio-giugno 2020. Nel successivo periodo giugno-novembre 2020, a fronte di un modesto aumento delle quote dei rifiuti a monte dell'argine, si è osservato un incremento della deformazione di circa 10 mm negli inclinometri G e H. Nel periodo successivo, novembre 2020 – giugno 2021, spostamenti degni di nota sono stati riscontrati solo negli inclinometri MI1 ed MI3. Non

essendoci stato abbancamento di rifiuti in prossimità dell'argine, tali incrementi possono probabilmente essere ricondotti al passaggio dei mezzi pesanti diretti verso la zona più arretrata della discarica, ad ulteriore conferma della sensibilità dell'argine alle azioni esterne. Nel periodo giugno 2021-gennaio 2022 è ripreso l'abbancamento di rifiuti a tergo dell'argine e si sono registrati nuovi incrementi della velocità spostamento negli inclinometri G, H ed M3.

Nel successivo semestre, gennaio – giugno 2022, non si evidenziano situazioni degne di nota, se non un blando proseguimento dei trend deformativi principali già evidenziati in precedenza.

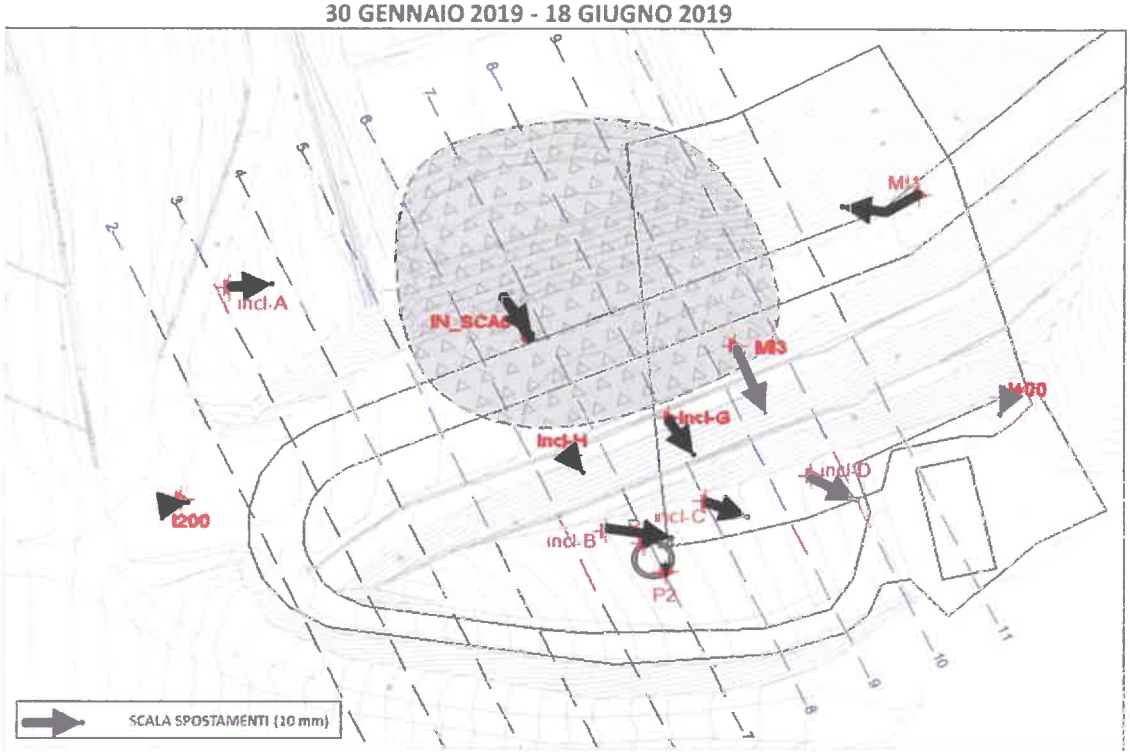
Nel semestre giugno – dicembre 2022 l'elaborazione, che ha richiesto un raccordo con le misure precedenti per il cambio di sonda inclinometrica, mostra una situazione stabile. Fa eccezione l'inclinometro A che, posizionato poco a monte della spalla destra dell'argine, mostra un movimento della coltre superficiale del versante.

Nel semestre dicembre 2022 – giugno 2023 la situazione si mantiene piuttosto stabile se paragonata alle velocità di deformazione osservate nei periodi corrispondenti allo sversamento dei rifiuti a ridosso dell'argine. Aumentando la scala di rappresentazione dei vettori si osservano spostamenti di diversi millimetri verso valle degli inclinometri in cresta arginale (G-H-M3 ed M1).

Nel semestre **giugno - dicembre 2023** si osserva la prosecuzione dei trend deformativi precedentemente evidenziati. Si osserva in particolare che gli inclinometri sulla cresta arginale (G-H-M3) mostrano degli spostamenti in superficie di alcuni millimetri pur in assenza di cause perturbatrici chiaramente identificabili – a meno del transito dei mezzi pesanti -, a conferma dell'elevata deformabilità del corpo arginale (si noti che, come si evidenzierà in seguito, lo spostamento esibito dall'inclinometro G è per gran parte concentrato nei primi 2 m di profondità).

Le **misure più recenti, relative al quadrimestre dicembre 2023 – giugno 2024** confermano i trend deformativi ormai chiaramente delineati nel consistente periodo di osservazione. In particolare gli inclinometri M1, M3 e G evidenziano un incremento di alcuni millimetri dello spostamento sommitale.

Spostamenti inclinometrici in sommità
30 GENNAIO 2019 - 18 GIUGNO 2019



Spostamenti inclinometrici in sommità
18 GIUGNO 2019 - 23 GENNAIO 2020

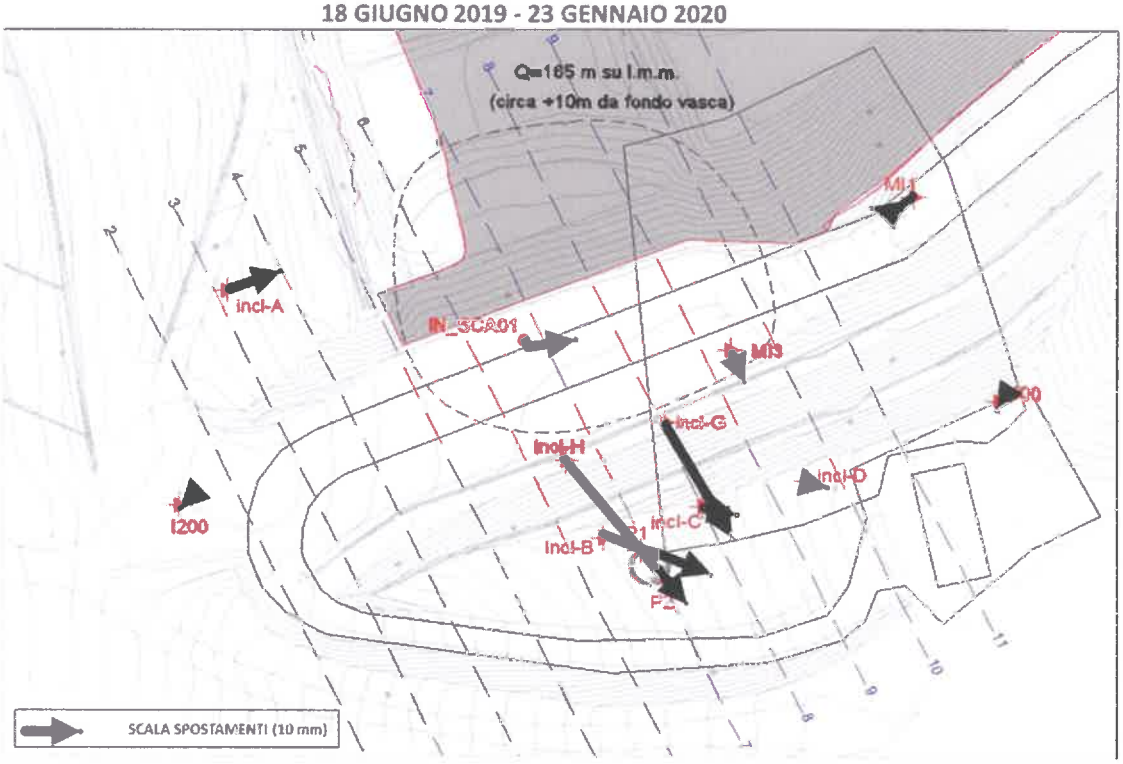
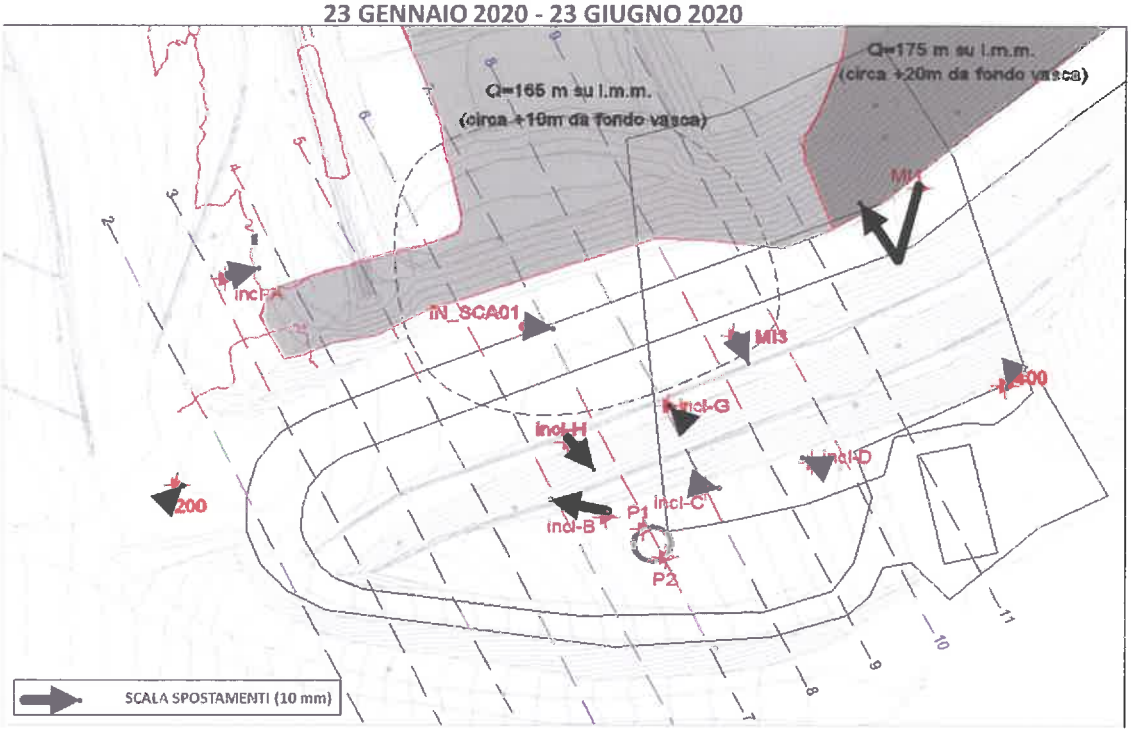


Figura 13 – Spostamenti inclinometrici GEN - GIU 2019 e GIU 2019 – GEN 2020

Spostamenti inclinometrici in sommità
23 GENNAIO 2020 - 23 GIUGNO 2020



Spostamenti inclinometrici in sommità
23 GIUGNO 2020 - 20 GENNAIO 2021

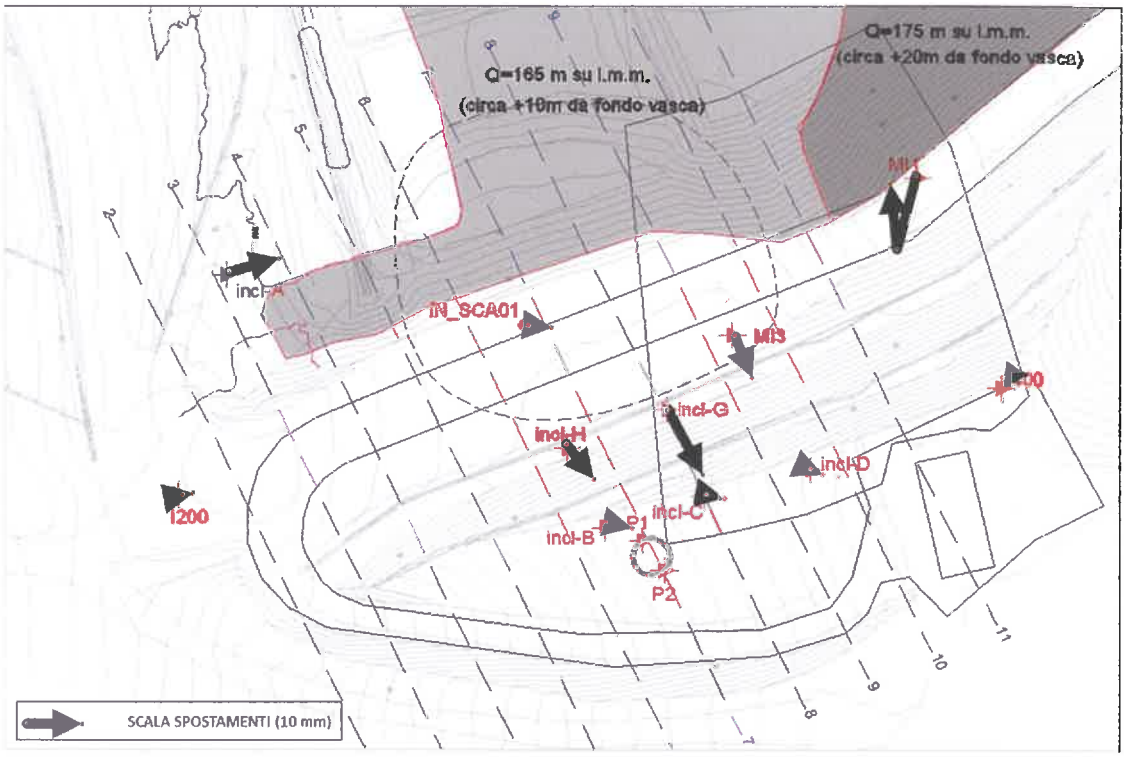
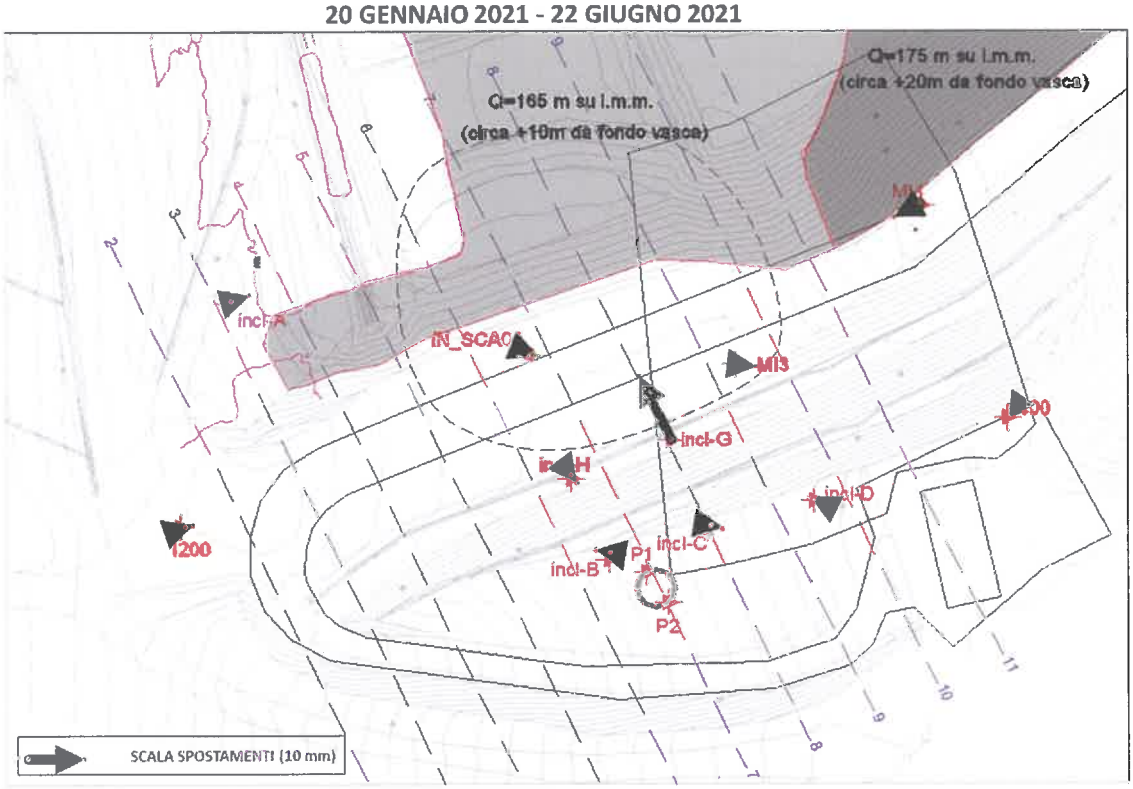


Figura 14 – Spostamenti inclinometrici GEN - GIU 2020 e GIU 2020 - GEN 2021

Spostamenti inclinometrici in sommità
20 GENNAIO 2021 - 22 GIUGNO 2021



Spostamenti inclinometrici in sommità
22 GIUGNO 2021 - 4 GENNAIO 2022

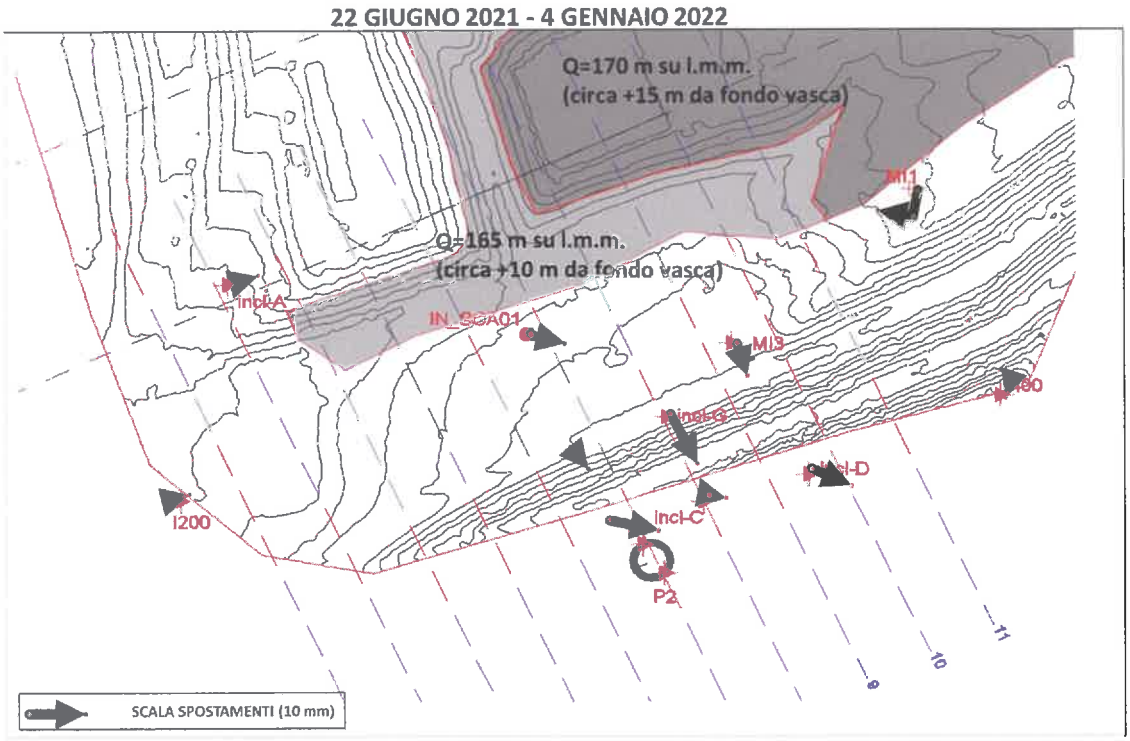
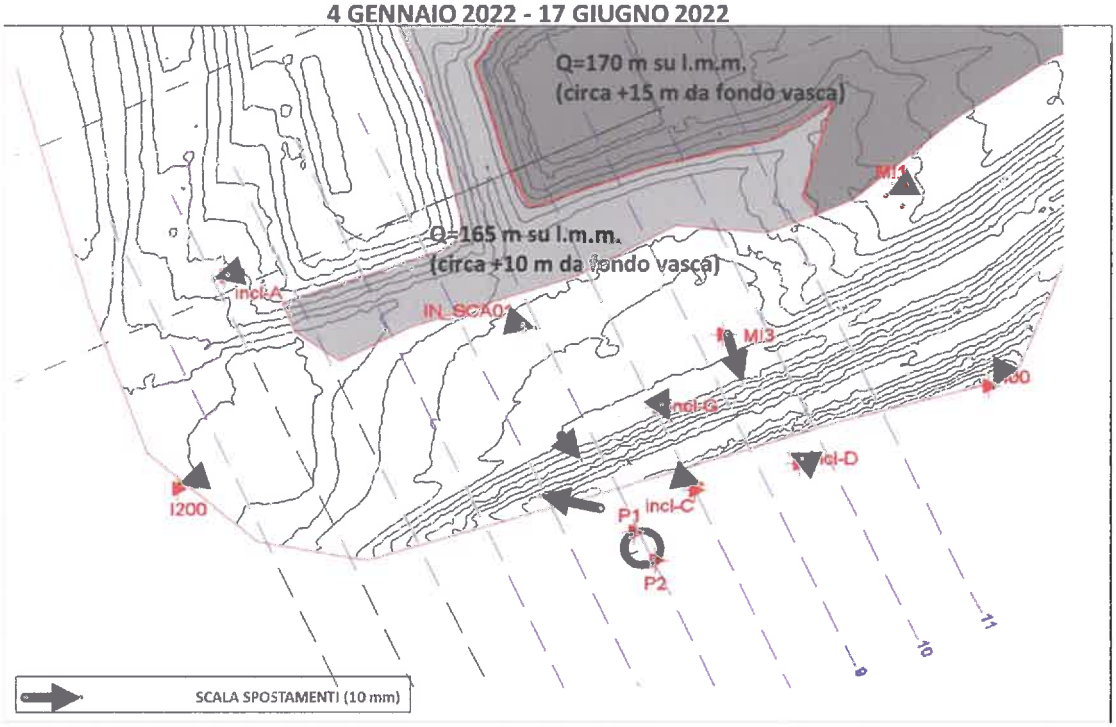


Figura 15 – Spostamenti inclinometrici GEN – GIU 2021 e GIU 2021 – GEN 2022

Spostamenti inclinometrici in sommità
4 GENNAIO 2022 - 17 GIUGNO 2022



Spostamenti inclinometrici in sommità
17 GIUGNO 2022 - 29 DICEMBRE 2022

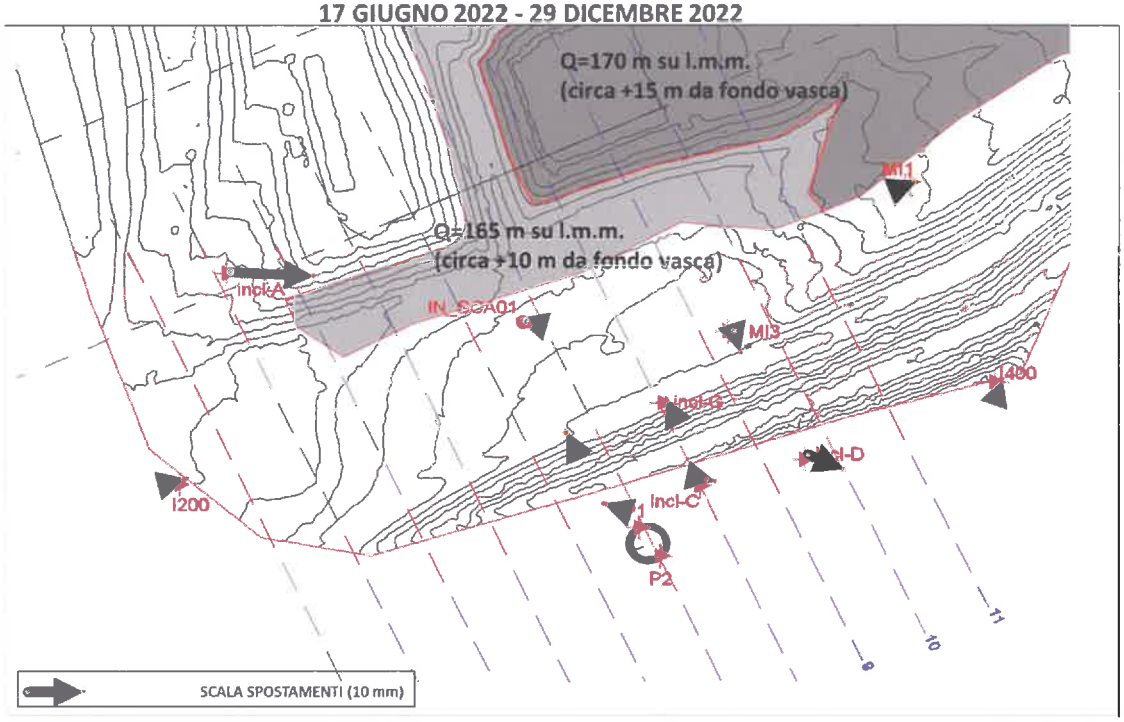
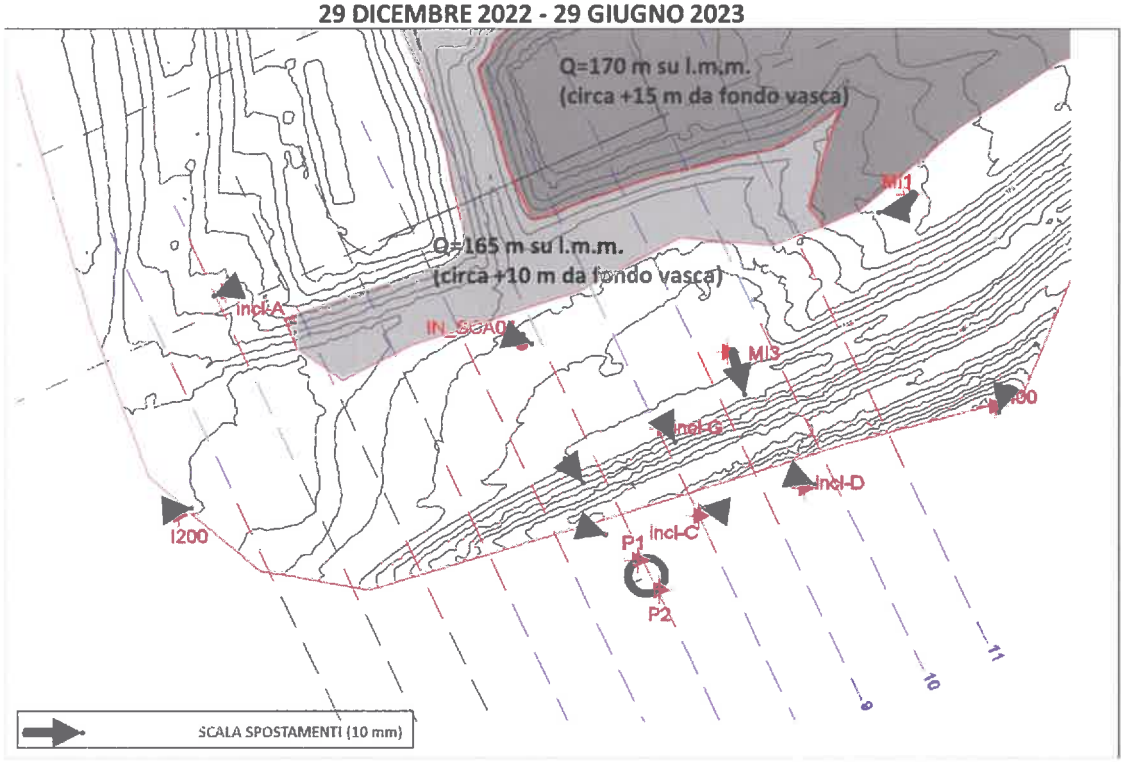


Figura 16 – Spostamenti inclinometrici GEN – GIU 2022 e GIU – DIC 2022

Spostamenti inclinometrici in sommità
29 DICEMBRE 2022 - 29 GIUGNO 2023



Spostamenti inclinometrici in sommità
29 GIUGNO 2023 - 20 DICEMBRE 2023

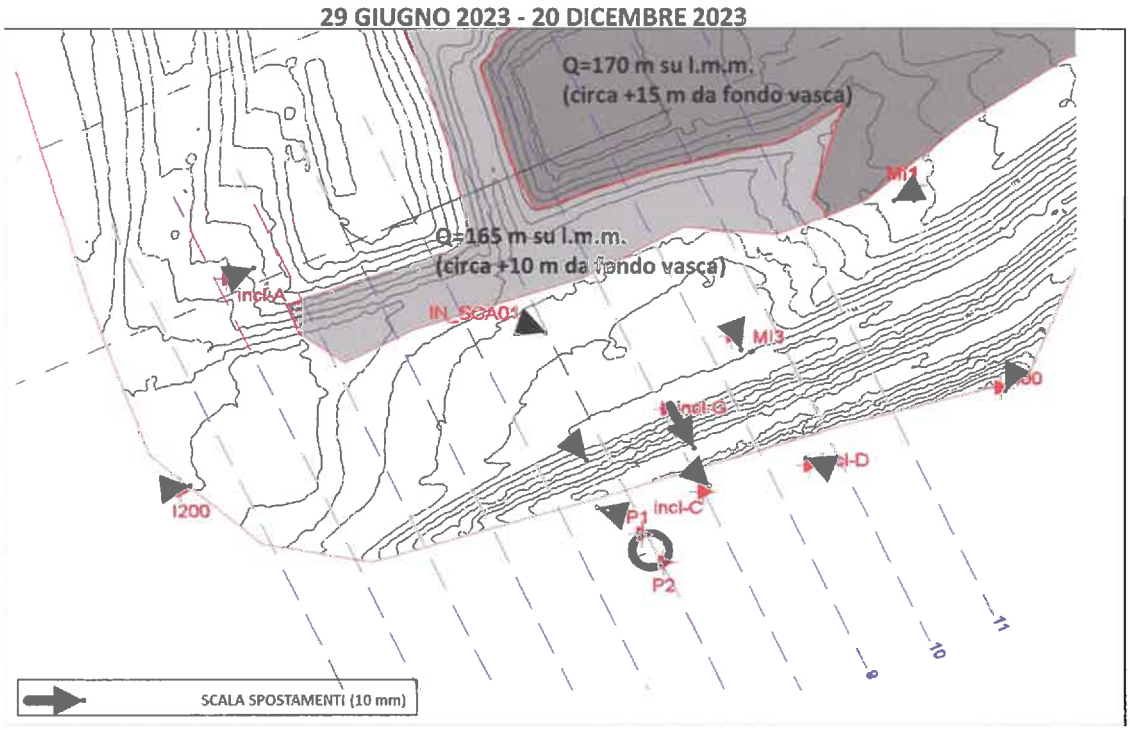


Figura 17 – Spostamenti inclinometrici DIC 2022 – GIU 2023 e GIU - DIC 2023

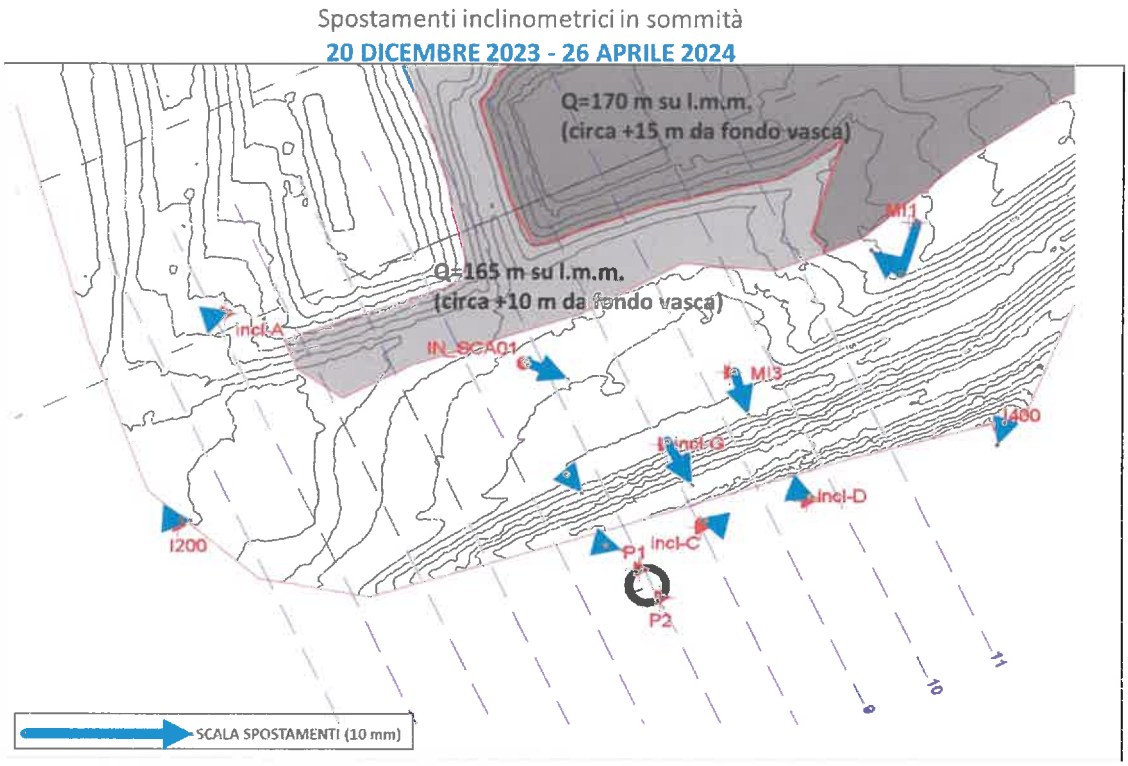


Figura 18 – Spostamenti inclinometrici DIC 2024 – APR 2024 (in scala di rappresentazione amplificata)

In Figura 19 sono riportate le deformate inclinometriche più significative registrate nel corso del monitoraggio lungo le sezioni trasversali dell'argine n.7 e n.9. Si può osservare come buona parte della deformazione si sia concentrata nel corpo arginale medesimo e nei terreni della coltre eluvio-colluviale sottostante (quando presente), mentre la formazione di base è sempre risultata stabile.

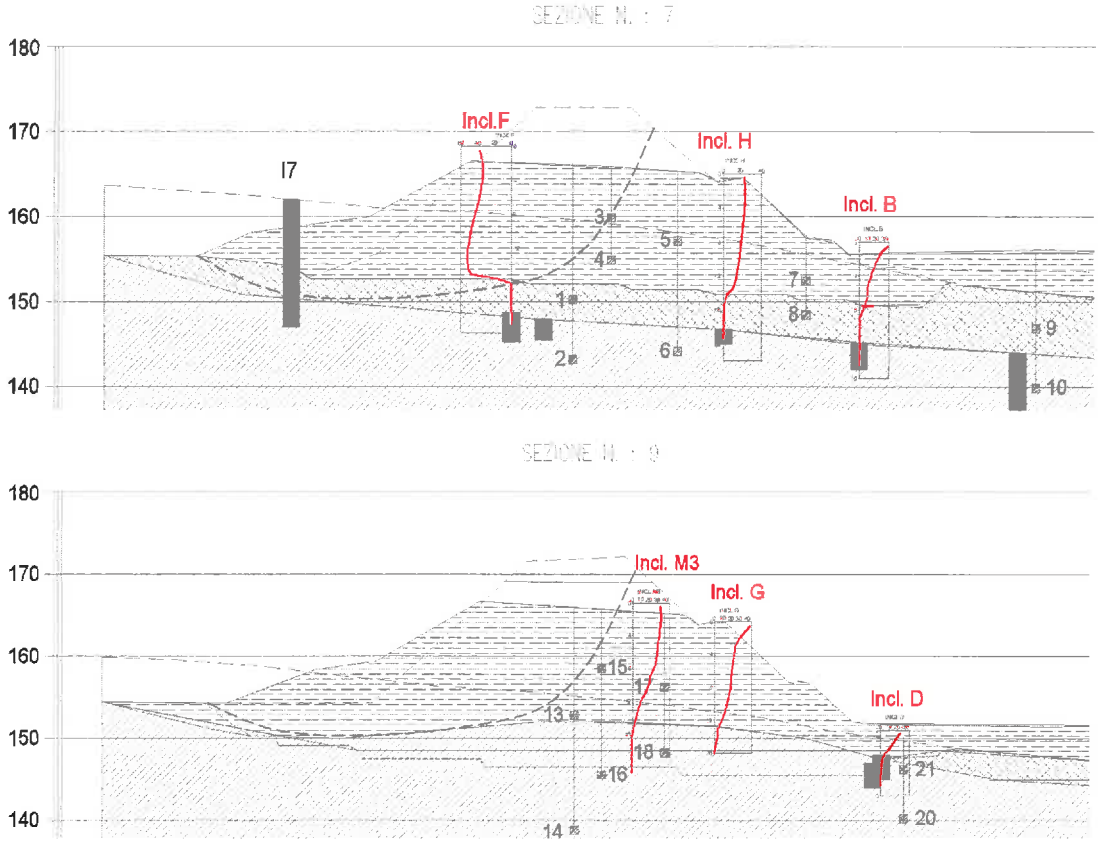


Figura 19 – Forma delle deformate inclinometriche più significative delle sezioni n.7 e n.9 dell'argine

Il dissesto originario, diretto verso l'interno della discarica, è stato monitorato prima dall'**inclinometro F** e poi dall'**inclinometro SCA01**. Le letture realizzate su tale strumento, mostrate in Figura 20, identificavano il cinematismo iniziale con superficie di scorrimento a 13-14 m di profondità, poi stabilizzato dagli interventi di consolidamento messi in atto nel 2018, il cui successo è evidenziato dall'arresto di ogni progressione dello spostamento alla quota di scorrimento del dissesto. Peraltro, il completamento dell'accumulo dei rifiuti a tergo dell'arginatura rende chiaramente nullo qualunque rischio di progressione del fenomeno in tale direzione. Al contrario, le letture più recenti continuano ad indicare una deformazione verso valle dalla testa dell'inclinometro fino a 6 metri di profondità.

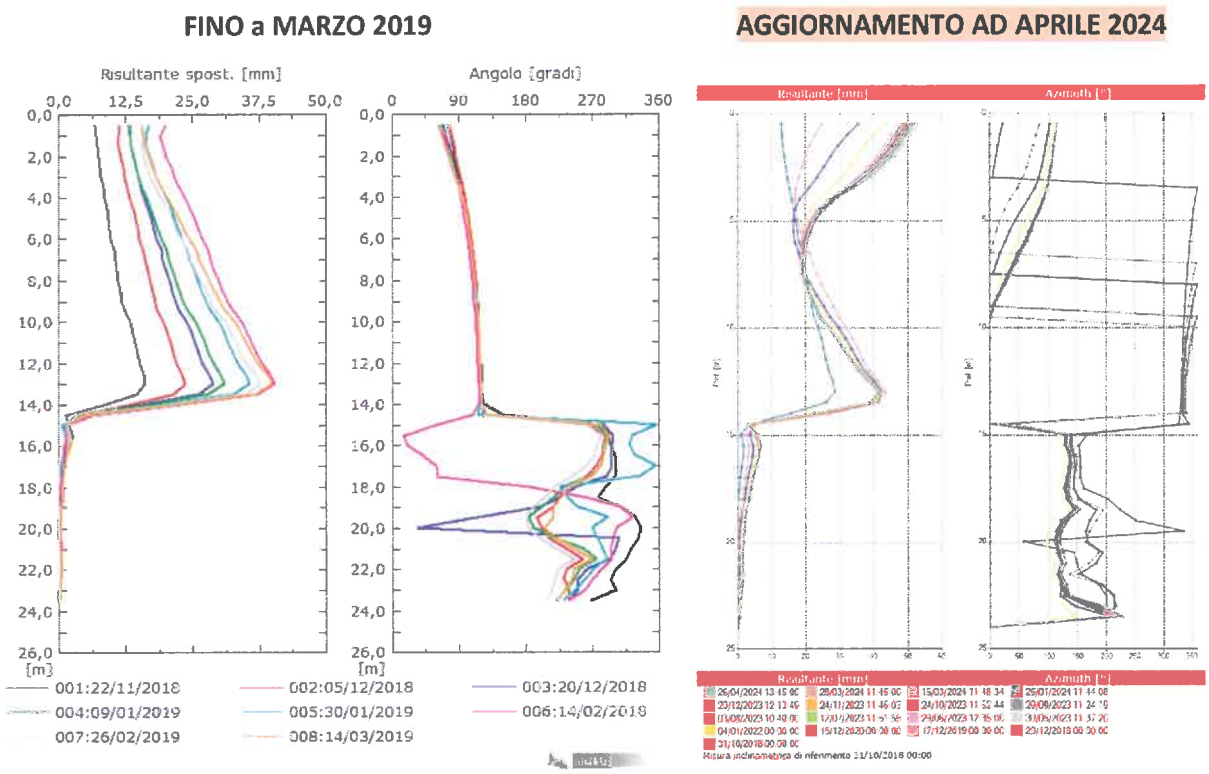


Figura 20 – Inclinometro SCA01 (zero al 31-10-2018): deformata differenziale integrale dal basso e azimut nel periodo iniziale con il dissesto interno attivo (a sx) e nel periodo più recente (a dx)

Con il riempimento della discarica è dunque rilevante valutare la risposta dell'argine alla spinta dei rifiuti. Per questo si sono considerati in dettaglio gli spostamenti misurati dai tre **inclinometri G**, **H** ed **MI3**, collocati sulla sommità dell'argine (vedi planimetria di Figura 21), maggiormente indicativi della risposta dell'opera alle lavorazioni nel periodo di osservazione.

Figura 21 – Inclinometri selezionati per il monitoraggio dell'argine durante il riempimento della discarica

In Figura 22 è mostrato l'andamento nel tempo degli spostamenti in sommità registrati dai 3 inclinometri. Si osservano:

- spostamenti significativi fino a dicembre 2018, quando l'insieme degli interventi di consolidamento risulta efficace per stabilizzare l'argine ed arrestare la progressione delle deformazioni;
- nell'estate 2019 un nuovo aumento degli spostamenti a seguito dell'abbancamento di rifiuti a ridosso dell'argine:
- dal dicembre 2019 all'estate 2021 un modesto incremento degli spostamenti con velocità di circa 1,5 mm/mese, uniforme sui tre inclinometri considerati. Anche se non ci sono stati ulteriori abbancamenti di rifiuti a ridosso dell'argine, ci sono da considerare i lenti processi di consolidazione in corso nonché il fatto che per l'abbancamento nell'area più interna della discarica, oggi in uso, i camion transitavano proprio in prossimità dell'argine;
- da agosto 2021 una ulteriore variazione della velocità di spostamento riconducibile ad una nuova fase di abbancamento dei rifiuti a ridosso dell'argine;
- da dicembre 2021 ad aprile 2022 l'andamento degli spostamenti è tornato ad una situazione di sostanziale stabilità, con spostamenti modesti ma non nulli;
- da aprile 2022 ad agosto 2022 non si osservano variazioni di rilievo;
- da agosto 2022 a dicembre 2022 non si osservano variazioni di rilievo;
- da dicembre 2022 ad aprile 2023: non si osservano variazioni di rilievo, M3 prosegue su un trend crescente con velocità di circa 12 mm/anno;
- da aprile 2023 a settembre 2023: non si osservano variazioni di rilievo, tutti e tre gli inclinometri proseguono su un trend crescente di spostamento;
- da ottobre 2023 a dicembre 2023: non si osservano variazioni di rilievo, gli inclinometri indicano il permanere del precedente trend incrementale di spostamento in sommità (12mm/anno per M3; 6-7mm/anno per G ed H);
- **da dicembre 2023 ad aprile 2024 (NUOVI DATI): proseguono i trend deformativi indicati in precedenza.**

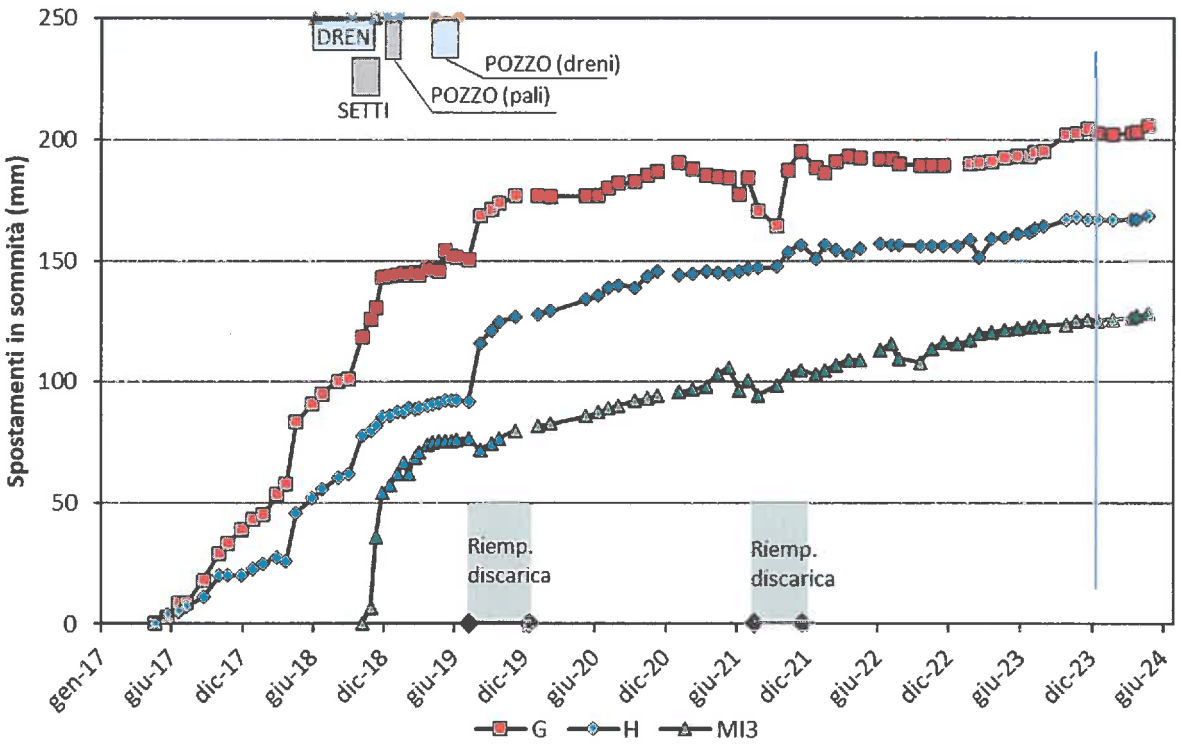


Figura 22 – Andamento nel tempo degli spostamenti in sommità degli Inclinometri G, H e M3

In ragione della non trascurabile velocità di deformazione in sommità, si è analizzata nel dettaglio l'evoluzione recente della deformazione con la profondità degli inclinometri G, H ed M3. In Figura 23 sono mostrate le deformate inclinometriche maturate nell'ultimo periodo nelle tre verticali inclinometriche. Si può osservare la porzione di inclinometro infissa nel substrato pliocenico (tra 14 e 16 m di profondità) che rimane stabile, quindi una modesta deformazione distribuita sull'intera altezza dell'argine ed una concentrazione nei primi due metri di profondità. Escludendo tale deformazione superficiale, poco significativa ai fini della sicurezza dell'arginatura, lo spostamento si attesta a circa 4-7mm/anno, valore non trascurabile ma al momento non preoccupante perché diffuso su tutta l'altezza del corpo arginale.

Appare degno di nota osservare che gli inclinometri G ed H al passaggio nella formazione presentano una sorta di deformata "ad S" del tubo inclinometrico. Tale forma può essere ricondotta ad uno "schiacciamento" del tubo originato da un abbassamento del rilevato. Nel prosieguo del monitoraggio si presterà attenzione a questo aspetto, auspicando l'installazione degli assestimetri sull'argine per avere conferma strumentale di tale fenomeno.

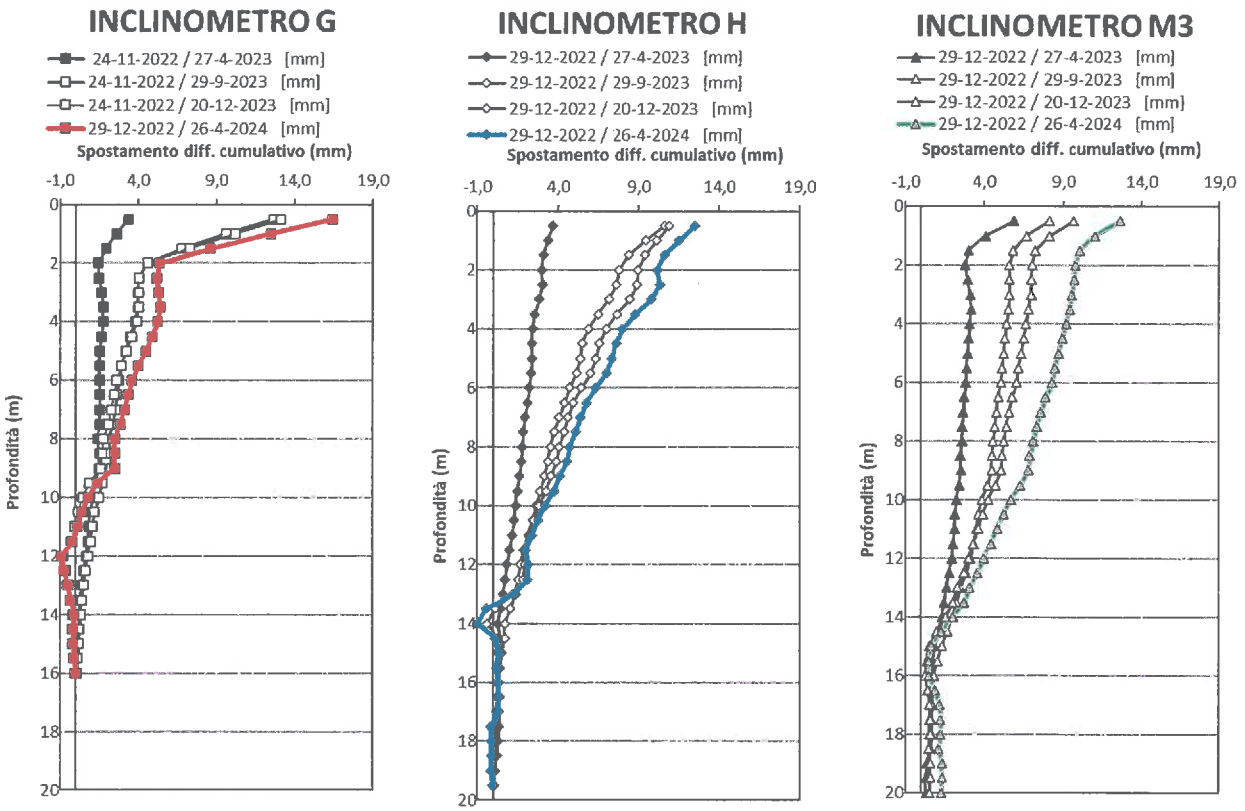


Figura 23 – Inclinometri G (zero al 24-11-2022), H (zero al 29-12-2022) e MI3 (zero al 29-12-2022): deformata differenziale integrale dal basso al 27-04-2023, 29-09-2023 e 20-12-2023

6.2 Monitoraggio piezometrico

La planimetria di Figura 24 mostra la disposizione planimetrica degli strumenti di monitoraggio piezometrico. Si tratta di piezometri a tubo aperto (PA, PB, PC, ASV), piezometri Casagrande (codice PC) e 22 celle piezometriche elettriche (codice PE), attive dall'aprile 2018. Le celle elettriche, che registrano i dati con cadenza oraria, sono collocate lungo le sezioni 7 e 9 come indicato in Figura 25.

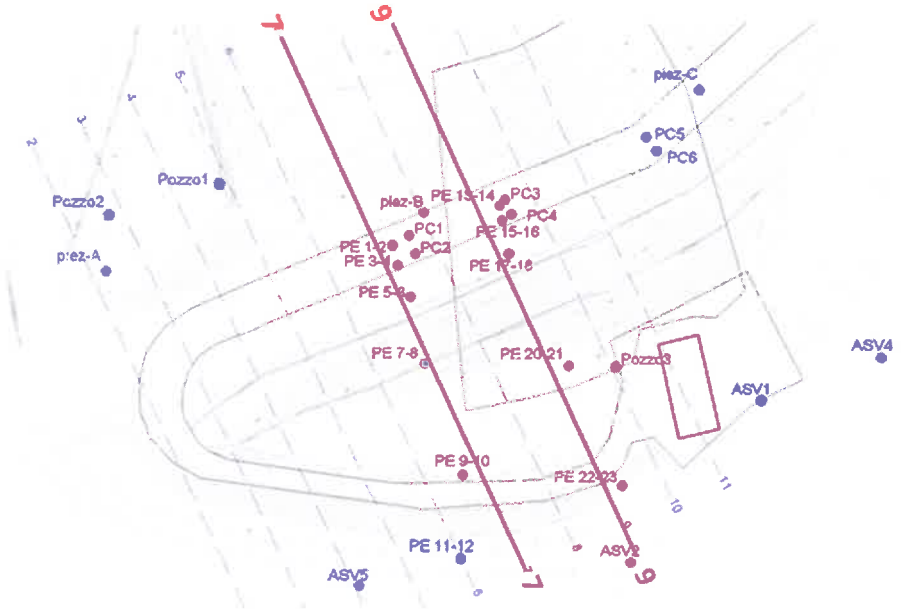


Figura 24 – Planimetria dell'argine con indicazione delle verticali di monitoraggio piezometrico

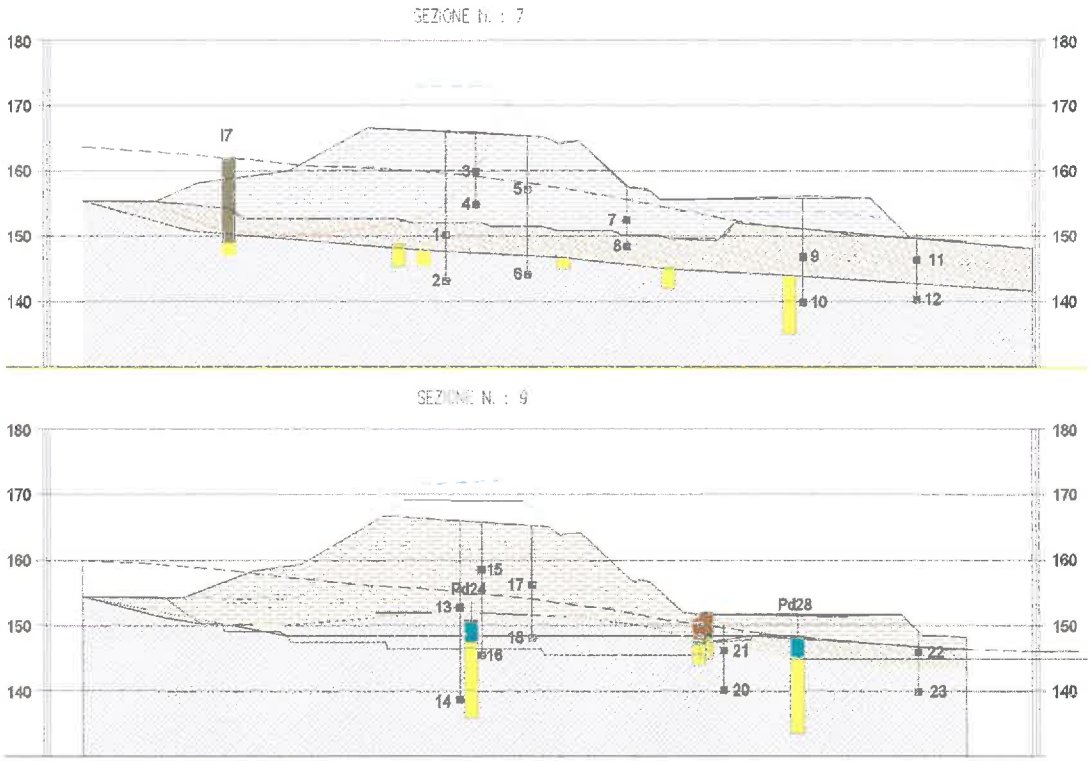


Figura 25 – Sezioni n.7 e n.9 dell'argine con indicazione della posizione delle celle piezometriche elettriche

Il sistema di monitoraggio con celle elettriche si è dimostrato un valido strumento di controllo della piezometria dell'argine anche se ha manifestato fin da subito alcuni problemi di stabilità del segnale elettrico che ha determinato la non perfetta continuità delle letture su tutti gli strumenti e la necessità di un filtraggio di molti valori spuri. Dal 8 marzo 2024 è stato rinnovato il sistema di acquisizione automatizzato.

Come mostrato analiticamente in Tabella 2, il sistema di monitoraggio si è piuttosto depauperato nel tempo, risultando ad oggi funzionanti 11 sensori su 22.

Tabella 2 – Dettaglio dei piezometri elettrici installati

Piezometro	Tipo	Terreno	Profondità cella [m da p.c.]	Data installazione	STATO (al MAGGIO 2021)
PE1	C. Elettrica	Coltre eluvio-colluviale	16,00	3-04-2018	DATI NON VALIDI dal 15/6/2023
PE2	C. Elettrica	Argille grigio-azzurre	23,00	4-04-2018	ATTIVO
PE3	C. Elettrica	Corpo arginale	6,00	4-04-2018	DATI NON VALIDI dal 12/1/2023
PE4	C. Elettrica	Corpo arginale	11,00	4-04-2018	ATTIVO
PE5	C. Elettrica	Corpo arginale	8,00	4-04-2018	ATTIVO
PE6	C. Elettrica	Argille grigio-azzurre	21,00	4-04-2018	ATTIVO
PE7	C. Elettrica	Corpo arginale	5,00	4-04-2018	DATI NON VALIDI dal 27/11/2022
PE8	C. Elettrica	Coltre eluvio-colluviale	9,00	4-04-2018	DATI NON VALIDI dal 27/11/2022
PE9	C. Elettrica	Coltre eluvio-colluviale	9,00	5-04-2018	DATI NON VALIDI dal 5/11/2019
PE10	C. Elettrica	Argille grigio-azzurre	16,00	5-04-2018	DATI NON VALIDI dal 5/11/2019
PE11	C. Elettrica	Coltre eluvio-colluviale	4,00	6-04-2018	DATI NON VALIDI dal 1/03/2019
PE12	C. Elettrica	Argille grigio-azzurre	10,00	6-04-2018	DATI NON VALIDI dal 4/03/2019
PE13	C. Elettrica	Corpo arginale	13,00	10-04-2018	ATTIVO
PE14	C. Elettrica	Argille grigio-azzurre	27,00	10-04-2018	ATTIVO
PE15	C. Elettrica	Corpo arginale	7,00	11-04-2018	ATTIVO
PE16	C. Elettrica	Argille grigio-azzurre	20,00	11-04-2018	ATTIVO
PE17	C. Elettrica	Corpo arginale	9,00	13-04-2018	DATI NON VALIDI 11/11/2021
PE18	C. Elettrica	Argille grigio-azzurre	17,00	13-04-2018	ATTIVO
PE20	C. Elettrica	Argille grigio-azzurre	10,00	16-04-2018	ATTIVO
PE21	C. Elettrica	Argille grigio-azzurre	4,00	16-04-2018	ATTIVO
PE22	C. Elettrica	Coltre eluvio-colluviale	3,00	16-04-2018	DATI NON VALIDI dal 17/12/2018
PE23	C. Elettrica	Argille grigio-azzurre	9,00	16-04-2018	DATI NON VALIDI dal 9/11/2022

L'andamento nel tempo delle pressioni interstiziali misurate nelle celle elettriche efficienti è mostrato in Figura 26 e Figura 27. Nelle stesse figure sono indicati i periodi di realizzazione dei principali interventi di consolidamento dell'arginatura. Si tratta di un periodo di osservazione molto significativo, pari a circa 6 anni.

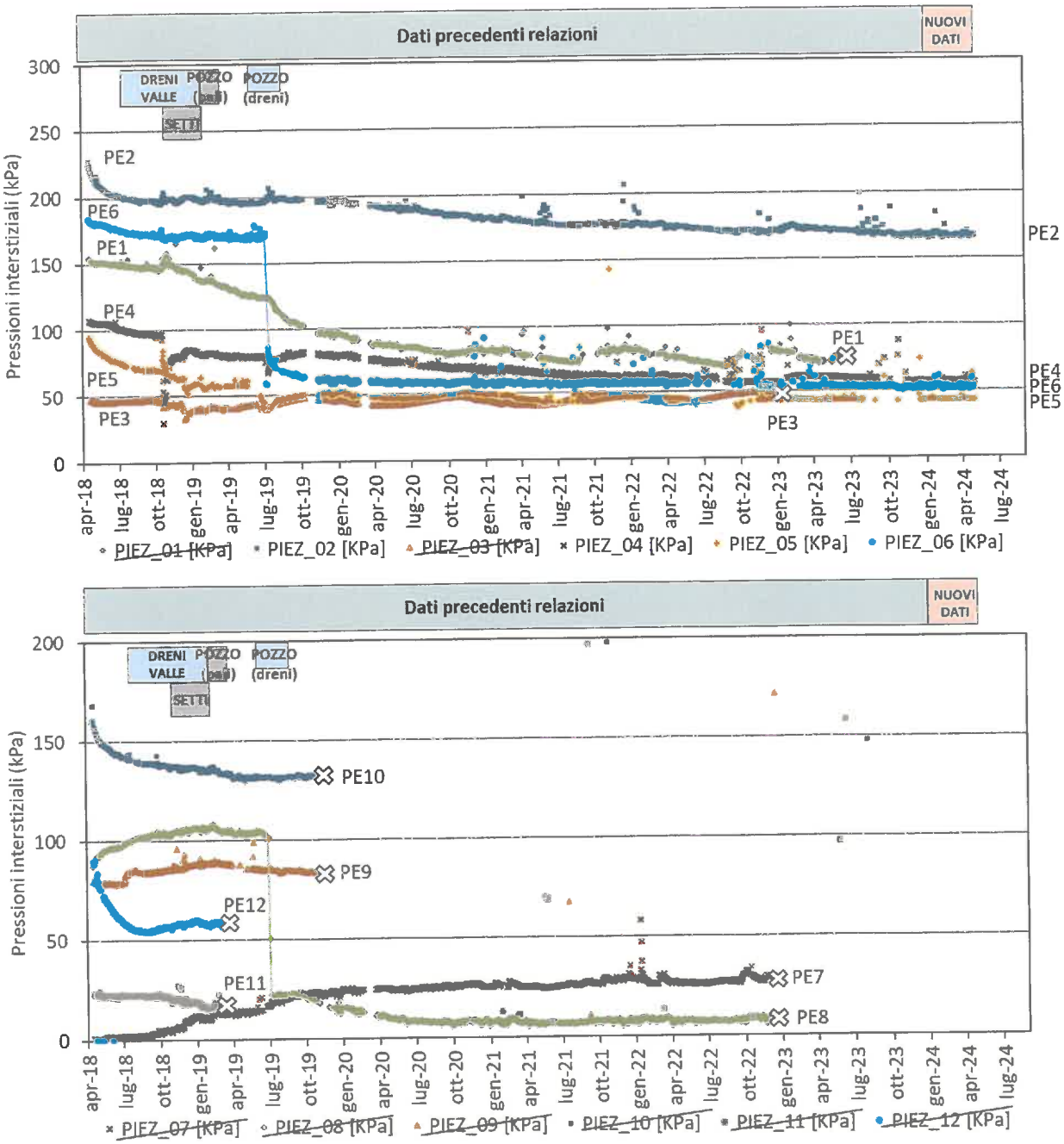


Figura 26 – Andamento nel tempo delle pressioni interstiziali misurate dalle celle PE1-PE12

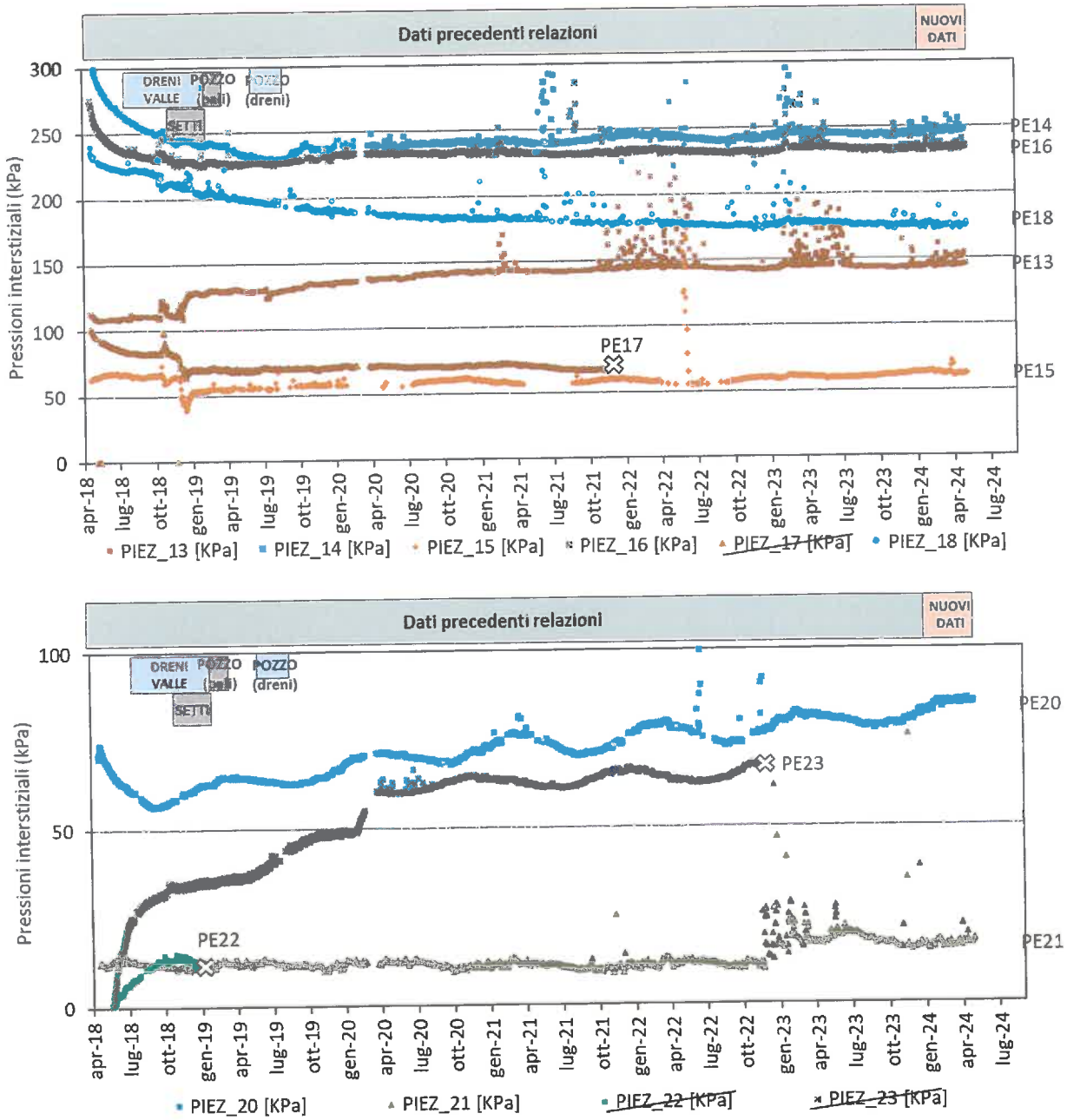


Figura 27 – Andamento nel tempo delle pressioni interstiziali misurate dalle celle PE13-PE23

Dai grafici aggiornati non si rilevano novità rispetto alle osservazioni del passato, con effetti degli interventi di drenaggio sulle sovrappressioni interstiziali che sembrano essersi esauriti od evolvere con estrema lentezza. Si è già osservato che solo la realizzazione dei dreni sub-orizzontali dall'interno del pozzo drenante di valle ha prodotto degli effetti evidenti sulle pressioni interstiziali rilevate dalle celle più vicine alle aste drenanti (PE6 e PE8) e la progressiva riduzione del carico idraulico su altre celle prossime all'area di intervento (PE1 e PE5).

La cella PE23, collocata nel substrato marnoso a valle dell'argine, ha colmato i valori stranamente bassi ed anomali registrati nel primo periodo di attività e le misure indicano una convergenza con le misure della cella PE20, posta in prossimità e nella medesima litologia. Dal novembre 2022, tuttavia, la cella PE23 ha cessato di fornire dati validi.

Osservando i trend di lungo termine si conferma che le celle più profonde (PE2, PE14, PE16, PE18), collocate nella formazione Pliocenica, mostrano un comportamento differenziato: mentre le celle PE2 e PE18 mostrano un trend decrescente nel lungo termine (circa 10 kPa ogni anno), PE14 e PE16 mantengono gli elevati valori di pressione interstiziale raggiunti.

La Figura 28 mostra le medesime letture alle celle elettriche, espresse in termini di altezza piezometrica, per i sensori più significativi della sezione n.7 e n.9 dell'argine. Dalla figura si confermano anche con il presente aggiornamento le osservazioni precedenti e precisamente che:

- molte celle elettriche indicano il permanere di elevate pressioni interstiziali nell'argine, con altezze piezometriche prossime all'attuale sommità dell'argine, sia su celle poste nel corpo arginale stesso (PE4, PE5, PE13) che su celle collocate nei terreni di fondazione (PE2, PE16, PE18);
- sono significativi gli effetti di riduzione del carico idraulico nella sezione n.7 ottenuti grazie alle aste drenanti del pozzo di valle (PE1 fino a giungo 2023, PE6, PE8).

La presenza di perduranti ed elevate pressioni interstiziali nel corpo arginale è peraltro confermata dagli elevati valori delle altezze piezometriche misurate su alcune celle Casagrande nonché sulle recenti letture sui pozzi verticali di piccolo diametro non attrezzati con pompa di emungimento.

In Figura 29 e Figura 30 sono rappresentate le altezze piezometriche misurate dai piezometri elettrici attivi sulle sezioni arginali n.7 e n.9, confrontando le misure del 12 giugno 2018 con quelle aggiornate al 31 agosto 2023 (rappresentative anche della situazione attuale). Si può osservare che le pressioni interstiziali nella sezione n.7 mostrano una generalizzata e significativa diminuzione tra il 2018 ed il 2022, mentre tale riduzione è molto più limitata nella sezione n.9. È anche evidente la riduzione dei sensori attivi nel periodo recente, specialmente nella sezione n.7.

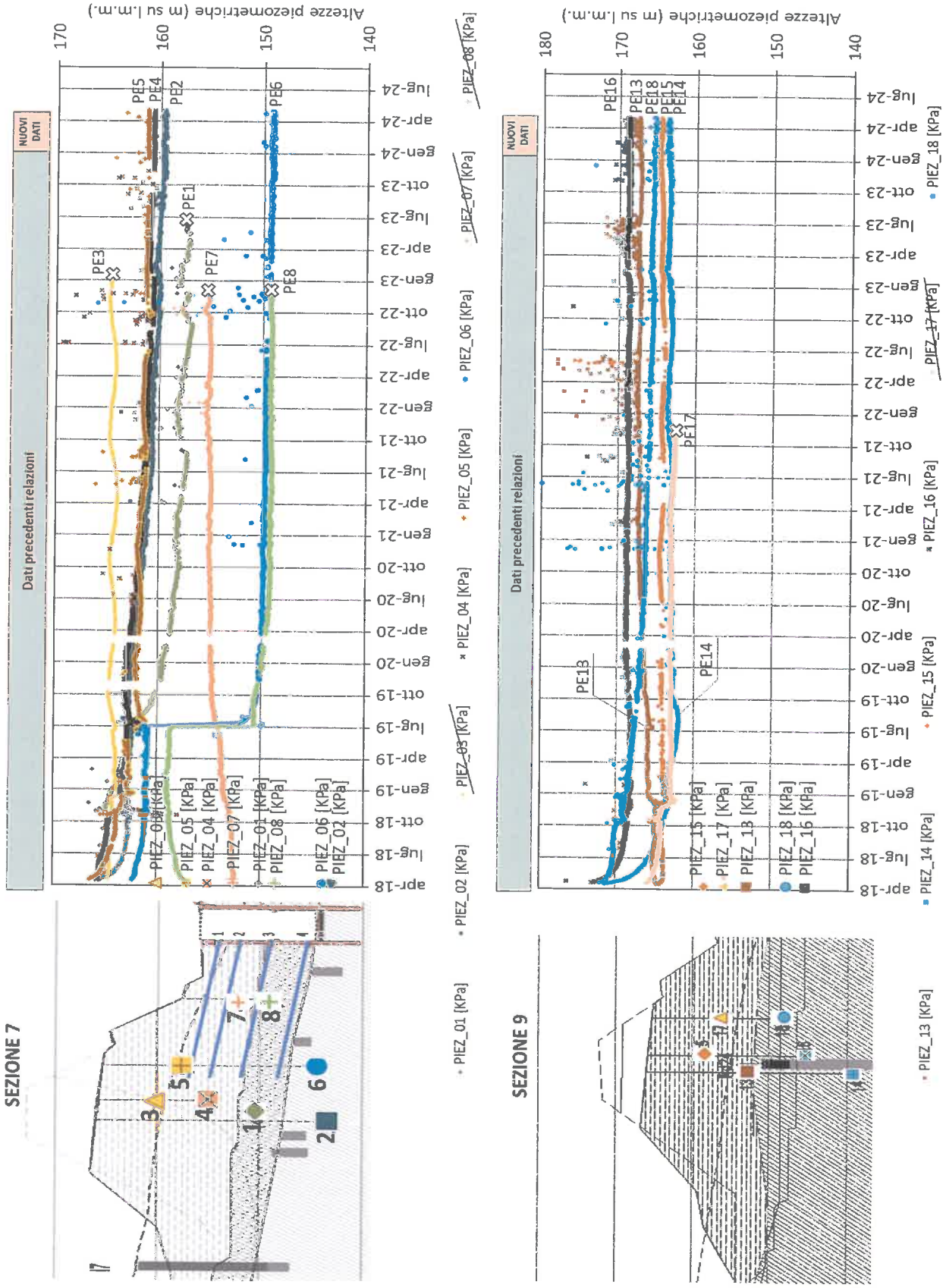
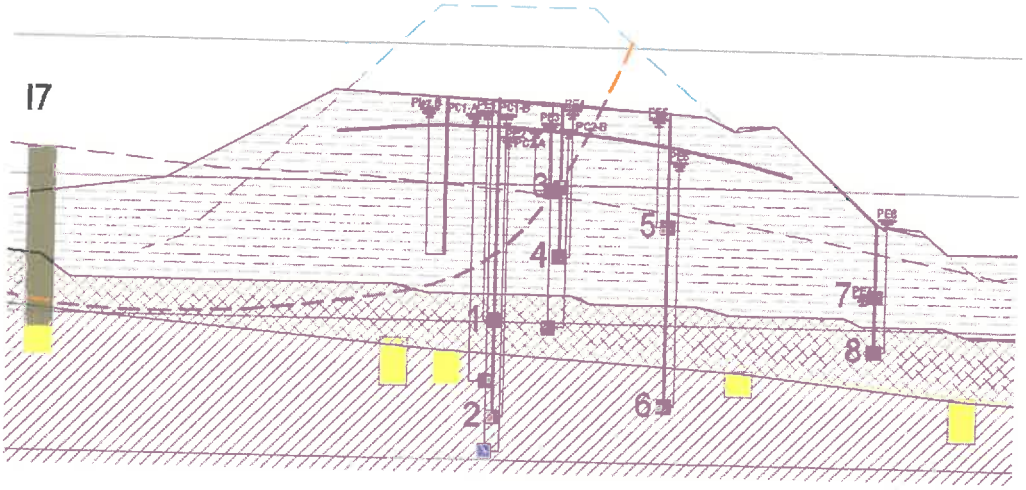


Figura 28 – Andamento nel tempo delle altezze piezometriche più significative nelle sez. 7 e 9 dell'argine

SEZIONE N.7 Riferimento dati 12-06-2018



SEZIONE N.7 Aggiornamento dati 31-08-2023

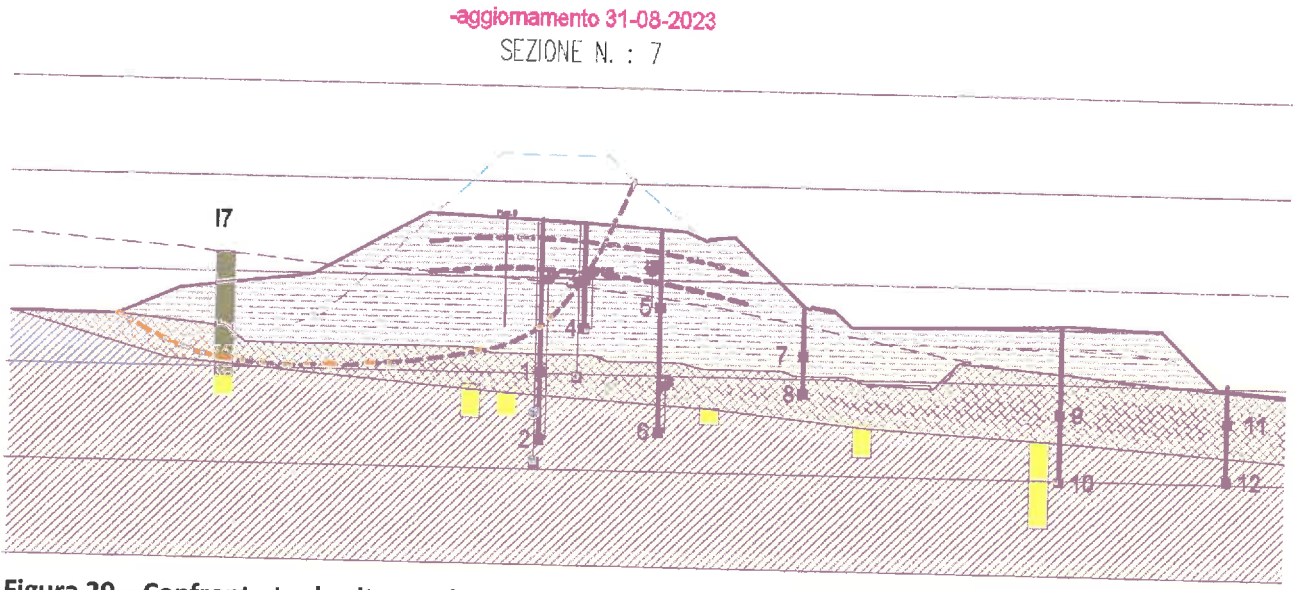
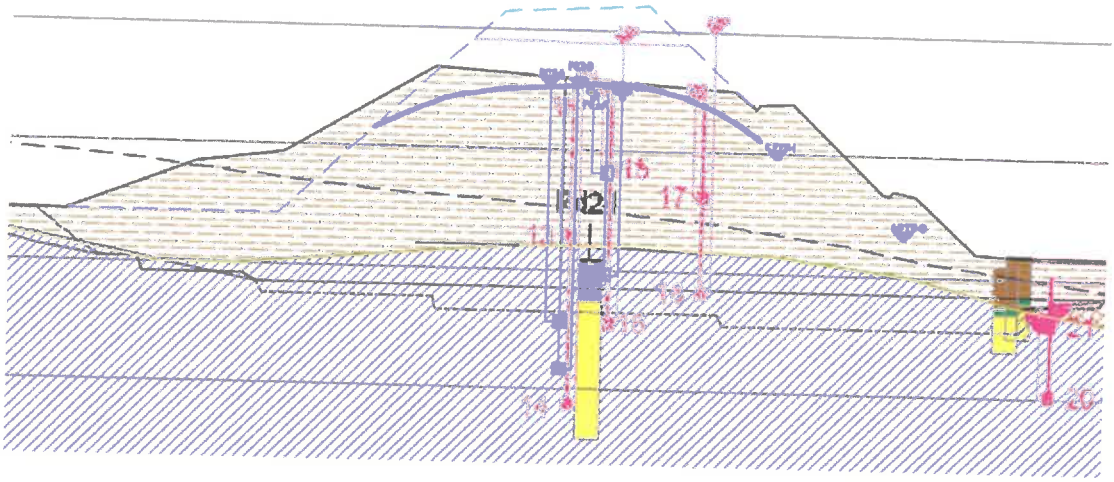


Figura 29 – Confronto tra le altezze piezometriche misurate nel 2018 e nel 2023 nella sezione arginale n.7

SEZIONE N.9 Aggiornamento dati 12-06-2018



SEZIONE N.9 Aggiornamento dati 31-08-2023

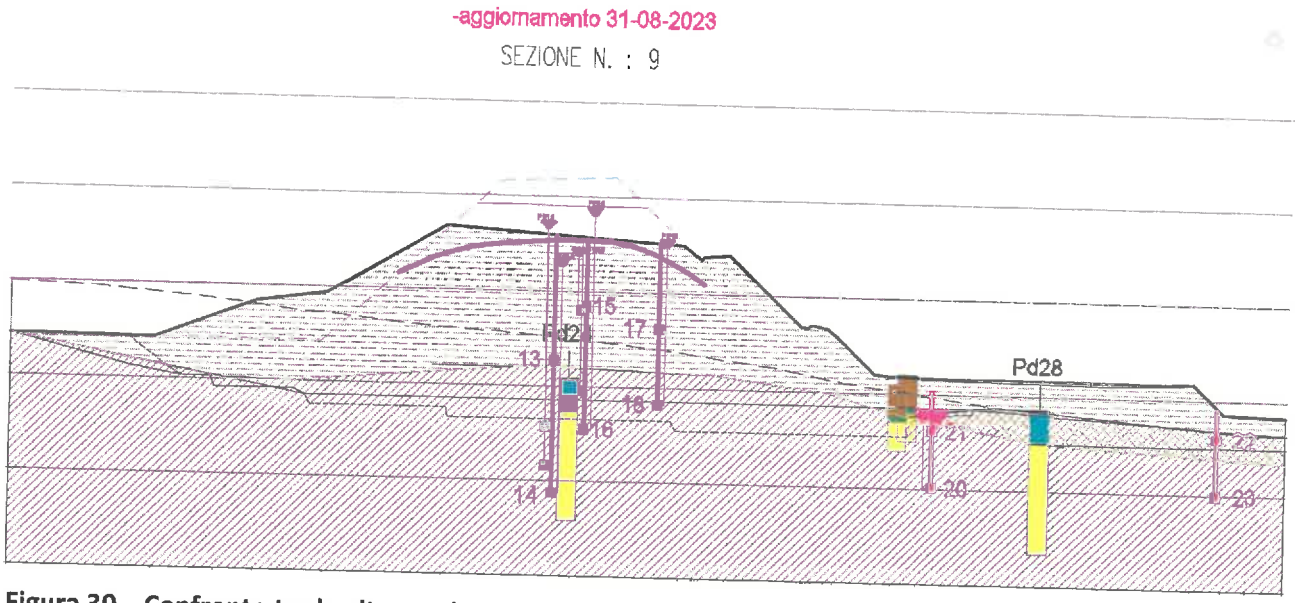
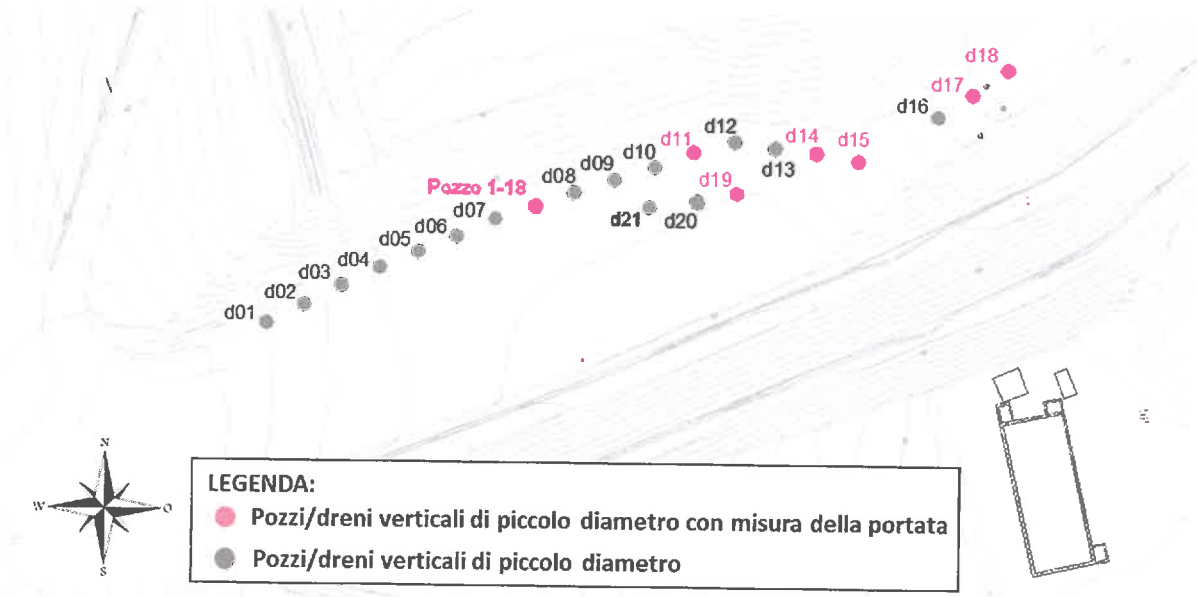


Figura 30 – Confronto tra le altezze piezometriche misurate nel 2018 e nel 2023 nella sezione arginale n.9

6.3 Monitoraggio delle portate emunte dai pozzi di piccolo diametro

Per risolvere il problema della permanenza di pressioni interstiziali elevate all'interno del corpo arginale, è stato progettato un intervento di drenaggio della scarpata nord dello stesso che non era stata raggiunta dai drenaggi sub-orizzontali. Tale drenaggio è stato realizzato per mezzo di alcuni pozzi di piccolo diametro rivestiti con tubi sfinestrati estesi dalla sommità dell'argine fino ad alcuni metri nella formazione argillosa di base. In Figura 31 è indicata la posizione e le caratteristiche geometriche dei pozzi realizzati.



Codice	Data perforazione	Quota testa tubo [m su l.m.m.]	Quota base tubo [m su l.m.m.]	Lunghezza pozzo [m]	Profondità formazione marnosa [m]	Quota formazione marnosa [m su l.m.m]
d1	27-03-2019	169,77	151,27	18,50	14,00	155,27
d2	27-03-2019	169,05	150,05	19,00	14,00	154,55
d3	28-03-2019	168,63	149,63	19,00	15,00	153,13
d4	28-03-2019	168	146,50	21,50	16,50	151,00
d5	28-03-2019	167,67	145,67	22,00	17,00	150,17
d6	29-03-2019	167,55	144,55	23,00	17,50	149,55
d7	29-03-2019	167,30	143,30	24,00	19,50	147,30
POZZO 1-18	22-11-2018	167,88	145,28	22,60	18,60	148,38
d8	01-04-2019	167,40	143,40	24,00	19,50	147,40
d9	01-04-2019	167,11	145,11	22,00	17,00	149,61
d10	03-04-2019	167,12	145,12	22,00	16,50	150,12
d11	03-04-2019	166,91	145,91	21,00	16,50	149,91
d12	03-04-2019	166,85	145,85	21,00	16,50	149,85
d13	02-04-2019	166,66	144,66	22,00	17,50	148,66
d14	02-04-2019	167,26	145,26	22,00	17,50	149,26
d15	02-04-2019	167,36	145,36	22,00	17,50	149,36
d16	Non realizzato					
d17	25-03-2018	172,09	143,09	29,00	24,00	147,59
d18	26-03-2019	172,37	143,37	29,00	24,00	147,87
d19	04-04-2019	165,78	144,28	21,50	16,50	148,78
d20	04-04-2019	166,26	144,76	21,50	16,50	149,26
d21	04-04-2019	166,64	145,14	21,50	16,20	149,94

Figura 31 – Planimetria dell'argine con indicazione della posizione dei pozzi verticali di piccolo diametro e geometria dei pozzi di piccolo diametro

Si può notare che il POZZO 1-18, di medio diametro, è stato realizzato alcuni mesi prima dei pozzi di piccolo diametro (d1÷d21), per verificare l'efficacia di tale sistema di drenaggio. Dal novembre 2018 al febbraio 2019 si monitorava la quota raccolta nel pozzo e si procedeva al suo svuotamento con pompa rimuovibile quando l'accumulo raggiungeva 1,5-2,0 m. Dal febbraio 2019 nel pozzo è stata installata una pompa sommersa ad avviamento automatico con misura del volume d'acqua emunto. In Figura 32 sono mostrati gli andamenti del livello nel pozzo nel primo periodo di funzionamento e poi la portata emunta con la pompa ad innesco automatico (dati aggiornati a **giugno 2024**). Come si può osservare la capacità di emungimento del pozzo è risultata buona, tanto da giustificare l'installazione di un sistema automatico. Nei **5 anni e mezzo** di funzionamento del sistema di emungimento si può osservare una portata emunta media di circa **19 litri/giorno**, significativa per un pozzo collocato in un terreno completamente argilloso. Si osserva che negli ultimi 6 mesi le portate emunte sono tornate in media (**15 litri/giorno gen-giu 2024**) dopo un 2023 che aveva visto delle portate in notevole riduzione (**6 litri/giorno gen-dic 2023**).

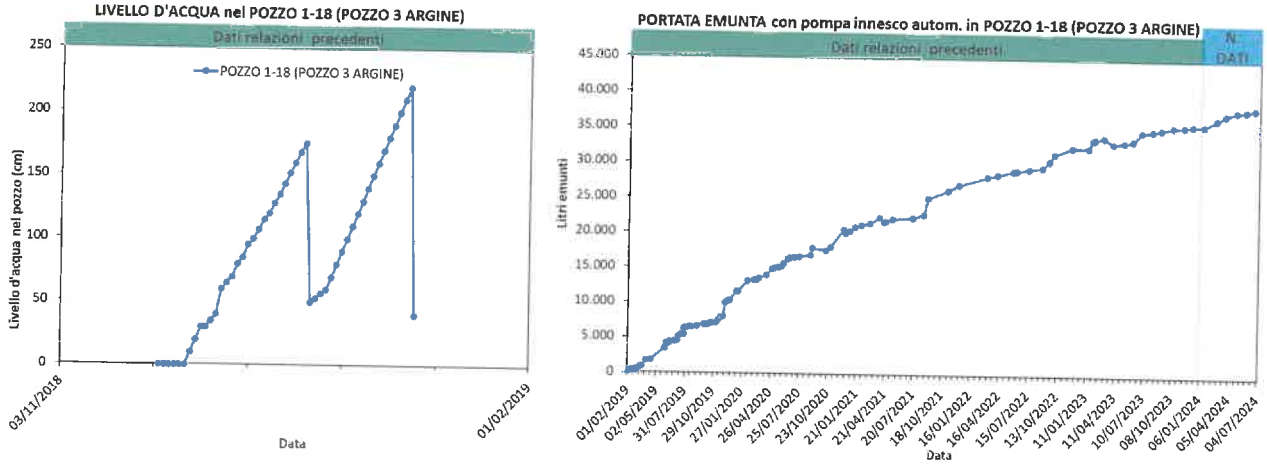


Figura 32 – Portata emunta dal POZZO 1-18 (fino a GIUGNO 2024)

I significativi risultati del POZZO 1-18 hanno permesso di procedere con l'installazione del sistema drenante più ampio costituito dai pozzi d1÷d21. Anche in questo caso nel primo periodo di funzionamento del sistema si eseguivano misure giornaliere del livello idrico nei pozzi per poi procedere al loro svuotamento tramite pompe ad immersione di piccola dimensione calate sul fondo. Questa fase iniziale ha permesso di osservare che i diversi pozzi presentavano capacità di captazione delle acque sotterranee molto diverse. Questo fenomeno è evidenziato graficamente in Figura 33 dove la dimensione dei cerchi è proporzionale alla velocità di riempimento giornaliero osservata sui diversi pozzi. Si osserva che la gran parte dell'acqua viene intercettata dai pozzi posti sulla porzione est dell'argine, che corrisponde alla zona di massimo scavo dell'imbasamento dell'opera in quanto corrispondente all'asta del fosso originario intercettato dal rilevato.

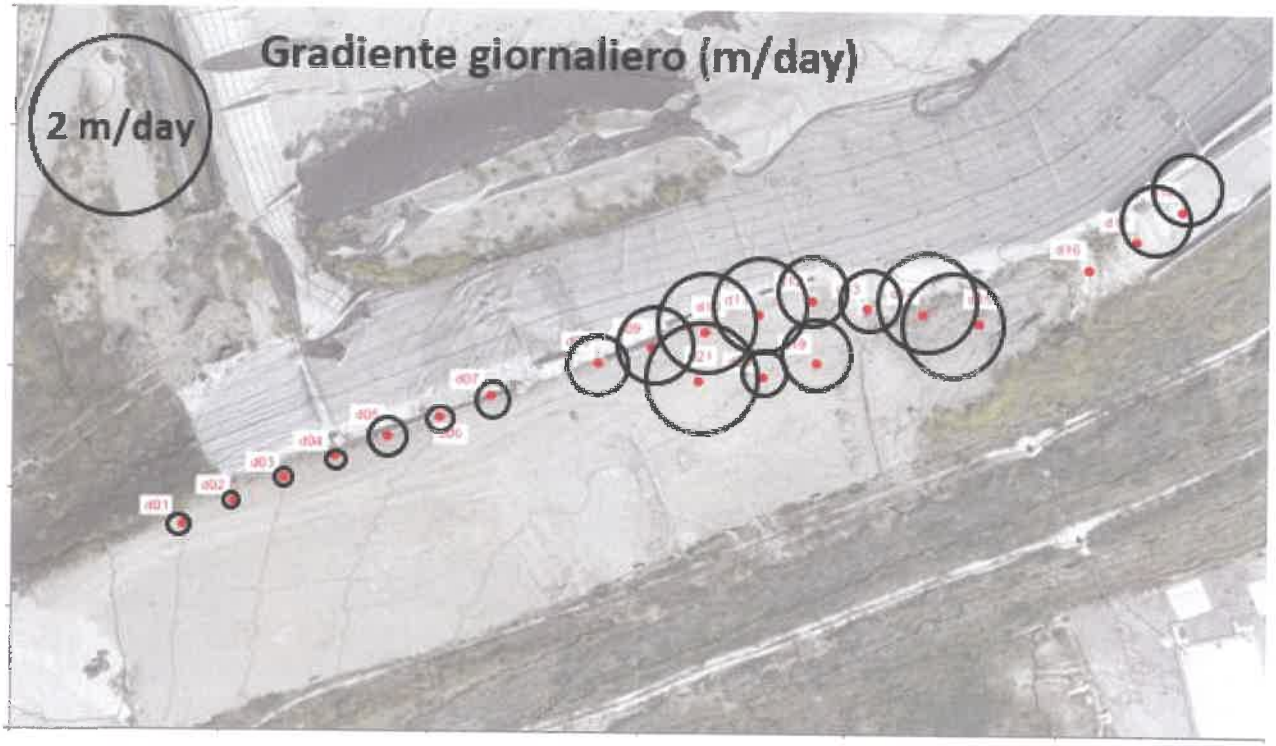


Figura 33 – Planimetria con indicazione della velocità di riempimento dei pozzi prima della loro automazione nell'ottobre 2019

Dall'analisi di questo comportamento si è deciso di dotare i 6 pozzi di maggiore afflusso (d11, d14, d15, d17, d18, d19) di pompe ad immersione ad innesco automatico e di monitorare i valori della portata emunta.

In Figura 34 è mostrato l'andamento nel tempo delle portate emunte dai diversi pozzi dotati di pompaggio automatizzato. Dai dati risulta che nel periodo **ottobre 2019 – giugno 2024** sono stati complessivamente estratti circa 205 m^3 d'acqua (pari a circa **120 l/giorno**). Con un periodo di osservazione di 5 anni e mezzo si osserva una variabilità stagionale della portata di emungimento più pronunciata per alcuni pozzi e meno per altri. Significativo l'evento dell'autunno 2021 che ha visto un forte aumento della portata del pozzo d15 collocato nell'area est dell'argine in concomitanza dello stillicidio di dreni sub-orizzontali e dell'impantanamento d'acqua in superficie. È quindi probabile che questo pozzo possa aver risentito di un apporto diretto per infiltrazione d'acqua dalla superficie. Nell'ultimo periodo sono stati ripristinati i misuratori di portata dei pozzi d11, d18 e d19 che avevano fornito letture non attendibili alla fine del 2022. **Nell'ultimo periodo si osserva la notevole portata d'acqua emunta dal pozzo d19 che invece negli ultimi 3 anni non aveva mai mostrato portate significative.**

In Figura 35 le portate complessive emunte da ogni pozzo nel periodo **ottobre 2019 – aprile 2024** sono rappresentate su una planimetria dell'argine, mentre in Figura 36 e Figura 37 le portate emunte sono distinte per quadrimestri successivi. Il comportamento degli ultimi 3 anni ha evidenziato una stagionalità delle portate che non era stato rilevato inizialmente. Tale aspetto è evidenziato nella tabella di Figura 38 che riporta le portate medie giornaliere per quadrimestre, su un intervallo temporale di oltre 4 anni. Si osserva

che il 2021, 2022 ed il 2023 hanno evidenziato un drastico calo estivo dei volumi emunti. Inoltre il 4° quadrimetre 2023 aveva indicato una portata complessiva particolarmente bassa rispetto agli anni precedenti. L'ultimo quadrimetre, gen-apr 2024 ha invece mostrato un aumento delle portate in linea – anche se in diminuzione – con gli anni precedenti..

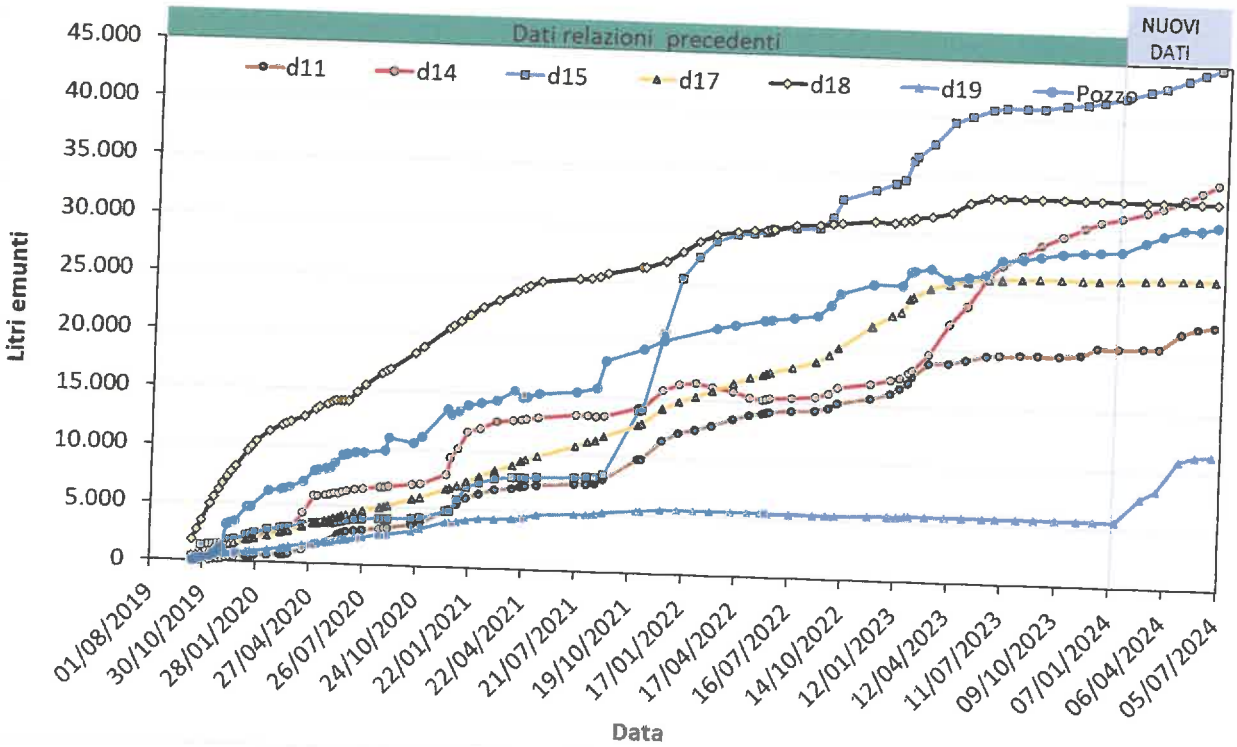


Figura 34 – Portate emunte dai pozzi dotati di pompe ad innesco automatico

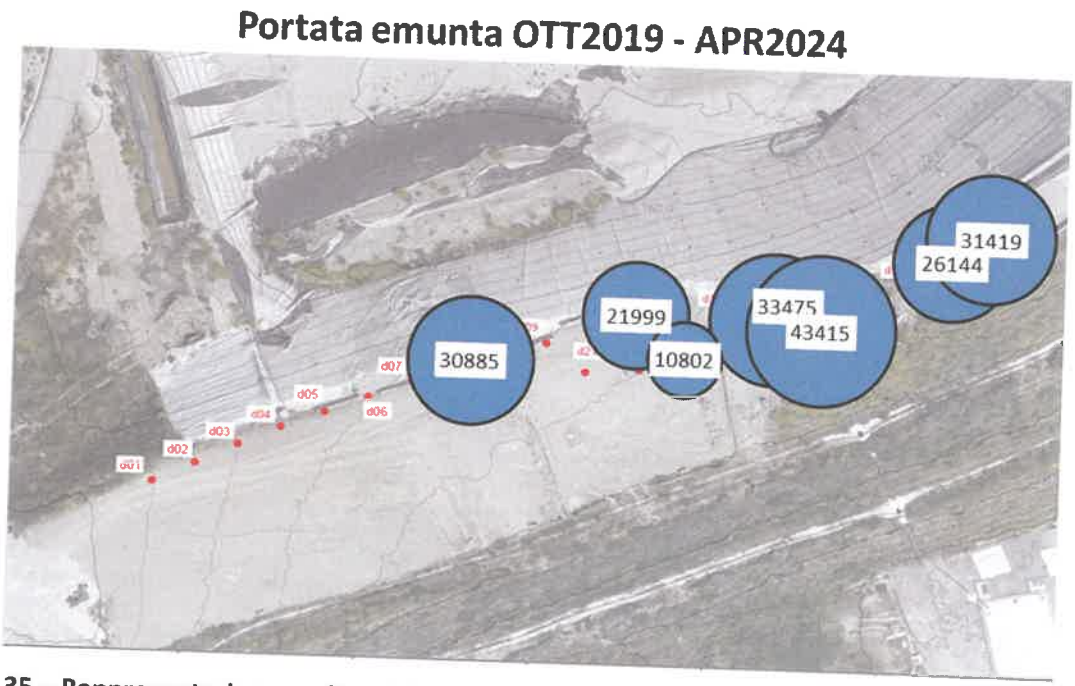


Figura 35 – Rappresentazione grafica delle portate emunte nel periodo OTTOBRE 2019–APRILE 2024

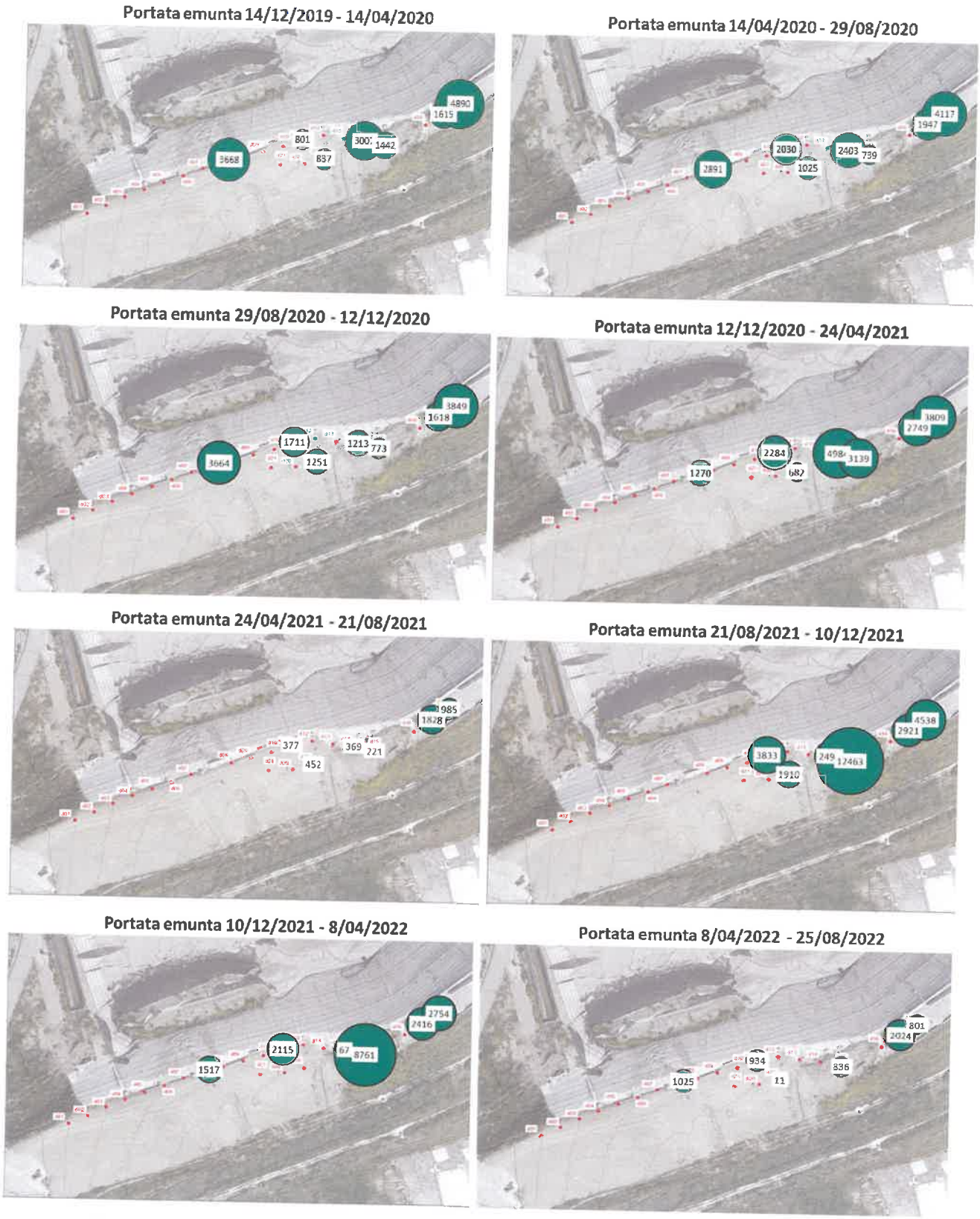
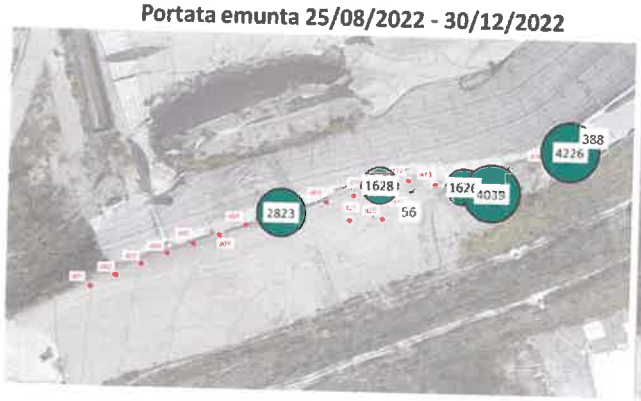
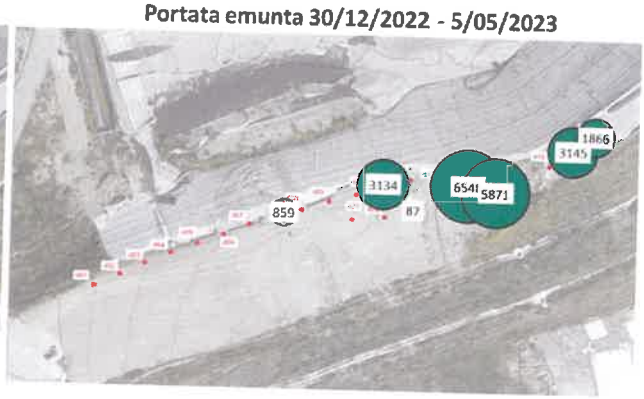


Figura 36 – Rappresentazione grafica delle portate emunte per quadrimestri successivi

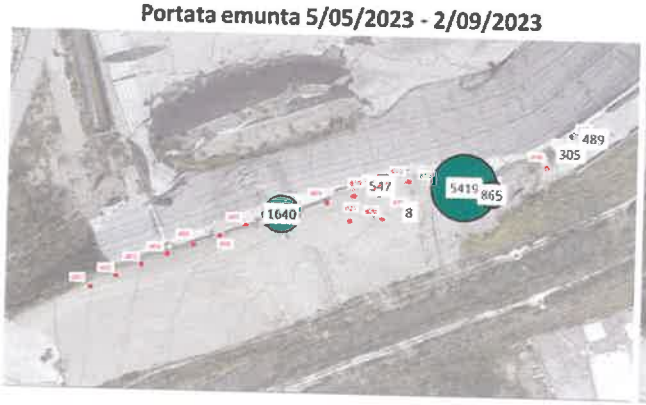
Portata emunta 25/08/2022 - 30/12/2022



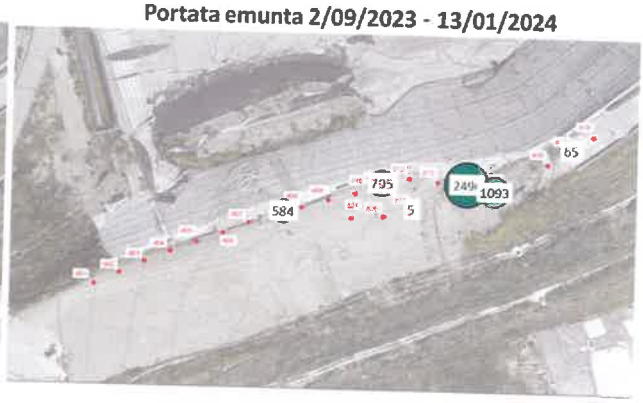
Portata emunta 30/12/2022 - 5/05/2023



Portata emunta 5/05/2023 - 2/09/2023



Portata emunta 2/09/2023 - 13/01/2024



Portata emunta 13/01/2024 - 26/04/2024

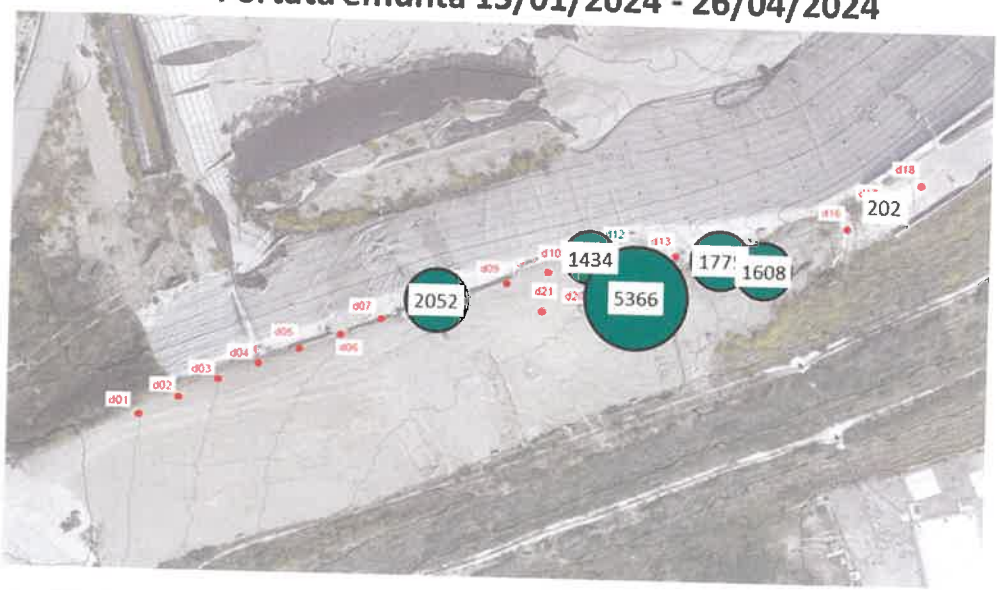


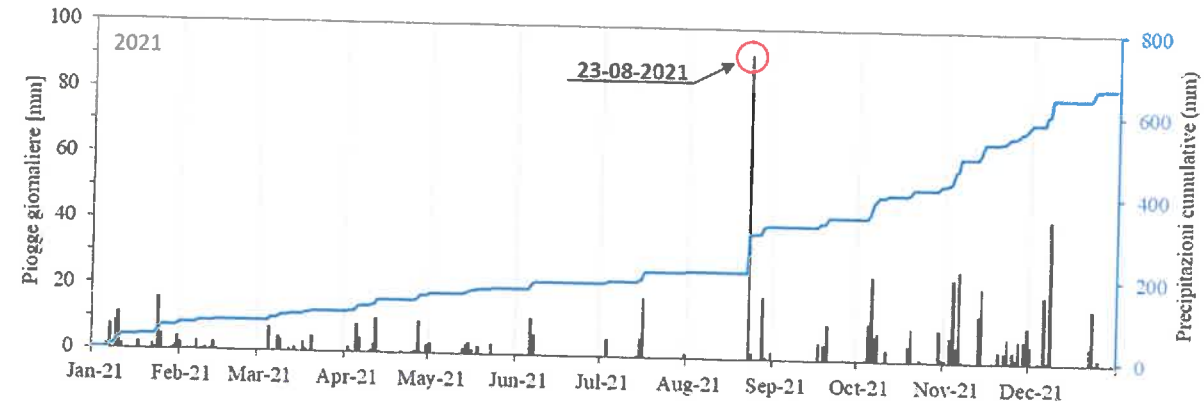
Figura 37 – Rappresentazione grafica delle portate emunte per quadrimestri successivi

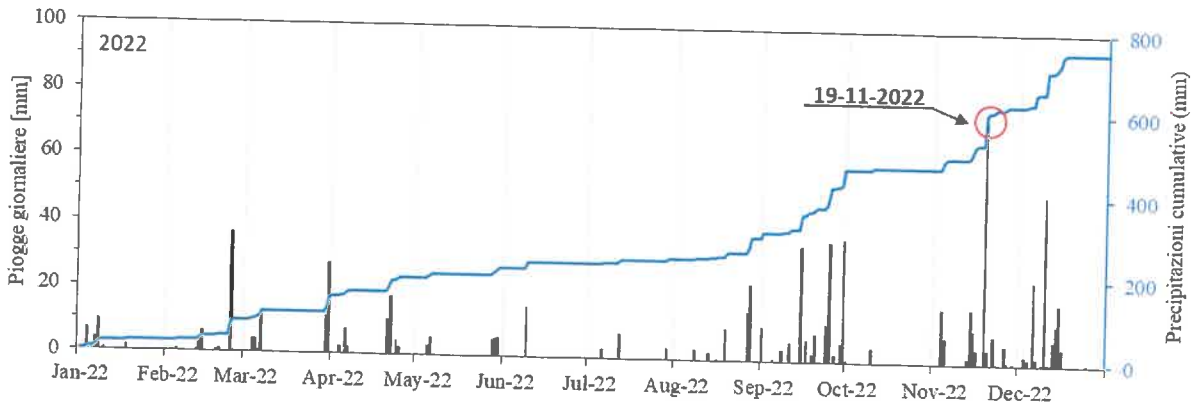
PORTATA EMUNTA DAI POZZI (l/giorno)			
ANNO	Quadrimestre		
	I	II	III
	(GEN-APR)	(APR-AGO)	(AGO-DIC)
2020	133	111	134
2021	142	44	253
2022	148	39	116
2023	171	80	38
2024	**120**		

Figura 38 – Portate emunte dal sistema di drenaggio, per quadrimestri successivi

In relazione al significativo periodo di monitoraggio oggi disponibile si evince che gli elevati quantitativi d'acqua emunti siano riconducibili ad una pur modesta circolazione sotterranea che conduce le acque infiltranti dalla superficie dei versanti collinari alla base dell'argine (visto che tale area è il punto più depresso della formazione argillosa nella zona) nonché, almeno in alcuni episodi del passato, precedenti all'impermeabilizzazione della sommità arginale, ad un'infiltrazione diretta dalla sommità arginale.

Per verificare tale ipotesi si sono considerate le piogge giornaliere e cumulative negli anni 2021, 2022, 2023 e 2024 (fino ad aprile) registrate nella stazione meteo presso l'impianto stesso (vedi Figura 39). Dai dati, si osservano fenomeni di particolare intensità giornaliera il 23 agosto 2021 (circa 92 mm di pioggia), il 18 novembre 2022 (74 mm), il 22 gennaio 2023 (64 mm), il 16 maggio 2023 (57 mm) e il 22/23 novembre 2023 (85 mm).





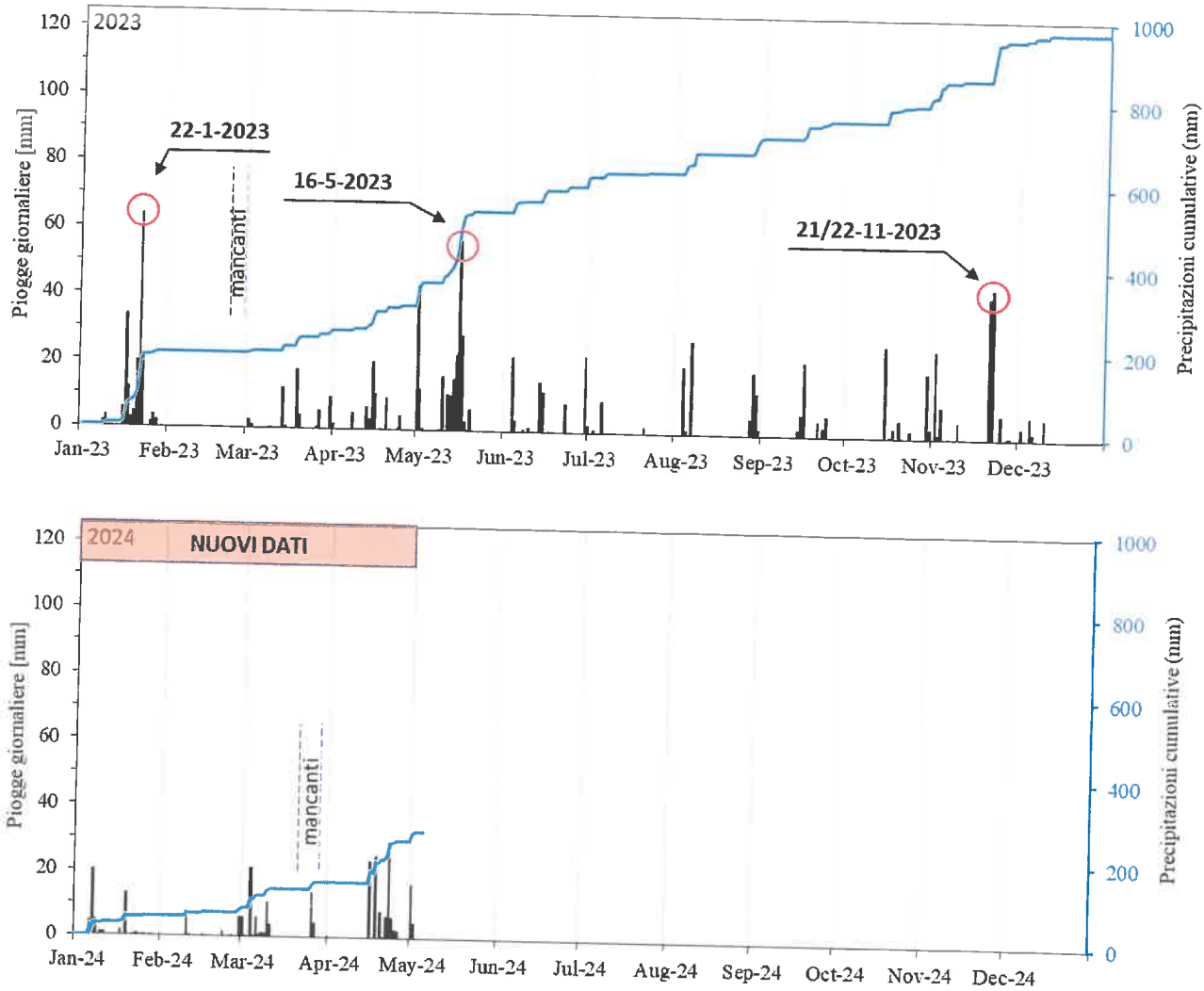


Figura 39 – Precipitazioni giornaliere e cumulative presso l'impianto di Corinaldo dal 01-2021 al 4-2024

Come mostrato in Figura 40, in corrispondenza del picco pluviometrico dell'agosto 2021 si osserva un immediato aumento della portata emunta dal pozzo di grande diametro sull'argine ed un successivo forte aumento della portata sui pozzi d14 e d15 che si protrae per tutto il periodo autunnale ed invernale 2021-2022. Un nuovo aumento delle portate si verifica con l'inizio delle piogge nel settembre 2022, mentre non si ha nessuna risposta apprezzabile all'evento piovoso del novembre 2022. Una risposta si osserva di nuovo all'evento del gennaio 2023, mentre non sembrano significativi gli effetti della pioggia del maggio e del novembre 2023. Dal gennaio 2024 si osserva un generale aumento delle portate nonché il netto cambio di trend del pozzo d19 senza che risultino chiare correlazioni con le piogge.

Quindi, sembra rafforzarsi l'ipotesi che prima dell'impermeabilizzazione della sommità dell'argine ci fosse un'infiltrazione diretta delle piogge dall'alto, avvenuta almeno in alcune occasioni. La circolazione

sotterranea rimane tuttavia complessa e mutevole e non si è ancora pervenuti ad un'interpretazione univoca dei fenomeni.

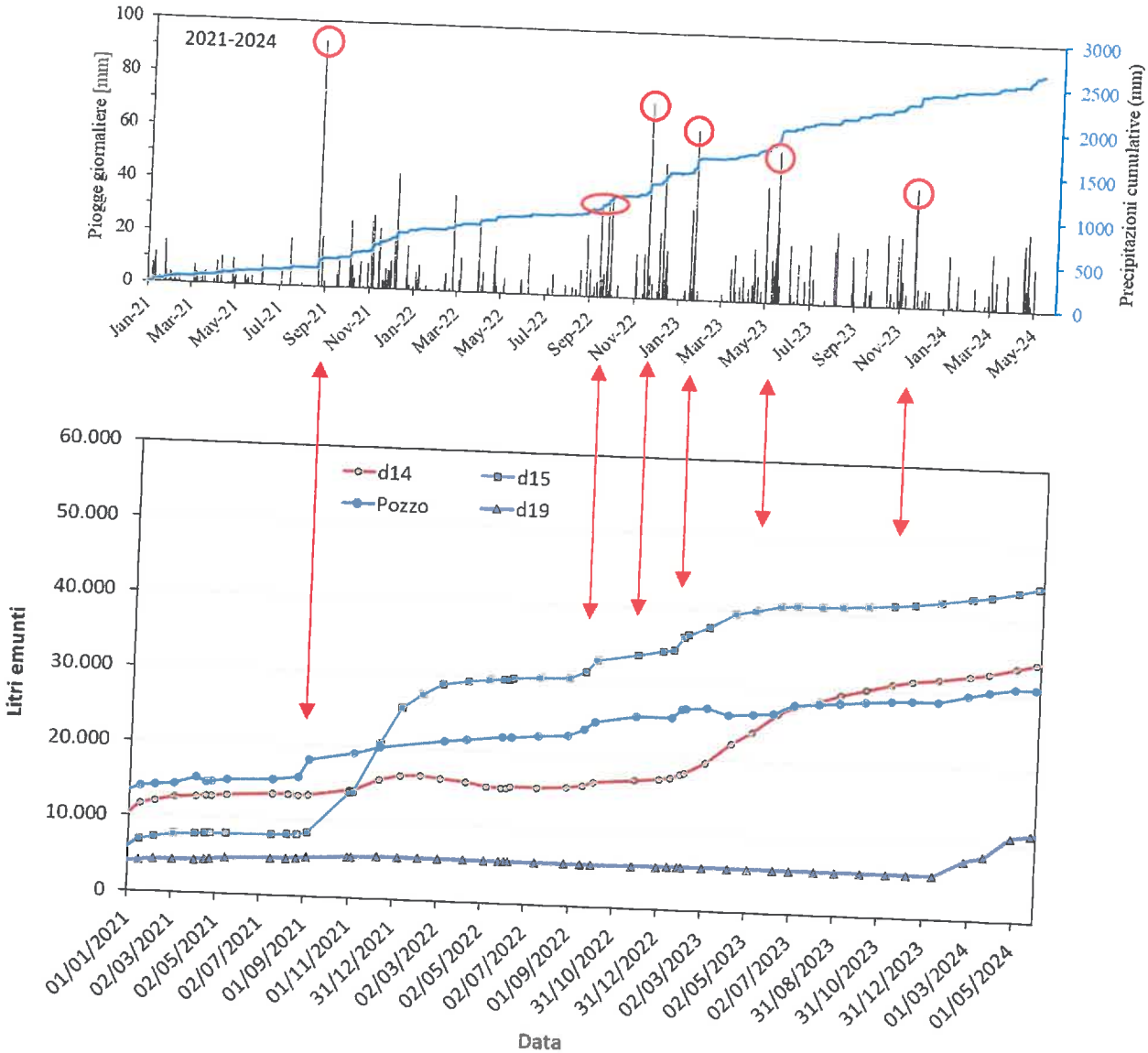


Figura 40 – Precipitazioni giornaliere e cumulative dal 01-2021 al 4-2024 e corrispondenti andamenti della portata emunta dai pozzi più significativi

6.4 Monitoraggio delle deformazioni locali di 2 pali dei setti a pettine

Due pali lato argine dei setti n.5 e n.7 sono stati strumentati con 12 estensimetri ciascuno saldati alle barre di armatura. Come mostrato in Figura 41 gli estensimetri sono disposti in numero di 3 per ogni livello (disposizione a stella) e collocati a 4 profondità diverse (2 m, 6 m, 10 m e 14 m da testa palo). L'installazione dei sensori è avvenuta nel novembre 2018, contestualmente alla realizzazione dei pali, ma le letture sono iniziate solo nel febbraio 2019 quando è stato possibile connettere i sensori alla centralina di acquisizione. Dei 24 sensori installati, 4 sono andati persi durante le operazioni di getto ed 1 non fornisce più letture valide dal maggio 2022, mentre gli altri 19 sono tuttora correttamente funzionanti.

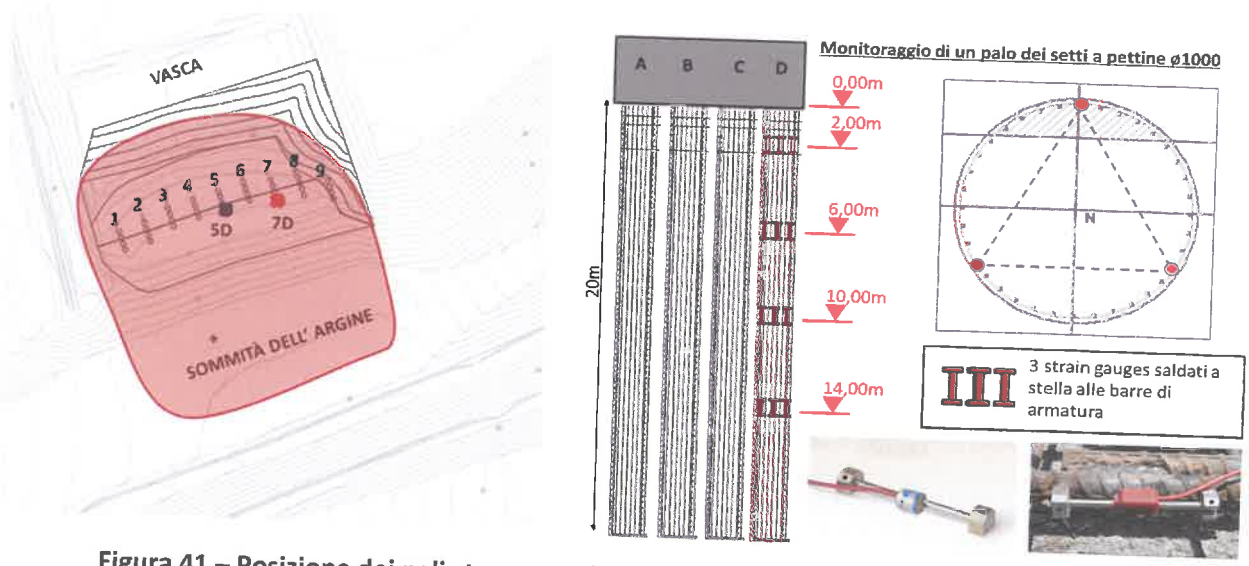


Figura 41 – Posizione dei pali strumentati con strain-gages e disposizione degli strumenti

Gli strain-gages forniscono una misura della deformazione subita dalla barra di armatura a cui sono collegati. Si noti che ad una deformazione di allungamento corrisponde un valore positivo della lettura del sensore, viceversa ad un accorciamento corrisponde un valore negativo.

Nel caso in esame, mancando la lettura di zero al momento dell'installazione, la deformazione misurata dai sensori va interpretata in senso differenziale rispetto alla prima misura disponibile che è avvenuta nel febbraio 2019, in occasione dell'attivazione dell'acquisizione automatizzata. Ne consegue che non è possibile ricostruire l'intera storia deformativa dei pali, mentre è possibile valutare gli incrementi di deformazione successivi al febbraio 2019.

In Figura 42 e Figura 43 è riportato l'andamento nel tempo della deformazione agli estensimetri misurata sui pali lato argine (posizione D) dei setti n. 5 e n.7. Per interpretare le letture è utile tenere presente che la disposizione dei sensori nel palo, come riportato nelle figure, vede i sensori 1 collocati lato discarica (nord) mentre i sensori 2 e 3 lato argine, con i sensori 2 lato est ed i sensori 3 lato ovest. Inoltre, si tenga presente

che il valore medio misurato dai sensori corrisponde allo sforzo assiale, mentre la distanza tra i valori registrati ai diversi sensori identifica il momento flettente agente sulla sezione del palo.

Dall'andamento delle letture ai sensori sui pali dei setti n.5 e n.7 si può osservare una risposta simile delle due strutture; qualche differenza è emersa solo durante la fase di riempimento della discarica a ridosso dell'argine, probabilmente a causa della asimmetria del carico rispetto alla posizione dei pali (cioè il riempimento è stato eseguito da est verso ovest, quindi prima sul PALO 7 e poi sul PALO 5). In particolare:

- da febbraio a maggio 2019:
  - si osserva una entrata in carico del palo per azione prevalentemente flettente diretta verso nord (coerente al dissesto), con sensori che indicano trazione e sensori che indicano compressione;
- da maggio a luglio 2019:
  - si osserva una stabilizzazione delle letture;
- da luglio a settembre 2019:
  - si osserva una forte inversione delle letture per tutti i sensori che manifestano accorciamenti;
  - si noti che i sensori 1 vicino alla testa palo (in rosso nelle figure), che nel primo periodo indicavano trazione, diventano adesso compressi, ad indicare un'inversione dell'inflessione del palo (cioè si osserva la conseguenza di uno spostamento verso sud – verso l'argine).
- da settembre 2019 a giugno 2020:
  - il trend avviato nel periodo precedente prosegue con minore velocità ad indicare un aumento del carico dei rifiuti che viene avvertita dai pali come un aumento del carico assiale e un aumento della spinta verso l'argine (verso sud);
- da giugno 2020 a agosto 2020:
  - si osserva un cambio di pendenza dei trend deformativi registrati dai sensori con un incremento della compressione sulla fibra 3 ed un aumento di trazione sulla fibra 2, più pronunciato sul setto 7 e meno evidente sul setto 5; queste misure indicano un incremento di spinta sulla struttura da est verso ovest e corrisponde al recente riempimento del settore più a est della discarica, a ridosso dell'argine;
- da agosto 2020 a dicembre 2020:
  - si mantengono i trend deformativi osservati nel periodo precedente; unica nota di rilievo il blando aumento del momento flettente a 6 m di profondità e una leggera riduzione dello sforzo di compressione nei sensori a 10 e 14 m di profondità che si registra sia nel palo 5 che nel palo 7;
- da dicembre 2020 ad aprile 2021:

- si mantengono e vanno stabilizzandosi i trend deformativi osservati in precedenza (d'altra parte in questo periodo non sono avvenute lavorazioni particolari a ridosso dell'arginatura);

- da aprile 2021 a dicembre 2021:
  - fino ad agosto 2021 le letture sono stabili;
  - da agosto 2021 si osserva una nuova evidente risposta all'aumento dei carichi in discarica, con divaricazione delle letture sulle fibre tesa e compressa ad indicare un aumento del momento flettente agente sui pali. Quindi si osserva una risposta delle strutture ad uno spostamento verso sud, coerente con l'aumento della quota della discarica in prossimità dell'argine;
- da dicembre 2021 ad aprile 2022:
  - prosegue il trend iniziato nell'agosto 2021 che vede un incremento del momento flettente sui pali (divaricazione dei valori misurati tra fibra tesa e fibra compressa), con uno spostamento complessivo che quindi volge verso sud; si noti che i valori misurati sul palo del setto 7 sono più elevati di quelli misurati sul palo del setto 5, coerentemente all'accumulo dei rifiuti che procede da est verso ovest;
- da aprile 2022 ad agosto 2022:
  - rallenta il trend iniziato nell'agosto 2021 che vede un incremento del momento flettente sui pali (divaricazione dei valori misurati tra fibra tesa e fibra compressa), che tende ora a stabilizzarsi. Si continua a notare uno stato di sollecitazione sul palo del setto 7 superiore a quello del palo sul setto 5.

    Si rileva inoltre la perdita di funzionalità di un sensore nel palo del setto 5;
- da agosto 2022 a dicembre 2022:
  - l'aumento del momento flettente sui pali, evidenziato dalla divaricazione dei valori tra fibra tesa e fibra compressa, si è quasi stabilizzato (permane ancora un blando trend incrementale nei sensori posti a 6 m di profondità).

    La differenza nello stato di sollecitazione tra il palo del setto 7 e quella del palo sul setto 5 rimane evidente;
- da dicembre 2022 a aprile 2023:
  - il setto 5 mostra valori piuttosto stabili rispetto alla lettura precedente, con un modesto aumento registrato solo dai sensori a 6 m di profondità;
  - il setto 7 mostra un trend leggermente incrementale a 2 e 6 m, dimostrato dalla ulteriore divaricazione dei valori tra fibra tesa e fibra compressa.

    La differenza nello stato di sollecitazione tra il palo del setto 7 e quella del palo sul setto 5 rimane significativa, con il setto 7 più caricato dell'altro;

- da maggio 2023 ad agosto 2023:
  - il setto 5 mostra valori piuttosto stabili rispetto alla lettura precedente, con un ulteriore modesto aumento registrato solo dai sensori a 6 m di profondità;
  - il setto 7 mostra ancora un trend in leggero incremento sia a 2 e che a 6 m, dimostrato dalla ulteriore divaricazione dei valori tra fibra tesa e fibra compressa.

    Si conferma la differenza nello stato di sollecitazione tra il palo del setto 7 e quella del palo sul setto 5, con il setto 7 più caricato dell'altro;
- da agosto 2023 a dicembre 2023:
  - il setto 5 conferma il trend precedente, con un ulteriore modesto aumento registrato dai sensori a 2 m e un aumento più marcato nei sensori a 6 m di profondità;
  - il setto 7 conferma il trend precedente con un leggero incremento a 2, 6 e 10 m.

    Si conferma la differenza nello stato di sollecitazione tra il palo del setto 7 e quella del palo sul setto 5, con il setto 7 più caricato dell'altro;
- da dicembre 2023 ad aprile 2024 (**NUOVI DATI**):

  In generale si conferma la situazione precedente, con il setto 7 più caricato del setto 5. Si registra un modesto incremento delle sollecitazioni su entrambi i setti per i sensori a 2 m e 6 m di profondità, da correlare all'avvicinamento all'argine della coltivazione della discarica.

In sintesi, i valori registrati dagli strain-gages sui pali hanno rispecchiato con accuratezza il succedersi degli eventi: in una prima fase i pali hanno risentito del dissesto dell'argine, subendo una spinta verso Nord; poi il riempimento della discarica nel settore corrispondente all'unghia del dissesto ha determinato un'inversione della spinta, ora agente verso Sud; quindi il riempimento ulteriore del settore est a ridosso dell'argine ha aggiunto una componente di spinta diretta da est verso ovest alle azioni precedentemente agenti sui pali; nel periodo più recente, la situazione relativamente stazionaria è coerente con l'allontanamento dall'argine delle operazioni di coltivazione della discarica. I modesti effetti che si continuano a registrare posso essere ricondotti al transito dei mezzi pesanti a ridosso dell'arginatura per raggiungere le sezioni più interne dell'impianto.

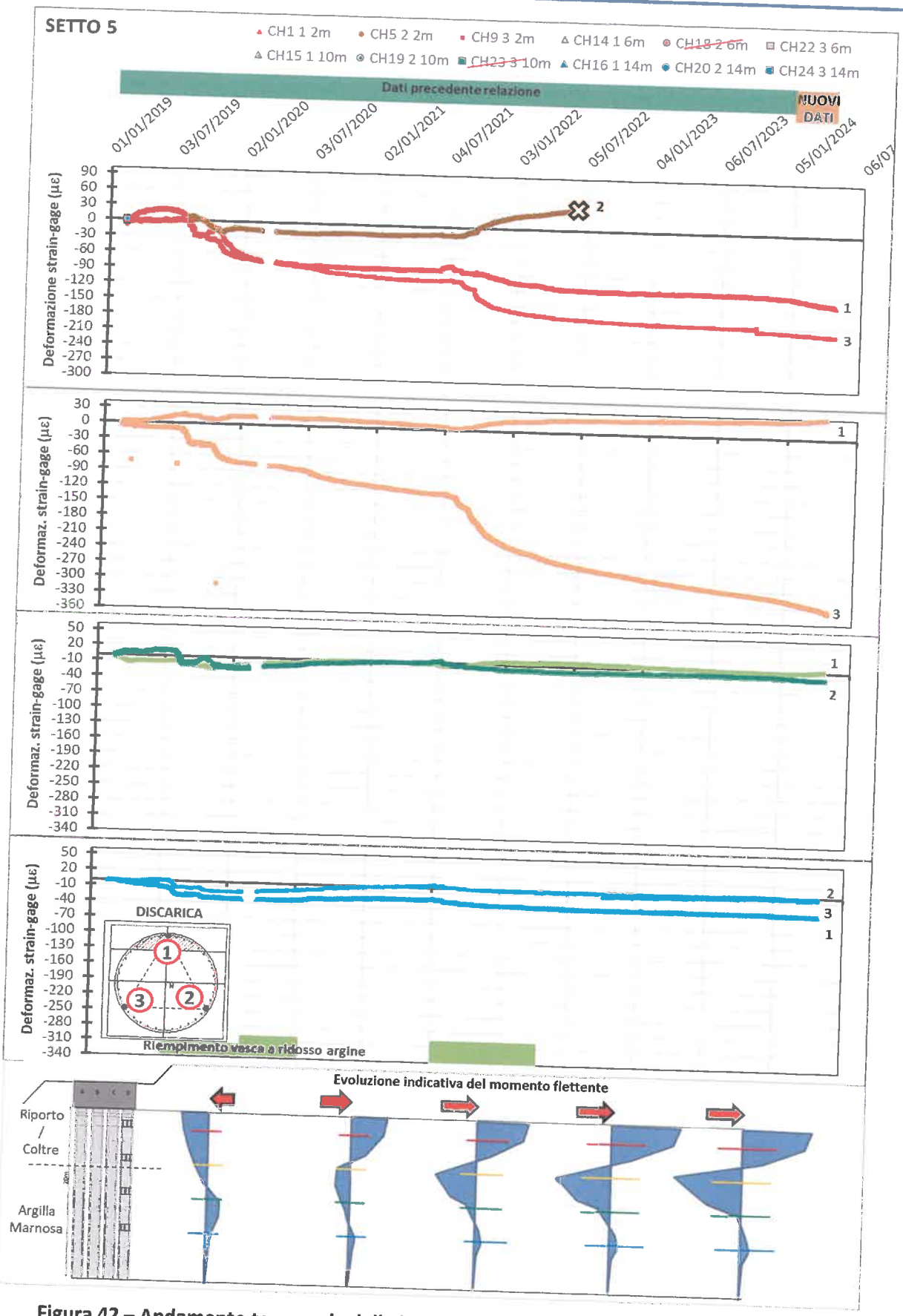


Figura 42 – Andamento temporale della lettura agli strain-gages del palo D su setto n.5

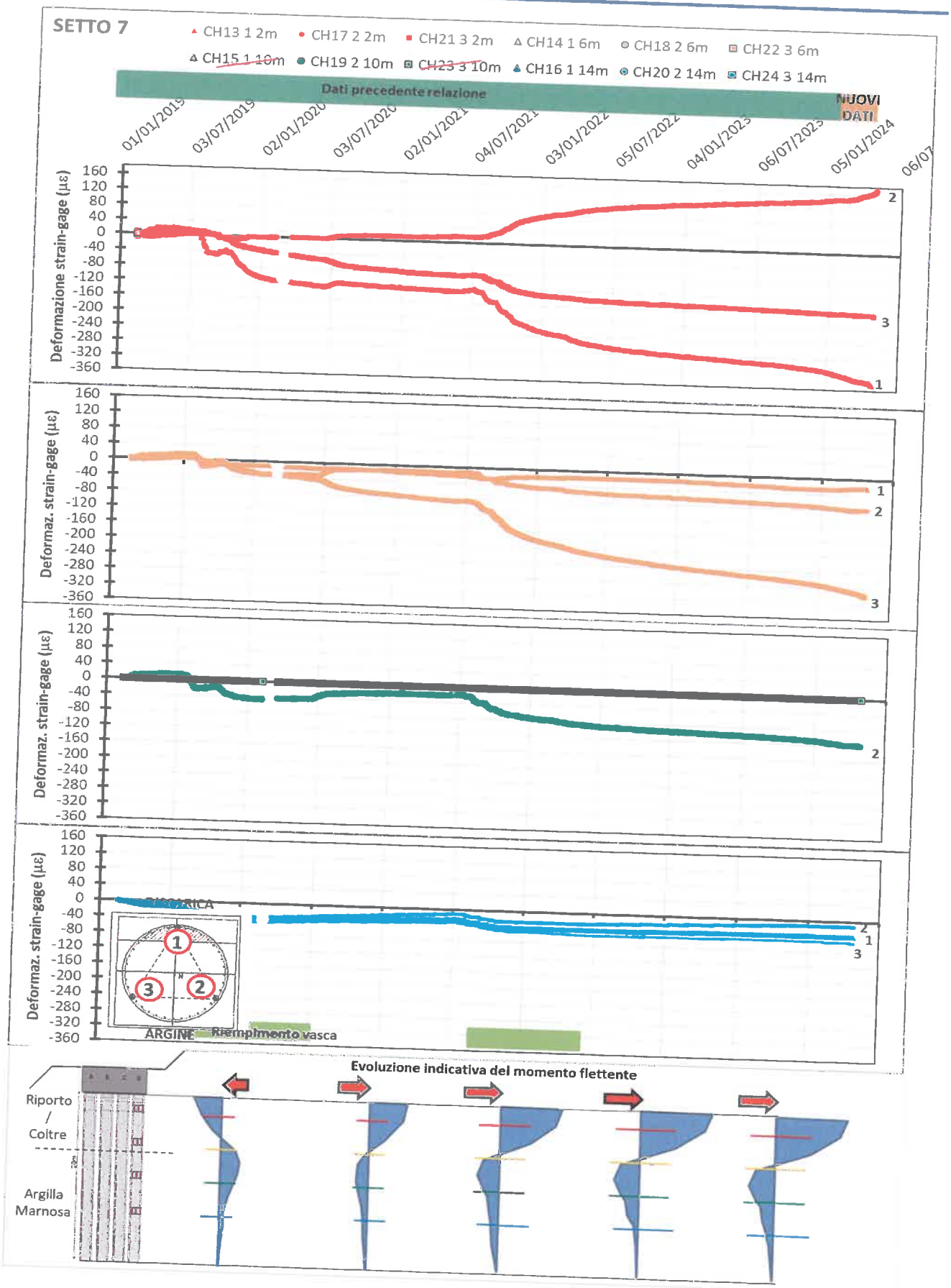


Figura 43 – Andamento temporale della lettura agli strain-gages del palo D su setto n.7

Si continua a monitorare l'andamento della temperatura tramite alcuni sensori posti all'interno delle strutture in c.a. Dato infatti che per compensare termicamente la lettura agli strain-gages sono presenti dei sensori di temperatura e avendo alcuni canali della centralina disponibili, sono stati acquisiti anche i dati di temperatura alle 4 profondità a cui sono posti i sensori. In Figura 44 e Figura 45 le letture di temperatura sono mostrate per l'intero periodo di monitoraggio. Si osserva chiaramente che la temperatura iniziale si collocava per tutti i sensori a 16-18°C. Con l'inizio del riempimento della discarica a ridosso dell'argine, i sensori a 2 m e 6 m dalla testa del palo, iniziano a risentire del riscaldamento prodotto dalla degradazione in ambiente anaerobico della parte organica dei rifiuti, in maniera sostanzialmente identica nei due pali. Oggi la temperatura dei sensori a 2 m di profondità si è stabilizzata a 26 °C nel setto 5 mentre nel setto 7, dopo essersi stabilizzata a 26° C per diverso tempo, dal **gennaio 2023 mostra un nuovo trend leggermente crescente che ha portato la temperatura a 28°C ad aprile 2024.**

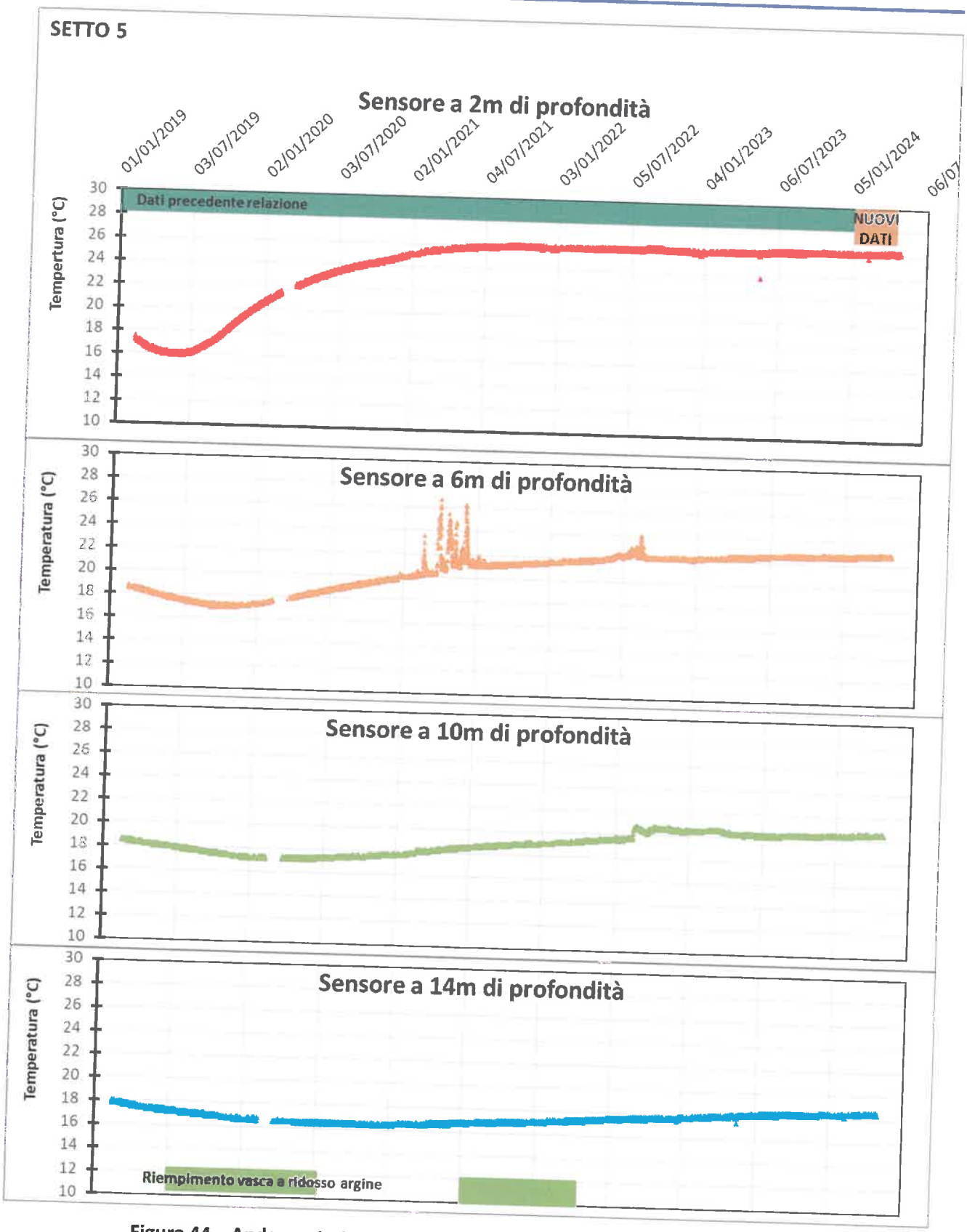


Figura 44 – Andamento temporale della temperatura nei pali D del setto n.5

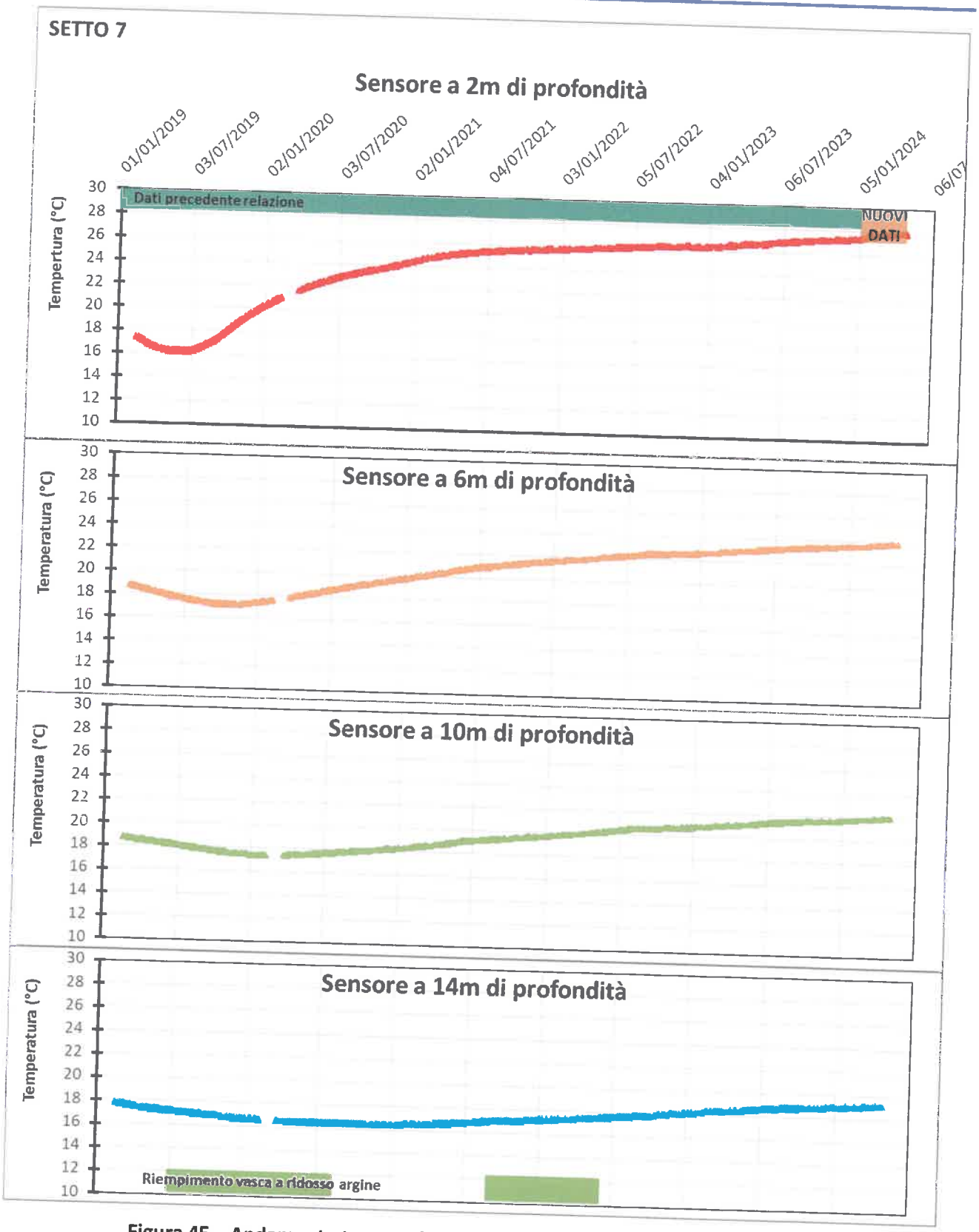


Figura 45 – Andamento temporale della temperatura nei pali D del setto n.7

7 CONCLUSIONI E SUGGERIMENTI PER IL PROSIEGUO DEL MONITORAGGIO

I dati aggiornati di monitoraggio dell'argine confermano il perdurare di un comportamento dell'opera complessivamente soddisfacente, anche se il quadro delle pressioni interstiziali si mantiene sostanzialmente immutato - ad indicare il parziale raggiungimento degli obiettivi di drenaggio previsti - e gli inclinometri più significativi continuano a mostrare una progressione della deformazione distribuita sull'intera altezza dell'argine. Si evidenzia che nell'ultimo periodo la coltivazione della discarica si è avvicinata all'arginatura con un sovralzo della porzione est. L'intervento di impermeabilizzazione della sommità arginale non mostra al momento effetti di rilievo sui valori delle pressioni interstiziali registrati con sonde elettriche, anche se inizia a notarsi un disaccoppiamento tra le portate emunte e le precipitazioni meteoriche.

Dato il livello dei rifiuti in prossimità dell'argine, il monitoraggio è oggi rivolto al controllo della risposta deformativa dell'opera alle spinte esercitate dal progressivo abbancamento a monte.

I **dati inclinometrici**, ottenuti con una nuova sonda dal dicembre 2022 e raccordati alle letture precedenti per dare una continuità al monitoraggio, indicano una situazione complessivamente stazionaria. Le misure più recenti, nel **periodo dicembre 2023 - aprile 2024** indicano il perdurare del trend deformativo distribuito sull'intera altezza del corpo arginale che, pur escludendo i primi 2 m più superficiali, ha prodotto nel periodo di osservazione spostamenti cumulati di alcuni millimetri degli inclinometri G, H ed M3. Sembra inoltre apparire una deformata "ad S" degli inclinometri G ed H al passaggio tra l'argine e la formazione che potrebbe derivare da un carico assiale sui tubi di misura da ricondurre ad assestamenti verticali del corpo arginale, favorito forse anche dai nuovi abbancamenti prossimi all'arginatura. Il quadro complessivo suggerisce l'opportunità di proseguire un monitoraggio inclinometrico a cadenza mensile.

Dopo **6 anni di monitoraggio della piezometria** dell'argine permangono tuttora elevate pressioni interstiziali sia nel corpo arginale che nel substrato pliocenico, condizione anomala che non si è modificata né a seguito del continuo drenaggio dell'opera, né in conseguenza dell'incremento dei carichi dei rifiuti (che pure hanno prodotto deformazioni dell'argine), né a seguito dell'impermeabilizzazione della sommità arginale.

La relativamente significativa portata d'acqua che continua ad essere emunta dai **pozzi verticali** di piccolo diametro, se da un lato garantisce il mantenimento di un drenaggio efficace della fondazione dell'argine, dall'altro indica con elevata probabilità la presenza di una, seppur modesta, circolazione idrica sotterranea alla scala locale dei versanti, più sostenuta di quanto si potesse ipotizzare vista la natura argillosa dei terreni presenti. Va ricordato infatti che la fondazione dell'argine è il punto più basso della formazione pliocenica di bassissima permeabilità rispetto a tutta l'area circostante. Quindi l'acqua che viene continuamente emunta può provenire sia da un'infiltrazione lungo le pendici esposte alle piogge della valle sia dall'acqua eventualmente infiltrata sottotelo che non riesce ad essere raccolta dalle apposite tubazioni, schermate da diverse decine di centimetri di argilla compattata. Le osservazioni recenti, pur confermando una certa

stagionalità delle portate, indicano un emungimento nel periodo primaverile confrontabile con quello degli anni precedenti. Si evidenzia, inoltre, la notevole portata del pozzo d19 che in precedenza non aveva mai evidenziato portate significative, a conferma della complessità dell'idraulica sotterranea dell'arginatura. Sul tema si attendono i risultati dell'indagine idrogeologica in corso per interpretare meglio il fenomeno osservato.

Il quadro complessivo che si delinea dal monitoraggio continua a far ritenere opportune le seguenti raccomandazioni:

- eseguire un intervento di manutenzione dei piezometri Casagrande PC-4 posti sull'argine il cui pozzetto è parzialmente interrito e PC-5 le cui due celle risultano praticamente asciutte malgrado le quote piezometriche circostanti siano notevolmente superiori; si rinnova l'invito a procedere ad una loro pulizia e/o controllo per verificarne lo stato;
- approfondire il tema dell'origine e della permanenza di elevate sovrappressioni interstiziali nel corpo arginale e nei terreni di fondazione tramite:
  - per la deformazione del corpo arginale:
    - installare sull'argine, su 2 verticali, degli estensimetri multibase, per monitorare l'evoluzione dei cedimenti dell'argine anche interni all'argine stesso;
  - per le argille plioceniche di base:
    - monitorare l'andamento delle pressioni interstiziali nella formazione pliocenica al variare del carico dei rifiuti, in un'area ancora non caricata.

Per il dettaglio di questi due interventi di indagine e monitoraggio si allegano i documenti specifici in Appendice al presente elaborato. Relativamente ai sensori da porre sotto il fondo della discarica (piezometri e celle di pressione totale), si è verificata la possibilità di lasciare i collegamenti elettrici sottotelo per oltre 100 m, così da portare i fili all'esterno senza attraversare il pacchetto di impermeabilizzazione della discarica, ottenendo risposta positiva da Gestecno.

Si auspica che i prossimi lavori per l'ampliamento dei volumi conferibili nell'impianto siano l'occasione per implementare le attività di indagine e monitoraggio.

APPENDICE 1

PIANO DI MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI VERTICALI DELL'ARGINE

PIANO DI MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI VERTICALI DELL'ARGINE

Per approfondire la conoscenza della distribuzione delle deformazioni verticali che avvengono in profondità nel corpo arginale si propone l'installazione di due verticali estensimetriche multibase.

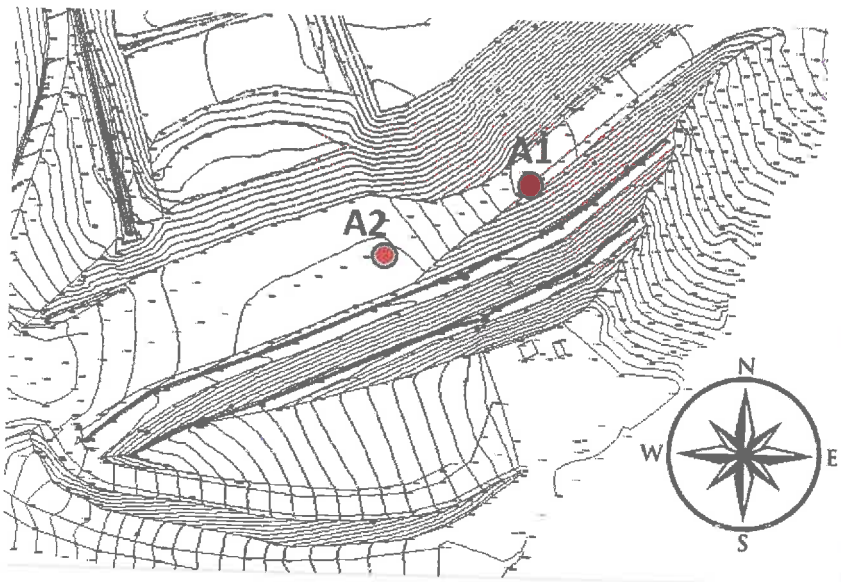
Una verticale estensimetrica multibase è formata da una serie di aste inestensibili vincolate a diverse profondità e libere di scorrere lungo la loro lunghezza così da trasmettere in superficie il movimento relativo che si verifica tra la testa ed il punto fisso in profondità. Le misure in superficie possono essere eseguite manualmente, tramite un calibro, o in modo automatico, tramite dei trasduttori di spostamento collegati ad una centralina di acquisizione dati.

Si prevede di installare due verticali nella porzione est dell'argine (dove le pressioni interstiziali permangono molto elevate) con **4 basi di misura ciascuna**. Nel dettaglio:

- **estensimetro A1**: lunghezza L=25 m, basi di misura alle profondità di 6m, 12m, 18m, 25 m;
- **estensimetro A2**: lunghezza L=18 m, basi di misura alle profondità di 4,5m, 9m, 13,5m e 18m.

Si prevede di eseguire misure con cadenza mensile (se manuali), anche se si auspica l'installazione di un sistema di acquisizione dei dati in continuo.

I sondaggi per l'installazione degli estensimetri saranno a carotaggio continuo e si provvederà al prelievo di 2+2 campioni indisturbati nel corpo arginale da sottoporre a prove di caratterizzazione specifica anche per il comportamento del terreno in campo non saturo (ad es. curva di ritenzione)



A titolo esemplificativo, si rimanda alla descrizione tecnica della strumentazione di interesse proposta dalla ditta "Gestecno srl" – estensimetro multibase da foro.

APPENDICE 2

PIANO DI MONITORAGGIO SULLA RISPOSTA AL CARICO DELLA FORMAZIONE PLIOCENICA

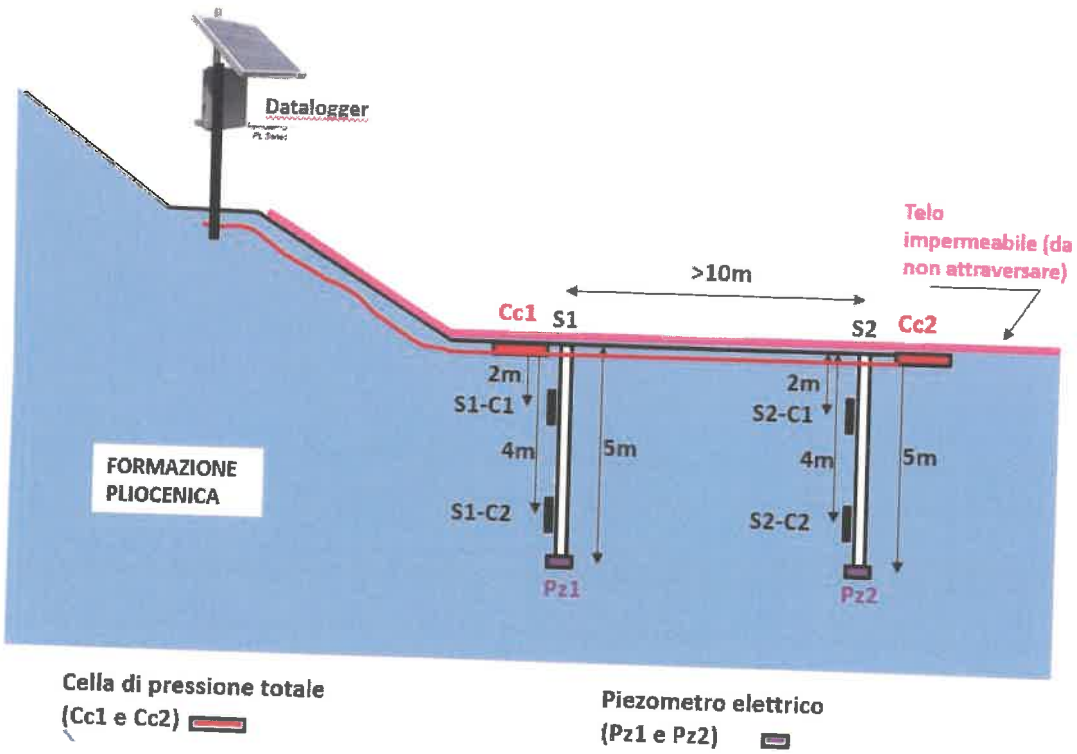
PIANO DI MONITORAGGIO SULLA RISPOSTA AL CARICO DELLA FORMAZIONE PLIOCENICA

Allo scopo di indagare l'origine delle elevate sovrappressioni interstiziali nelle argille plioceniche alla base dell'argine, si propone di mettere in opera dei sensori nei terreni di fondazione di una zona della discarica in fase di ampliamento. L'obiettivo è di posizionare nei terreni naturali al disotto del pacchetto di impermeabilizzazione di base della discarica dei sensori per la misura del carico totale e dei piezometri elettrici. Tali strumenti, attivati prima dell'inizio del riempimento della discarica, permetteranno di capire la risposta della formazione pliocenica, in termini di sviluppo e dissipazione di sovrappressioni interstiziali, al carico indotto dallo stoccaggio dei rifiuti. **Come verificato con GESTECNO non ci sono problemi con cablaggi elettrici di lunghezza dell'ordine di 100 m.**

Il piano di monitoraggio consiste in:

- realizzazione di due sondaggi a carotaggio continuo (S1 e S2) della lunghezza di 5 m con prelievo di 4 campioni indisturbati (S1-C1, S1-C2, S2-C1 e S2-C2);
- posizionamento a 5 m di profondità di due piezometri elettrici resistivi (Pz1 e Pz2) e sigillatura del foro soprastante;
- posizionamento sul piano campagna di due celle di pressione totale (Cc1 e Cc2);
- collegamento elettrico dei 4 sensori a datalogger con alimentazione solare e trasmissione dati GSM, possibilmente utilizzando uno dei pozzi per la raccolta del percolato che dispongono anche di alimentazione elettrica.

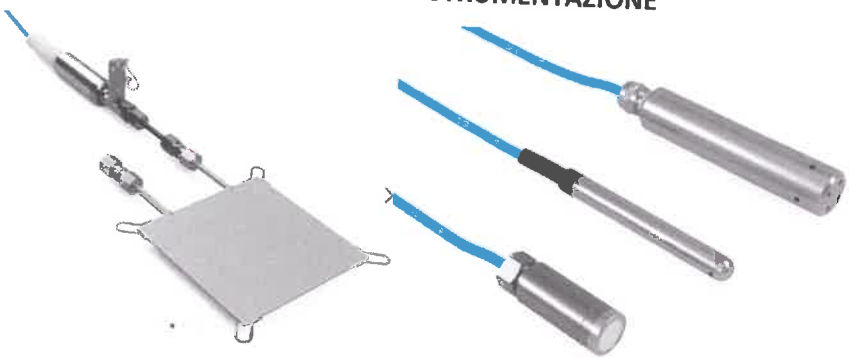
La figura seguente mostra la disposizione indicativa della strumentazione.



I campioni S1-C1 e S1-C2 saranno conservati in cella frigorifera per almeno 1 anno in attesa di valutare eventuali prove geotecniche. Sui campioni S2-C1 e S2-C2 si determineranno:

- descrizione del campione e fotografia;
- curva granulometrica completa (setacciatura e sedimentazione);
- misura del contenuto in acqua;
- limiti di Atterberg;
- prova edometrica a deformazione controllata (CRS) al fine di determinare il grado di sovraconsolidazione di terreni fortemente sovraconsolidati;
- contenuto di carbonati;
- prova di permeabilità.

DETTAGLI SULLA STRUMENTAZIONE



CELLA DI PRESSIONE TOTALE

Le celle di pressione NATM vengono utilizzate per il controllo delle pressioni agenti al contatto tra una opera di sostegno (ad esempio una centinatura in galleria) e un terreno spingente.

La cella è costituita da un polmone d'acciaio di forma rettangolare riempito da un olio speciale e collegato ad un trasduttore elettrico che trasforma ogni variazione di pressione agente sul polmone in una variazione di segnale elettrico con uscita standard 4÷20 mA.

PIEZOMETRO ELETTRICO RESISTIVO

Il piezometro elettrico resistivo è un trasduttore di pressione che viene utilizzato per misurare la pressione interstiziale nel terreno (versione assoluta) oppure per determinare l'altezza piezometrica all'interno di piezometri (versione relativa). Nella sua versione relativa, all'interno del cavo di collegamento un tubicino mette in comunicazione la camera di riferimento del sensore con l'atmosfera, in modo tale che eventuali variazioni di pressione ambientale agiscano contemporaneamente sia sulla superficie piezometrica che sulla camera di riferimento: ciò permette di misurare la sola pressione piezometrica e quindi il livello dell'acqua.

Si rimanda, a titolo esemplificativo, alle descrizioni tecniche della strumentazione di interesse della ditta "Gestecno srl" (www.gestecno.it)