




**ASSE VIARIO MARCHE-UMBRIA  
E QUADRILATERO DI PENETRAZIONE INTERNA  
MAXI LOTTO 2**

LAVORI DI COMPLETAMENTO DELLA DIRETTRICE PERUGIA ANCONA:  
SS. 318 DI "VALFABBRICA", TRATTO PIANELLO -VALFABBRICA  
SS. 76 "VAL D'ESINO", TRATTI FOSSATO VICO - CANCELLI E ALBACINA - SERRA SAN QUIRICO  
"PEDEMONTANA DELLE MARCHE", TRATTO FABRIANO-MUCCIA-SFERCIA.

**PROGETTO ESECUTIVO DI DETTAGLIO**

<p><b>CONTRAENTE GENERALE:</b></p> 	<p><i>Il responsabile del Contraente Generale:</i></p>  Ing. Federico Montanari	<p><i>Il responsabile Integrazioni delle Prestazioni Specialistiche:</i></p>  Ing. Salvatore Lieto
--	---	--

**PROGETTAZIONE: Associazione Temporanea di Imprese**

Mandataria: **PROGETTAZIONE GRANDI INFRASTRUTTURE PROGIN S.p.A.** Mandanti: **LOMBARDI SA INGEGNERI CONSULENTI** **LOMBARDI-REICO INGEGNERIA S.r.l.**



**SGAI s.r.l. di E. Forlani & C.**  
Studio di Ingegneria e Geologia Applicata  
Via Marconi, 20 - 47833 Montiano di Romagna (RN) - ITALY  
P.IVA 01884425003 - telefono +39 054 198277 - e-mail: sgai@sgai.com  
www.sgai.com

<p>RESPONSABILE DELLA PROGETTAZIONE PER L'A.T.I.</p>  Ing. Antonio Grimaldi	
---	--

<p>VISTO: IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO</p> <p>Ing. Iginio Farotti</p>	<p>IL COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI ESECUZIONE</p> <p>Ing. Vincenzo Pardo</p>	<p>IL DIRETTORE DEI LAVORI</p> <p>Ing. Peppino Marascio</p>
---	---	---

<p><b>2.1.1. - PEDEMONTANA DELLE MARCHE</b> <b>Lotto funzionale del Sub lotto 2.1 - Tratto Fabriano - Matelica Nord</b></p> <p>Opere d'arte maggiori: Galleria Naturale Serre Applicazione classifica tecnica contro il pericolo di miscele grisuose Rapporto finale del Tecnico Specialista</p>	<p><b>SCALA:</b> ---</p> <p><b>DATA:</b> <b>Luglio 2020</b></p>
--	---

Codice Unico di Progetto (CUP) **F12C03000050021** (Assegnato CIPE 20-04-2015)

Codice elaborato:

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id. doc.	N. prog.	Rev.
L 0 7 0 3	2 1 1	E	1 3	G N 3 1 0 0	R E L	1 9	A

REV.	DATA	DESCRIZIONE	Redatto	Controllato	Approvato
A	Luglio 2020	Emissione		S. LIETO	A. GRIMALDI

**DIRPA2 S.c. a r.l.**

**Asse viario Marche-Umbria e Quadrilatero di  
penetrazione interna Maxilotto n. 2**

**Pedemontana delle Marche  
Lotto 2.1.1  
tratto "Fabriano – Matelica Nord"**

**GN 31 – GALLERIA NATURALE SERRE**

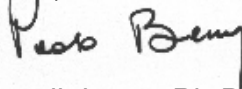
**APPLICAZIONE CLASSIFICA TECNICA CONTRO IL PERICOLO DI  
MISCELE GRISUTOSE**

**TERMINE SCAVO DELLA GALLERIA SERRE: RAPPORTO FINALE DEL  
TECNICO SPECIALISTA**

Il Tecnico Specialista

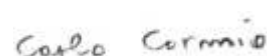
Prof. Ing. Paolo Berry

già Ordinario della Cattedra di "Arte Mineraria" ed "Ingegneria e Sicurezza degli Scavi"  
della Scuola di Ingegneria e Architettura, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna



Ph.D. Ing. Annalisa Bandini

Ph.D. Ing. Carlo Cormio



**Bologna, 20 giugno 2019**



**Pagina intenzionalmente bianca**

## Indice dei contenuti

1. Premessa .....	1
2. Attribuzione degli indici di classe 1c e 2 alla galleria Serre ante operam e criteri di modifica in corso d'opera .....	3
3. Documentazione consultata.....	5
4. Descrizione dell'opera.....	6
5. Informazioni disponibili ante operam necessarie per l'identificazione dei modelli emissivi.....	8
5.1. Litologie lungo il tracciato della Serre.....	8
5.1.1. Caratteristiche geomeccaniche delle formazioni .....	9
5.1.2. Misure di permeabilità.....	10
5.2. Inquadramento geologico – strutturale.....	11
5.3. Possibile presenza di metano lungo il tracciato.....	13
5.3.1. Misure alla boccaforo dei sondaggi.....	13
5.3.2. Misure con “Gas Trap” .....	15
6. Classificazione ante operam della galleria .....	16
7. Dati acquisiti in corso d'opera .....	17
7.1. Rilievo geostrutturale del fronte di scavo.....	18
7.1.1. Cantiere imbocco Nord .....	18
7.1.2. Cantiere imbocco Sud.....	21
7.2. Carotaggi lungo il tracciato ed al fronte di scavo .....	23
7.3. Monitoraggio in corso d'opera della miscela aria – metano .....	25
7.3.1. Cantiere imbocco Nord .....	27
7.3.1.1. Emissioni di metano rilevate a boccaforo dei sondaggi inclinometrici .....	27
7.3.1.2. Metano rilevato nei fori di consolidamento al fronte ed al contorno .....	29
7.3.1.3. Miscele aria – metano rilevate nella galleria .....	33
7.3.2. Cantiere imbocco Sud.....	40
7.3.2.1. Afflussi di metano rilevate a boccaforo dei sondaggi inclinometrici .....	40
7.3.2.2. Metano rilevato nei fori di consolidamento al fronte, al contorno e durante le prospezioni al fronte .....	44
7.3.2.3. Afflussi di metano in galleria .....	46
8. Verifica del modello di flusso e dell'indice di classifica .....	49



**Pagina intenzionalmente bianca**

## 1. Premessa

SERENGEO S.r.l. (nel seguito SERENGEO), il 21 marzo 2017 ha trasmesso a DIRPA 2 S.c.a.r.l. (nel seguito DIRPA 2) la Relazione con cui il Tecnico Specialista formula previsioni su possibili afflussi di metano in galleria causati dagli scavi per la realizzazione della galleria Serre. Gli afflussi, miscelandosi con l'atmosfera della galleria, possono detonare o deflagrare, se i tenori di gas raggiungono il campo di esplosività.

In base alle accurate valutazioni con studi e ricerche scientifiche, il Tecnico Specialista ha assegnato l'indice di classifica a tratti della Serre, distinti tra loro per le specifiche peculiarità dei potenziali afflussi di grisù e dei possibili inneschi di miscele grisutose.

La classificazione si basa sui criteri di stima indicati dalla Nota Tecnica emanata dalla Regione Marche (nel seguito "Nota Tecnica" o "Nota") "*Standard di sicurezza da adottarsi durante la realizzazione delle Grandi Opere Infrastrutturali: Lavori in sotterraneo – Scavo in terreni grisutosi*" (Decreto n.18/SPU del 06/09/2013<sup>1</sup>).

Lo Standard stabilisce che la classificazione è un compito che deve essere assegnato imprescindibilmente al Tecnico Specialista, dotato di elevata competenza ed esperienza su questo specifico tema ingegneristico.

Per determinare la classificazione della Serre, il Tecnico Specialista, nel rispetto di quanto stabilito dalla Nota, ha condotto Studi e Ricerche, altamente specialistici, che hanno contemplato:

- documenti tecnici e di ricerche scientifiche, sviluppati nell'area a cavallo tra l'Umbria e le Marche, sulle condizioni geologiche e geostrutturali collegabili a:
  - presenza / assenza di trappole strutturali, fratture, contenuto diffuso di metano nei pori di rocce o terreni, processi naturali di flusso del grisù, ecc.,qualunque sia l'entità e la modalità attesa dei flussi (manifestazioni da "in tracce" fino a consistenti) nelle formazioni profonde dell'area interessata dal tracciato della galleria;
- modalità di flusso e concentrazioni di metano, registrate con "Gas Trap" e con esplosimetro manuale, a boccaforo dei sondaggi geognostici lungo il tracciato dell'opera e delle gallerie del 2° (Croce di Calle e Mistranello), 3° e 4° stralcio funzionale, che intessano le stesse formazioni, ed in aree limitrofe;
- dati storici di emissioni spontanee di petrolio / metano in superficie (salse) nel territorio prossimo alla zona di interesse;
- titoli minerari rilasciati dal Ministero per lo Sviluppo Economico (Direzione Mineraria) per la ricerca e l'estrazione di idrocarburi;
- stratigrafie e relazioni tecniche dei pozzi petroliferi e/o metaniferi, esplorativi e produttivi, non molto distanti dall'area di intervento;
- recenti pubblicazioni scientifiche (libri, atti di congressi, articoli in riviste scientifiche, ecc.) nazionali ed internazionali sull'assetto geostrutturale, sulla sismicità dell'area e sugli associabili modelli di trasporto, flusso ed emissione del metano.

---

<sup>1</sup> La Nota Tecnica riproduce la NIR n° 28 (Nota InterRegionale emanata dalle Regioni Emilia Romagna – Toscana (NOTA INTERREGIONALE PROT. N° ASS/PRC/05/1141 del 13/01/2005 "*Lavori in sotterraneo. Scavo in terreni grisutosi. Grisù 3a edizione*"), che è stata ed è applicata in gran parte del territorio nazionale (Emilia Romagna, Toscana, Marche, Piemonte, Trentino Alto Adige, Liguria, Campania, Basilicata, Calabria, Sicilia).

Al termine degli Studi e Ricerche, il Tecnico Specialista ha stabilito, a tutela della sicurezza delle maestranze, di suddividere il tracciato in due tratti distinti tra loro per le specifiche peculiarità dei potenziali afflussi di grisù e dei possibili meccanismi di innesco delle miscele aria – metano. Pertanto i due tratti sono stati così classificati ante operam:

- Classe 2 da pk 1+570,90 a pk 1+940,00 (tratto da Nord verso Sud);
- Classe 1c da pk 2+512,00 a pk 1+940,00 (tratto da Sud verso Nord).

Il 23 giugno 2017 è iniziato lo scavo del tratto in naturale dell'imbocco Nord (pk 1+609,33), ed il 19 luglio 2017 è iniziata la realizzazione dell'imbocco Sud (pk 2+459,90).

Il 20 giugno u.s. è terminato lo scavo della Serre.

Conformemente a quanto stabilito dalla Nota, durante l'avanzamento dei fronti, il Tecnico Specialista ha analizzato, sistematicamente, i rilievi pittorici dei fronti (Nord e Sud), i livelli di concentrazione delle miscele aria – metano misurati a boccaforo dei fori di consolidamento, nelle prospezioni al fronte, con monitoraggio automatico e manuale, nel cantiere sotterraneo ed a boccaforo dei sondaggi lungo il tracciato. Inoltre ha esaminato i documenti con le valutazioni e le osservazioni periodicamente inoltrategli dal Responsabile del Monitoraggio.

L'applicazione ante operam della classifica tecnica, basata sui risultati dell'attività di Studi e Ricerche, e le variazioni della stessa indotta dall'analisi dei dati acquisiti in corso d'opera, durante l'avanzamento dei fronti di scavo, sono l'oggetto di questo ultimo rapporto del Tecnico Specialista.

I costanti controlli, in corso d'opera, hanno sostanzialmente confermato la validità del “modello di flusso” del metano nei due distinti tratti (classificati **1c** e **2**), fatta eccezione per la porzione del tracciato da pk 1+920 a pk 2+070 dove i rilievi pittorici del fronte e le analisi sistematiche di afflussi hanno riconosciuto la presenza di un **sistema di lineazioni di frattura in regime transpressivo**, ovvero strutture tipiche del “modello di flusso” della classe 2, all'interno della Formazione del Camerino, non prevista e non prevedibile a partire dalle limitate informazioni disponibili in fase di progettazione.

Pertanto, in conformità all'incongruenza riscontrata “*tra le previsioni e la situazione in essere*”, il Tecnico Specialista ha modificato l'estensione dei due indici di classifica (**1c** e **2**) stabilita ante operam. Conseguentemente ha dato indicazione di continuare l'avanzamento (da pk 1+940 a pk 2+070) mantenendo gli apprestamenti della Classe 2 (invece di adottare quelli della classe 1c), anche nel tratto caratterizzato dalla presenza delle lineazioni di frattura di natura tettonica (e, quindi, con modalità emissive tipiche della Classe 2).

Il capitolo 2 richiama la definizione, secondo la Nota Tecnica, della Classe 2 e della Classe 1c e l'approccio scientifico ed ingegneristico da adottare per modificare in corso d'opera, se necessario, la classifica del tracciato garantendo l'assenza assoluta di pericoli derivanti da inneschi di miscele grisucose determinatesi per intrusione di metano in galleria. In particolare, il capitolo affronta i criteri che determinano, in corso d'opera, la necessità di modificare la Classe 1c con la Classe 2 o viceversa.

I capitoli successivi riportano:

- l'elenco dei documenti analizzati dal Tecnico Specialista per redigere e verificare la validità del modello di flusso e degli indici di classifica attribuiti a tratti omogenei di galleria (capitolo 3);
- una breve descrizione dell'opera (capitolo 4);
- gli elementi di conoscenza (scientifici, geostrutturali, dell'industria del petrolio, storici, ecc.) che hanno portato il Tecnico Specialista a definire i modelli emissivi nelle formazioni grisucose

- attraversate dal tracciato della galleria (capitolo 5);
- gli indici di classifica attribuiti, ante operam, ai due distinti tratti della Serre (capitolo 6);
- i dati acquisiti durante la realizzazione della galleria (capitolo 7);
- la verifica del modello di flusso e degli indici di classifica (capitolo 8).

## 2. **Attribuzione degli indici di classe 1c e 2 alla galleria Serre ante operam e criteri di modifica in corso d'opera**

La Nota Tecnica definisce chiaramente gli indici di classifica attribuibili al tracciato (o tratti) di una galleria. In riferimento alla galleria Serre, si richiamano le definizioni attribuite alle Classi 1c e 2.

La **Classe 1c** è attribuita all'intero tracciato della galleria (oppure ad uno o più tratti omogenei ma indipendenti) se:

- le ricerche bibliografiche, storiche, tecniche e scientifiche, le analisi della storicità delle manifestazioni spontanee, dei dati sulla ricerca e la produzione industriale di idrocarburi, delle modificazioni geostrutturali determinate da sismi, delle emissioni registrate nell'esecuzione di altre opere sotterranee, ecc.;
- le indagini sperimentali di superficie e profonde per la ricerca di formazioni grisutose e per la loro caratterizzazione come potenziali sorgenti di afflussi nel cantiere sotterraneo,

inducono a ritenere che, l'attività di scavo possa provocare afflussi significativi di grisù, nel cantiere che realizza la galleria, di varia entità, discontinui e non molto frequenti.

Questa condizione è tipicamente associabile a serbatoi naturali di idrocarburi, costituiti da formazioni permeabili, fratturate, talora di non grandi dimensioni (argilliti, marne, calcari, ecc.), avvolti da roccia o terreno impermeabile (ad esempio argille), di forma e dimensioni molto varie ma spesso a carattere regionale.

Questi serbatoi hanno distribuzione spaziale casuale e perlopiù poco prevedibile.

Se il serbatoio è attraversato dal fronte in avanzamento il gas penetra nel cavo. Se il fronte di scavo non intercetta un serbatoio presente a distanza non ragguardevole rispetto al tracciato, il detensionamento o la significativa modifica dello stato di sollecitazione originario attorno al tracciato, determinerà il collegamento idraulico tra serbatoio e galleria favorendo il trasporto del gas verso la galleria con portate molto varie non escluse quelle a carattere massivo.

La **Classe 2** è attribuita all'intero tracciato della galleria (oppure ad uno o più tratti omogenei ma indipendenti) se:

- le ricerche bibliografiche, storiche, tecniche e scientifiche, le analisi della storicità delle manifestazioni spontanee, dei dati sulla ricerca e la produzione industriale di idrocarburi, delle modificazioni geostrutturali determinate da sismi, delle emissioni registrate nell'esecuzione di altre opere sotterranee, ecc.;
- le indagini sperimentali di superficie e profonde per la ricerca di formazioni grisutose e per la loro caratterizzazione come potenziali sorgenti di afflussi nel cantiere sotterraneo,

inducono a ritenere che, l'attività di scavo possa provocare afflussi significativi di grisù, nel cantiere che realizza la galleria.

La Classe 2 è quindi da prendere in considerazione e valutarne l'applicabilità nelle situazioni in cui il Tecnico Specialista ha conseguito elementi tali da indurlo a ritenere che il tracciato potrebbe incontrare geostrutture, tecnicamente riconducibili a potenziali trappole di idrocarburi (anticlinali, fasce di intensa fratturazione in corrispondenza delle zone di accavallamento tettonico, ecc.).



Attraversando le trappole o, comunque, a causa del collegamento idraulico con esse, indotto dallo scavo, sono da attendersi flussi di grisù in galleria continui oppure discontinui ma con frequenza tale da non poter considerare il fenomeno come evento eccezionale.

Le due definizioni che determinano una diversa classifica sono del tutto inconfondibili dal punto di vista dell'Ingegneria e Sicurezza degli Scavi di gallerie grisutose.

Le modalità di afflusso variano in funzione delle caratteristiche della galleria, del metodo, della tecnica e delle modalità di scavo, delle caratteristiche geo-strutturali dell'ammasso roccioso.

L'indice di classe 1c considera ammassi caratterizzati dalla possibile presenza di serbatoi di grisù costituiti da volumi di roccia ad alta permeabilità (per fratture) racchiusi in una matrice pressoché impermeabile (Figura 1). In particolare, considera situazioni che non permettono di stabilire a priori la distribuzione spaziale, le dimensioni, le forme geometriche e le caratteristiche idrauliche (contenuto in idrocarburi, pressione, ecc.) dei potenziali serbatoi, e conseguentemente i plausibili afflussi di grisù in galleria devono essere considerati generalmente casuali e le modalità di flusso perlopiù poco prevedibili.

Le emissioni, dopo un periodo transitorio iniziale, possono esaurirsi in tempi compatibili con i programmi di avanzamento dello scavo, o rimanere costanti con portate per lo più trascurabili oppure, ma più raramente, con portate significative.

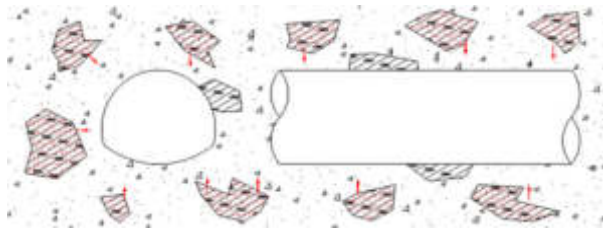


Figura 1. Classe 1c: modalità di emissione da serbatoi di idrocarburi isolati e di dimensioni limitate

L'indice di classe 2 si attribuisce quando è possibile determinare posizione, forma e volume delle potenziali trappole di idrocarburi ed accertare la presenza o meno di serbatoi e di vie di comunicazione idraulica «galleria – serbatoio metanifero» (Figura 2, faglie profonde, strutture geologiche, grandi serbatoi di idrocarburi o serbatoi isolati e di dimensioni limitate).

Le emissioni sono concentrate in tratti individuabili, non si esauriscono in tempi compatibili con il cronoprogramma della realizzazione dell'opera e la portata, dopo un transitorio iniziale, rimane costante nel tempo.

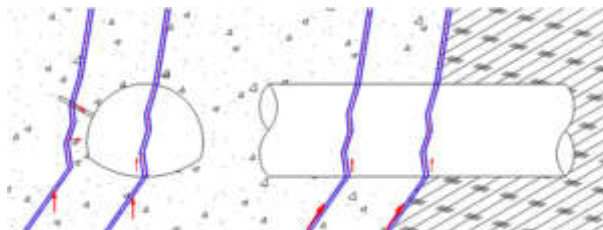


Figura 2. Classe 2: modalità di emissione da faglie profonde o strutture geologiche che mettono in comunicazione idraulica la galleria con il serbatoio di metano

Durante la realizzazione di un tratto in Classe 2, l'ipotesi di modificare la classe (ad esempio da 2 a 1c) e, quindi, le misure di sicurezza ad esso correlate deve essere attentamente ponderata considerando che:

- per garantire condizioni di massima sicurezza deve essere applicato preliminarmente il "Principio di precauzione", poiché «L'assenza di prove non è prova di assenza» (Carl Sagan);
- un cambiamento della classifica attribuita in fase di Progetto comporta una variazione all'organizzazione del cantiere (mezzi d'opera, impianti, apprestamenti, perforazioni al fronte per la ricerca del gas, ecc.) i cui i tempi e costi di realizzazione devono essere attentamente valutati.

### 3. Documentazione consultata

L'ipotesi che il metano possa penetrare nel cantiere di scavo della Serre e la verifica delle Classi attribuite ad uno o più tratti del tracciato, per assicurare il massimo livello di sicurezza contro pericolose miscele aria – metano, che si dovessero generare nell'atmosfera del cantiere, sono state basate, dal Tecnico Specialista, sulla sua elevata competenza ed esperienza su questo specifico tema ingegneristico e, soprattutto, sull'analisi dei seguenti documenti, ai quali si farà riferimento citando, di volta in volta, il numero d'ordine che è stato loro attribuito:

[1] Elaborati del Progetto Esecutivo (revisione di luglio 2016):

- [1.1] Relazione geologica, geomorfologica e geidrogeologica generale;
- [1.2] Relazione geotecnica generale sulle opere in sotterraneo;
- [1.3] Carta geologico – strutturale;
- [1.4] Indagini geognostiche (campagne 2002, 2004, 2006-07, 2014);
- [1.5] Indagini geognostiche (campagna 2015);
- [1.6] Descrizione dell'esito delle indagini per la caratterizzazione del rischio metano;
- [1.7] Profilo geomeccanico della Galleria Serre;

[2] Altri elaborati:

- [2.1] SERENGEO S.r.l. Galleria Serre. Classifica tecnica dei cantieri sotterranei in relazione alle atmosfere esplosive associate al metano, 21 marzo 2017;
- [2.2] SERENGEO S.r.l. Gallerie Croce di Calle e Mistranello. Classifica tecnica dei cantieri sotterranei in relazione alle atmosfere esplosive associate al metano, 4 agosto 2016;
- [2.3] SERENGEO S.r.l. 3° e 4° stralcio funzionale. Classifica tecnica per la realizzazione di gallerie in formazioni potenzialmente grisutose, 15 giugno 2017;
- [2.4] Collins S.r.l. Galleria Serre, Rilievi manuali del gas metano durante l'esecuzione dei fori di consolidamento;
- [2.5] Collins S.r.l. Galleria Serre, Rapporti di monitoraggio del gas metano;
- [2.6] Collins S.r.l. Galleria Serre, Registrazioni del sistema di monitoraggio in continuo;
- [2.7] DIRPA 2 S.c. a r.l. Note Tecniche di Avanzamento;
- [2.8] SERENGEO S.r.l. GN 31 – Galleria naturale Serre. Validità in corso d'opera della classifica tecnica del rischio metano. Relazioni del:
  - 13 novembre 2017;
  - 12 febbraio 2018;
  - 28 marzo 2018;
  - 17 maggio 2018;
  - 27 luglio 2018.

I documenti al punto 2 dell'elenco sono allegati alla presente relazione.

#### 4. Descrizione dell'opera

La Serre è parte dell'infrastruttura viaria "Asse viario Marche-Umbria e Quadrilatero di penetrazione interna Maxilotto n. 2", Pedemontana delle Marche, tratto "Fabriano – Muccia/Sfercia" (nel seguito indicata anche come PdM), primo stralcio funzionale (Figura 3).

Il tracciato, di 941,10 m (da pk 1+570,90 a pk 2+512,00), attraversa, da NNW a SSE, un rilievo collinare (352,02 m s.l.m.) tra i Comuni di Fabriano e Cerreto d'Esì. La Tabella 1 riassume le caratteristiche generali dell'opera, desunte dal profilo longitudinale geomeccanico del Progetto Esecutivo (cfr. elaborato [1.7]).

Il profilo altimetrico della galleria (Figura 4 ed elaborato cartografico [1.7]) ha andamento monotono con pendenza media del 2,0%, immersione verso NNW e copertura massima di 80 m.

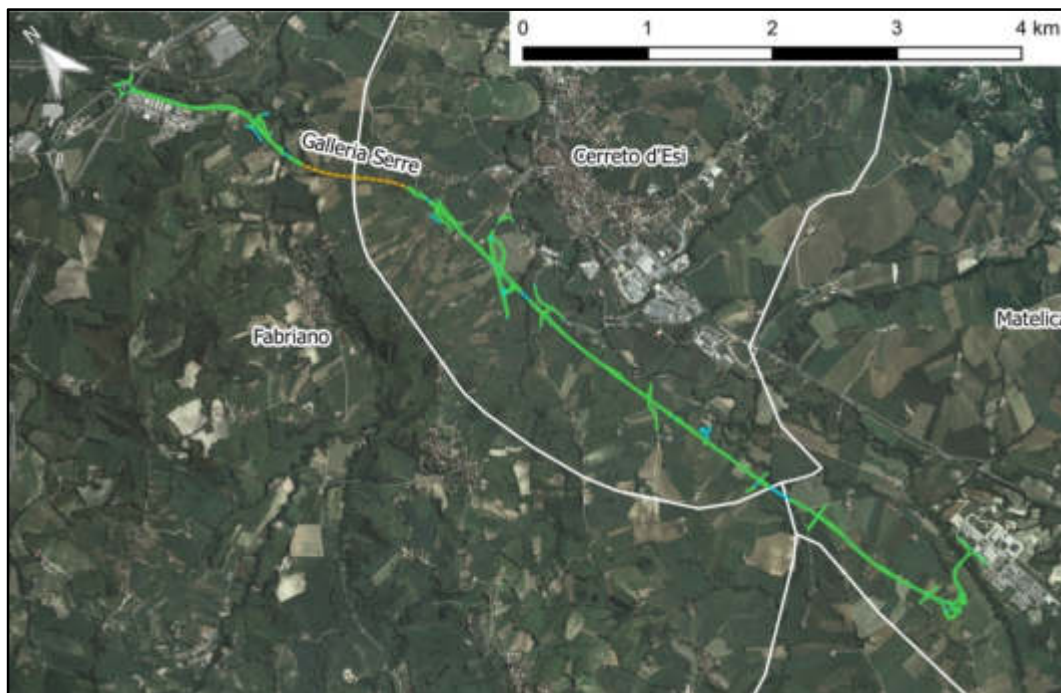


Figura 3. Tracciato del 1° stralcio funzionale della PdM (in verde) sovrapposto all'ortofoto 2012 (fonte: Portale Cartografico Nazionale) ed ai confini comunali (in bianco, fonte: ISTAT). Il tracciato della Serre è rappresentato dalla linea tratteggiata in giallo.

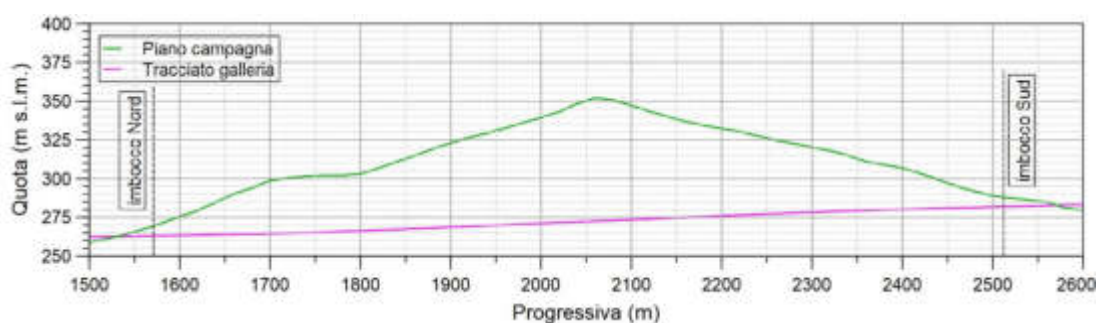


Figura 4. Profilo altimetrico della Serre

Tabella 1. Caratteristiche generali della galleria Serre

Galleria Serre	
Lunghezza (m)	941,10
Pk inizio galleria artificiale lato Nord	1+570,90
Pk inizio galleria artificiale con protesi (imbocco Nord)	1+589,78
Pk inizio galleria naturale (imbocco Nord)	1+609,33
Pk inizio galleria naturale (imbocco Sud)	2+459,90
Pk inizio galleria artificiale con protesi (imbocco Sud)	2-493,86
Pk inizio galleria artificiale lato Sud	2+512,00
Quota livelletta imbocco Nord (m s.l.m.)	260,96
Quota livelletta imbocco Sud (m s.l.m.)	279,74
Pendenza media	2,0%
Copertura massima (m)	80
Quota topografica massima copertura (m s.l.m.)	352,02

Il Progetto Esecutivo della Serre prevede, in relazione alle caratteristiche geomeccaniche delle formazioni da attraversare:

- realizzazione con tecnica di scavo tradizionale, metodo a piena sezione, diametro equivalente della galleria 13,2 m, sezione di 135 m<sup>2</sup>;
- avanzamento del fronte con martello demolitore o escavatore a benna rovescia, con sfondi di lunghezza compresa tra 1,0 m e 1,5 m;
- scavo di piedritti e calotta e successiva realizzazione dell'arco rovescio;
- interventi al fronte prima di eseguire lo scavo (in relazione alla sezione tipo di volta in volta adottata):
  - drenaggi in avanzamento in caso di presenza di acqua;
  - consolidamento al contorno con infilaggi metallici;
  - consolidamenti al fronte con tubi in vetroresina (VTR);
- interventi per il rivestimento di prima fase:
  - centine metalliche, posate in opera con passo compreso tra 80 cm e 120 cm;
  - spritz-beton, proiettato tra il contorno dello scavo ed il profilo interno della centina per uno spessore di 25 cm, con rete elettrosaldata;

- scavo e rivestimento definitivo dell'arco rovescio ad una distanza di 26 m (due diametri) o di 40 m (tre diametri) dal fronte.

In relazione alle condizioni geomeccaniche dell'ammasso riscontrate in corso d'opera, l'arco rovescio potrà essere realizzato ad una distanza, dal fronte, maggiore. Per porre in opera il rivestimento definitivo della calotta, il Progetto Esecutivo non impone una distanza massima dal fronte.

## 5. Informazioni disponibili ante operam necessarie per l'identificazione dei modelli emissivi

### 5.1. Litologie lungo il tracciato della Serre

Il sottosuolo interessato dal tracciato è caratterizzato (Figura 5) in superficie da una coltre di depositi eluvio-colluviali del Pleistocene-Olocene e da depositi di versante, perlopiù accumuli caotici derivanti da movimenti di massa di varia estensione.

Il substrato sottostante la coltre eluvio-colluviale è costituito, procedendo da Nord a Sud, dalle seguenti formazioni:

- Formazione dello Schlier (Sch): alternanza di marne, marne siltose calcaree e argillose, a volte arenacee, e calcari marnosi. La stratificazione è medio-sottile, marcata solo in superficie dalla diversa resistenza agli elementi erosivi, mentre in profondità è generalmente priva di stratificazione;
- Formazione del Tripoli (Tri): sottile livello di argille marnose con elementi carboniosi e bituminosi, sporadiche e sottili intercalazioni di marne ed arenarie diatomitiche, fogliettate, stratigraficamente ascrivibili alla Formazione Gessoso-Solfifera;
- Formazione di Camerino: sequenza ordinata di strati pelitici ed arenacei. Le seguenti facies si distinguono per i diversi rapporti fra frazione pelitica ed arenacea:
  - associazione pelitica (Pel): marne argillo-siltose scure con subordinate peliti arenacee e marne emipelagiche;
  - associazione pelitico-arenacea (PA): costituita da litofacies pelitico-arenacee e subordinatamente da litofacies arenaceo-pelitiche. Questa associazione si rinviene in più livelli, caratterizzati da diversi spessori. Gli strati arenacei tendono ad essere spessi e medio spessi, quelli pelitici e marnosi sono più sottili.

L'unità del Tripoli (Tri – Messiniano) e la soprastante Formazione di Camerino (Pel, PA – Messiniano) costituiscono sostanzialmente un'unica sequenza di argille marnose e marne argillose sottilmente laminate e stratificate, con intercalazioni arenacee.

Sondaggi a distruzione di nucleo ed a carotaggio (cfr. elaborato [2.1]), realizzati durante varie fasi della progettazione, hanno fornito elementi utili per caratterizzare le formazioni, interessate dal tracciato, sotto il profilo geologico e geomeccanico.

Escludendo la copertura eluvio-colluviale che interessa gli imbocchi, il tracciato attraversa da Nord a Sud (elaborato [1.7]):

- lo Schlier fino alla progressiva 1+812;

- il Tripoli (sondaggi A2, SE2 e GT2bis) da pk 1+812 a 1+890;
- la Formazione del Camerino dalla pk 1+890 fino all'imbocco Sud.

Buona parte del tracciato soggiace ad uno strato di peliti, posto a tetto della Formazione del Camerino (Figura 6), spesso in media 20 m, intercettato dalla pk 2+355 (in corrispondenza del sondaggio S6) fino all'imbocco Sud.



Figura 5. Carta degli affioramenti con indicazione del tracciato della galleria Serre (estratta da [1.3])

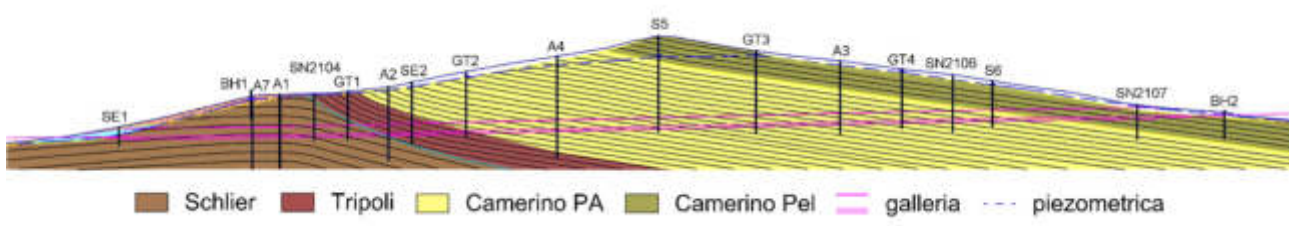


Figura 6. Profilo geomeccanico della Galleria Serre (linee magenta), ricostruito a partire dai sondaggi (linee nere)

### 5.1.1. Caratteristiche geomeccaniche delle formazioni

Dall'esame delle carote e dai risultati delle analisi di laboratorio (cfr. elaborato [2.2]) si desume che:

- la Formazione del Camerino ha proprietà meccaniche molto variabili da uno strato all'altro, in funzione della natura degli strati (arenacei o pelitici). Gli strati arenacei hanno resistenze

uniassiali superiori rispetto a quelli pelitici, ma spesso sono molto fratturati. Le carote pelitiche variano da terrigene a litoidi; nel secondo caso, si tratta di rocce generalmente tenere, a resistenza da bassa o molto bassa a media. L'eterogeneità dipende da sensibili variazioni nelle caratteristiche degli strati in termini di granulometria, grado di cementazione, ecc.;

- le carote di Schlier sono più competenti rispetto a quelle del Camerino, ma caratterizzati spesso da un elevato grado di fratturazione, variabile anche lungo la stessa verticale.

### 5.1.2. Misure di permeabilità

Sono state eseguite in 5 sondaggi (Tabella 2) prove di permeabilità Lugeon e/o Lefranc (nel secondo caso a carico variabile, mediante immissione di acqua in foro), per definire le condizioni idrauliche degli ammassi.

I risultati sono indicativi e puntuali della distribuzione delle caratteristiche di permeabilità nell'ammasso. Inoltre, nei terreni con prevalenza di frazioni fini, come nel caso in esame, durante le prove a carico variabile (prove di abbassamento) sulle pareti del sondaggio si può formare uno strato di materiale a grana fine che riduce la permeabilità, portando ad una sottostima della misura (skin effect). Di conseguenza, così come sono state progettate e condotte, le indagini non individuano, se non casualmente, la presenza o meno di litologie a bassa permeabilità in grado di "intrappolare" potenziali serbatoi di gas.

Le misure sono state eseguite nel Camerino ed in un solo sondaggio nella Formazione dello Schlier (Figura 7). Non sono disponibili misure relative al Tripoli.

I valori di permeabilità ottenuti (Tabella 2), variabili tra  $10^{-6}$  e  $10^{-10}$  m/s, sono bassi o molto bassi in entrambe le formazioni (Camerino e Schlier), ovvero sono tipici di terreni poco permeabili o praticamente impermeabili. Pertanto, si può supporre che l'indagine abbia caratterizzato strati non fratturati dello Schlier e prevalentemente strati pelitici del Camerino. Le permeabilità rilevate alla quota della livelletta della Serre sono dell'ordine di  $10^{-8}$  e  $10^{-9}$  m/s.

Tabella 2. Galleria Serre: prove di permeabilità. I sondaggi sono ordinati in funzione della posizione (dall'imbocco Nord all'imbocco Sud della galleria) e la litologia nei tratti di foro indagati è stata desunta dai rapporti di prova (elaborato [1.4])

Sondaggio	Prova	Profondità sotto boccaforo (m)	Permeabilità (m/s)	Litologia	Formazione
SN2104	Lefranc	19,40 ÷ 20,00	$7,53 \cdot 10^{-8}$	Marne	Schlier
	Lefranc	28,00 ÷ 28,60	$5,00 \cdot 10^{-8}$		
	Lefranc	38,00 ÷ 38,60	$8,81 \cdot 10^{-8}$		
S5	Lugeon	60,90 ÷ 62,00	$3,20 \cdot 10^{-9}$	Marne argillose con livelli arenacei fini	Camerino
	Lugeon	69,00 ÷ 71,65	$9,00 \cdot 10^{-10}$		
SN2106	Lefranc	28,00 ÷ 28,70	$9,23 \cdot 10^{-9}$	Arenarie	Camerino
	Lefranc	32,50 ÷ 33,10	$4,24 \cdot 10^{-9}$		
	Lefranc	40,00 ÷ 40,70	$3,26 \cdot 10^{-9}$		
S6	Lefranc	18,85 ÷ 23,50	$3,55 \cdot 10^{-6}$	Marne argillose con livelli arenacei fini	Camerino
	Lefranc	27,00 ÷ 31,25	$8,88 \cdot 10^{-9}$		
SN2107	Lefranc	8,30 ÷ 8,90	$2,68 \cdot 10^{-8}$	Arenarie	Camerino
	Lefranc	11,30 ÷ 11,50	$2,10 \cdot 10^{-8}$		

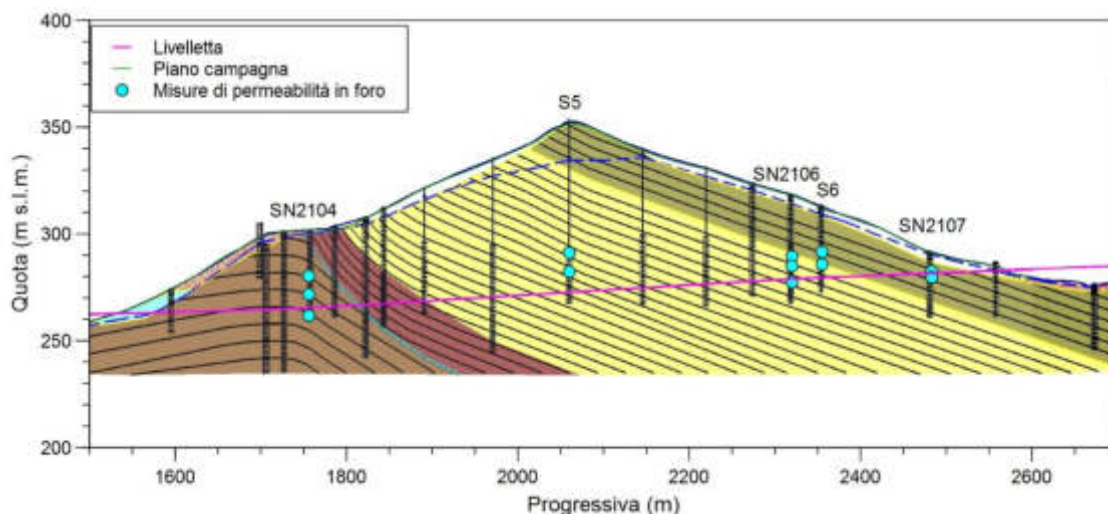


Figura 7. Misure di permeabilità in foro: ubicazione dei punti di campionamento (pallini ciano) rispetto alla quota della livelletta della galleria (linea continua magenta)

## 5.2. Inquadramento geologico – strutturale

La Serre è posta nella parte settentrionale della sinclinale del Bacino di Camerino (Figura 8), che ha asse orientato in direzione appenninica (NW-SE). Nella porzione interessata dal tracciato, il contatto tra Camerino e Schlier è di tipo tettonico (linea tratteggiata in Figura 8) ed è segnato da una faglia normale ENE-immersa (faglia di Camerino), la cui attività è documentata dalla contemporanea deposizione dello Schlier con i depositi sinorogenetici del Camerino. La faglia non affiora in superficie per la presenza di una coltre di depositi alluvionali, eluvio-colluviali e detriti di versante, che si estende con continuità lungo l'intero tracciato della Serre.

I documenti di progetto (cfr. elaborati [1]) non indicano presenza o meno di geostrutture lungo il tracciato, perché non sono state condotte indagini geofisiche profonde (sismica a riflessione) nell'area di interesse e perché l'assenza, lungo il tracciato, di affioramenti sufficientemente estesi delle formazioni (Schlier, Tripoli e Camerino) lungo il tracciato della Serre non ha consentito il riconoscimento di dislocazioni tettoniche significative (faglie) in superficie.

Ciò nonostante, considerata anche la sismicità dell'area (Figura 9), non si può escludere l'esistenza di discontinuità e/o fratture nell'ammasso, che possono determinare un collegamento idraulico con potenziali accumuli profondi di metano. Tra l'altro, **l'assetto strutturale dello Schlier è caratterizzato da una piega anticlinale ed il contatto tra lo Schlier ed il Tripoli in questa porzione del tracciato è di tipo tettonico, corrispondente ad una faglia normale** (Scisciani et al., 2000).

La Formazione del Tripoli ed il soprastante Camerino sono in assetto monoclinale con debole ma costante immersione degli strati verso Sud-Est. **Le stratigrafie dei sondaggi indicano la presenza di zone fratturate negli strati arenacei, con permeabilità per fratture, che, se intercettate dallo scavo, potrebbero dare luogo a flussi di metano verso il cantiere sotterraneo.**



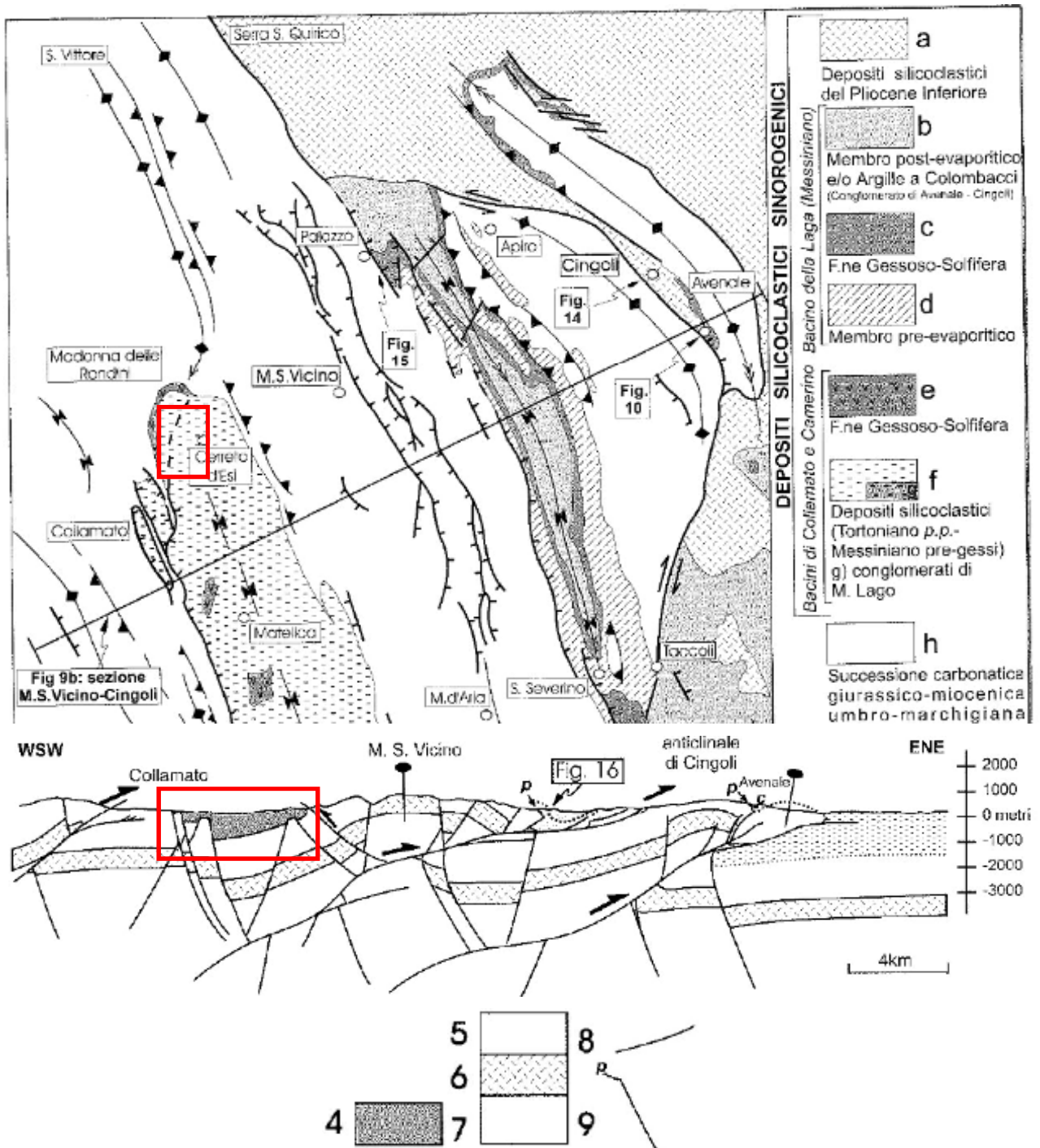


Figura 8. Sezione trasversale (in basso) del Bacino di Camerino in corrispondenza della galleria Serre (riquadro di colore rosso). Nella legenda: 4) Depositi silicoclastici tortoniano p.p. – messiniani del Bacino di Camerino; 5) Successione pelagica ed emipelagica (Lias medio – Miocene p.p.); 6) Calcare massiccio (Lias inf.); 7) Anidriti di Burano (Triassico superiore); 8) sovrascorrimento 9) faglia normale sinsedimentaria e relativa paleoscarpata (da Scisciani et al., 2000)

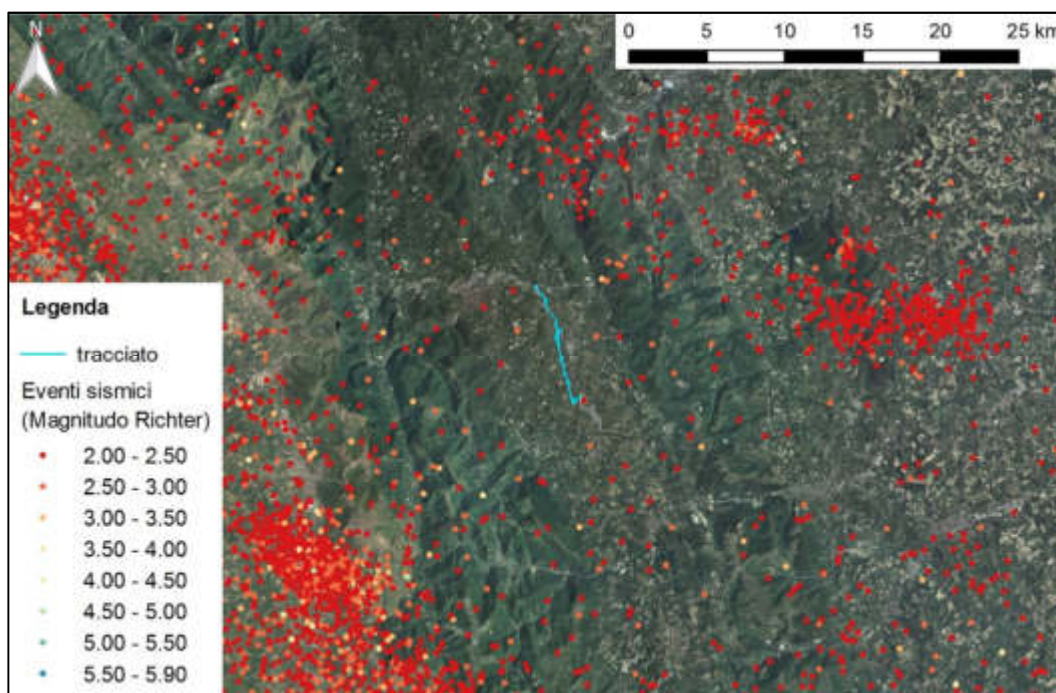


Figura 9. Distribuzione dei sismi nella zona prossima all'area in esame. Il tracciato del 1° stralcio funzionale della PdM è rappresentato con linea celeste.

### 5.3. Possibile presenza di metano lungo il tracciato

Misure strumentali, per stabilire presumibili emissioni di metano dalle formazioni dell'area di interesse, sono state eseguite durante la perforazione dei sondaggi geognostici realizzati lungo il tracciato nel 2015 (cfr. elaborato [1.5]):

- a boccaforo, con esplosimetro manuale, nel corso della perforazione (sondaggi A1, A2, A3, A4, A7 e da GT1bis a GT4bis);
- con la tecnica “Gas Trap” (sondaggi GT1, GT2, GT3 e GT4).

Inoltre, informazioni utili per la classificazione sono state desunte dai risultati del monitoraggio a boccaforo dei sondaggi presenti lungo il tracciato delle gallerie del 2° (Croce di Calle e Mistranello, cfr. elaborato [2.2]) e del 3° e 4° stralcio funzionale (cfr. elaborato [2.3]), che interessano le stesse formazioni.

In generale, le concentrazioni misurate con esplosimetro manuale a boccaforo e con la “Gas Trap” permettono di esprimere valutazioni qualitative sulla presenza di metano, poiché le modalità di indagine adottate non consentono di caratterizzare quantitativamente i flussi di metano.

#### 5.3.1. Misure alla boccaforo dei sondaggi

Le misure di emissioni di metano sono state condotte con esplosimetro manuale BW Gas Alert Micro 5, dotato di sensori per rilevare le concentrazioni di O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CO e CH<sub>4</sub>. La concentrazione di CH<sub>4</sub> è espressa come percentuale del “Limite inferiore di esplosività” (LEL), pari al 5% in volume. Le modalità di misura sono descritte nell'elaborato [2.1].

È stato rilevato metano a boccaforo nei sondaggi GT1bis, A2, GT2bis, GT3bis, A3 e GT4bis, procedendo da Nord verso Sud (Figura 10), a partire da una profondità di 21 m s.p.c. (sondaggio GT1bis, Tabella 3) ed anche a foro aperto (sondaggi A2, GT1bis e GT2bis).

Tabella 3. Profondità del foro in cui si registrano le emissioni di metano a boccaforo nei sondaggi lungo il tracciato della galleria Serre

Sondaggio	Lunghezza (m)	Profondità del foro in cui iniziano le emissioni (m s.p.c.)	Profondità del foro delle principali emissioni (m s.p.c.)	Campo di variabilità dei valori di concentrazione misurati	Emissioni a foro aperto
A1	65	\	\	\	NO
A2	65	64,0	64,0 / 65,0	5% LEL	SI
A3	64	62,0	62,0 / 63,0 / 64,0	(1 ÷ 10) % LEL	NO
A4	90	\	\	\	NO
A7	60	\	\	\	NO
GT1bis	42	21,0	21,0 ÷ 26,0 / 36,0 / 60,0	(3 ÷ 12) % LEL	SI
GT2bis	58	36,0	36,0 / 37,0 / 43,0 / 52,0	(4 ÷ 12) % LEL	SI
GT3bis	72	43,0	43,0 / 46,0 / 55,0 / 72,0	(5 ÷ 40) % LEL	NO
GT4bis	52	24,0	24,0	3% LEL	NO

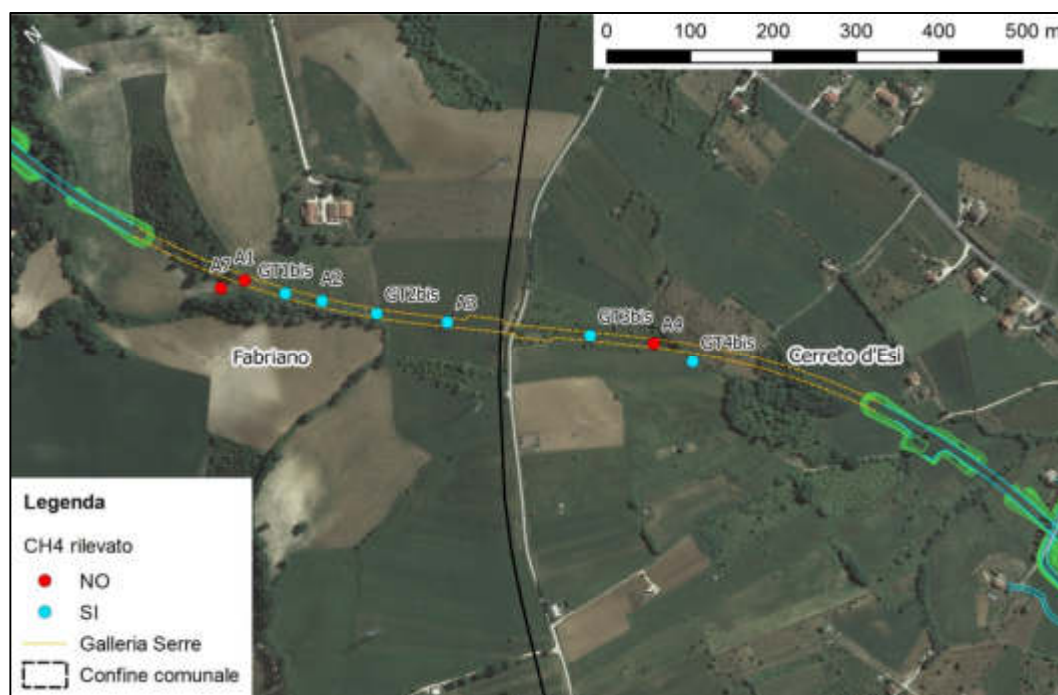


Figura 10. Sondaggi della campagna 2015, in cui si sono effettuati rilievi di metano a boccaforo, durante la perforazione: sono contrassegnati i sondaggi in cui si è rilevata presenza di metano

Le emissioni hanno interessato lo Schlier (sondaggi GT1bis e A2), a partire dal contatto con l'unità del Tripoli (GT1bis), e il Camerino, litofacies pelitico-arenacea (sondaggi GT2bis, GT3bis, A3 e GT4bis). Dall'analisi delle stratigrafie dei sondaggi, gli strati arenacei appaiono spesso intensamente fratturati (Figura 11).

In generale, non si può escludere la presenza di metano alla quota della galleria, dato che si sono avute emissioni anche alla quota della livelletta (Figura 12).



Figura 11. Foto del sondaggio SN2106: livello arenaceo intensamente fratturato a profondità compresa tra 25,0 e 29,0 m s.p.c.

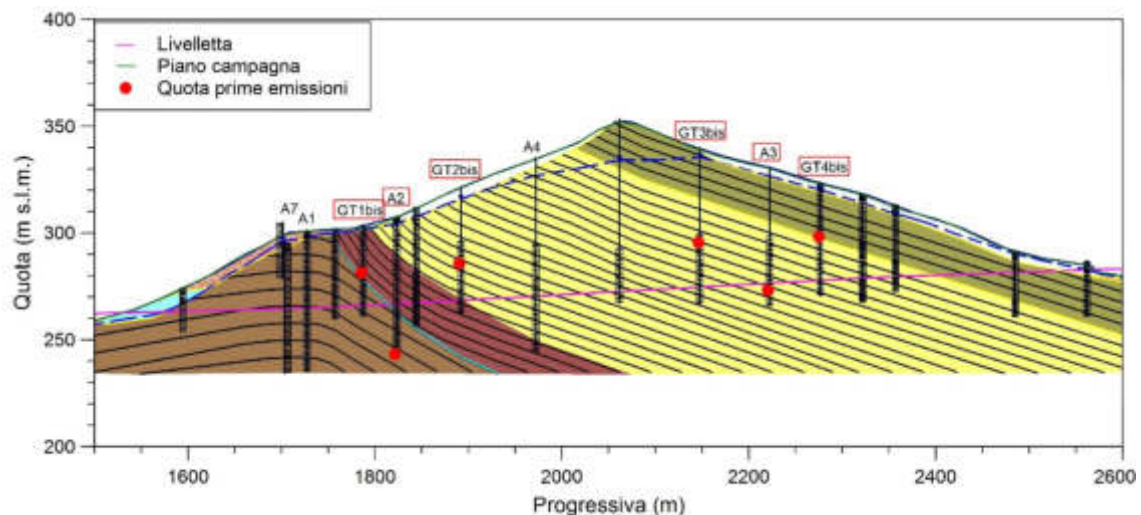


Figura 12. Confronto tra la quota della livelletta della galleria (linea magenta) e la profondità delle prime emissioni di metano registrate nei sondaggi (contrassegnati con rettangolo rosso) posti lungo il tracciato della galleria Serre, dove si è identificato la presenza di metano nei rilievi a boccaforo, in fase di perforazione. La linea tratteggiata blu indica il livello piezometrico.

### 5.3.2. Misure con “Gas Trap”

La campagna di indagini con la tecnica della “Gas Trap” è stata condotta a luglio 2015. Sono stati monitorati 4 sondaggi (GT1, GT2, GT3 e GT4, procedendo da Nord verso Sud, Figura 13), la cui ubicazione è stata scelta basandosi sull'analisi dei dati ottenuti in fase preliminare.

Tenori di metano non trascurabili sono stati rilevati nei sondaggi GT1 e GT2. Nel GT3 e nel GT4 le concentrazioni sono risultate inferiori al limite di sensibilità della strumentazione (cfr. elaborato

[1.6]), a fronte di valori non nulli di concentrazione nei rilievi, a boccaforo, durante la perforazione dei limitrofi sondaggi GT3bis e GT4bis (Figura 12). Nel sondaggio GT3bis si è raggiunto un valore massimo pari a 40% LEL (corrispondente ad una concentrazione volumetrica del 2%).

Nel sondaggio GT1, che intercetta lo Schlier ed il Tripoli, sono state registrate emissioni significative a partire da una profondità di circa 35 m s.p.c., in corrispondenza del contatto tra le due formazioni. Le emissioni interessano lo Schlier, raggiungendo un valore massimo pari a 0,25% in volume ad una profondità di circa 45 m s.p.c.

Nel GT2, che interessa prevalentemente il Camerino e, nella porzione terminale, il Tripoli (cfr. stratigrafia del limitrofo sondaggio GT2bis), oltre i 40 m s.p.c. la presenza di un mezzo fratturato, in concomitanza con il passaggio dal Camerino alla sottostante Tripoli, alla quota della galleria, mette in evidenza la presenza di metano con valori massimi di concentrazione pari a 0,3% in volume.

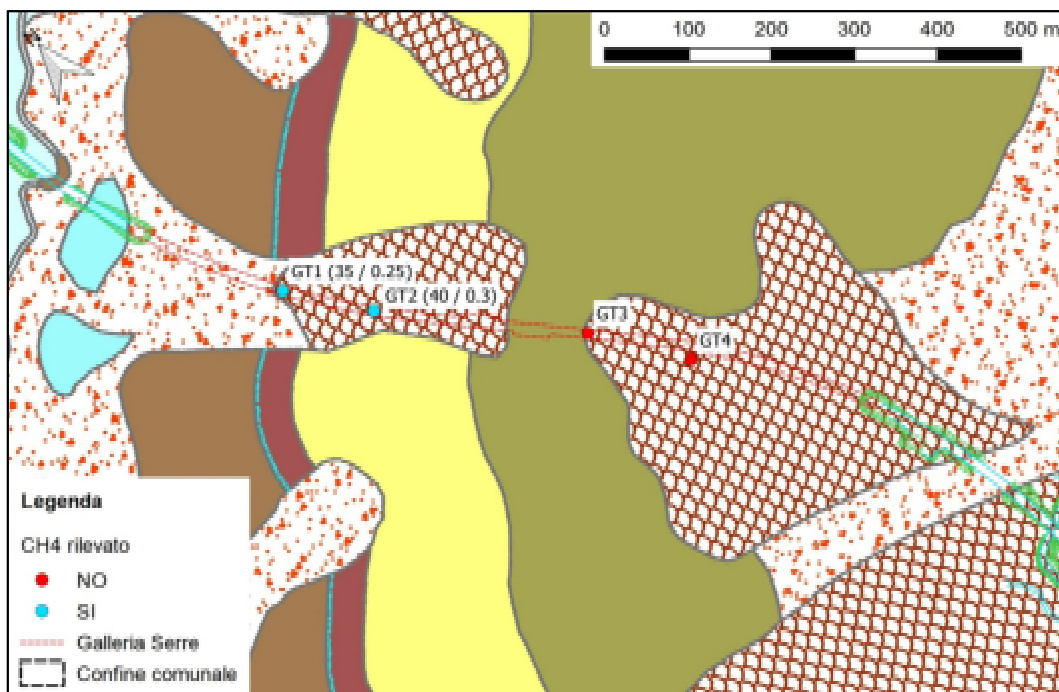


Figura 13. Ubicazione dei sondaggi a distruzione di nucleo monitorati con la metodologia della "Gas Trap". Sono indicati la profondità della misura ed il valore massimo di concentrazione rilevata (etichette: m da p.c. / max CH<sub>4</sub>%vol).

## 6. Classificazione ante operam della galleria

Considerando che:

- l'assetto strutturale profondo dell'area indica la presenza di faglie e dislocazioni tettoniche che non permettono di escludere collegamenti idraulici tra il Bacino di Camerino (formazioni di Camerino e dello Schlier) e le formazioni profonde, da cui può fluire metano, favorendone la risalita verso gli strati superficiali fratturati;
- in corrispondenza del contatto tra lo Schlier ed il Tripoli è presente una faglia normale e l'assetto geostrutturale dello Schlier è caratterizzato da una piega anticlinale;
- lungo il tracciato della PdM (primo e secondo stralcio funzionale) è stata riscontrata la presenza,

più o meno evidente, di gas in tutte le formazioni (Schlier, Tripoli, Camerino) attraversate dal tracciato della Serre;

- permangono emissioni di metano, talora in concentrazioni superiori al limite inferiore di esplosività e, in alcuni sondaggi, già a partire dalla quota della livelletta della galleria;
- con buona probabilità, le manifestazioni di metano riscontrate a boccaforo e nei rilievi in foro sono associabili a strati arenacei fratturati, a più elevata permeabilità,

il Tecnico Specialista ha considerato coerenti con le approfondite indagini effettuate due distinti tratti del tracciato della Serre (Figura 14), a ciascuno dei quali ha attribuito un diverso indice di classifica:

- **Classe 2** nel tratto compreso tra la pk 1+570,90 (imbocco Nord) e la pk 1+940,00 circa;
- **Classe 1c** nel tratto compreso tra la pk 1+940,00 circa e la pk 2+512,00 (imbocco Sud).

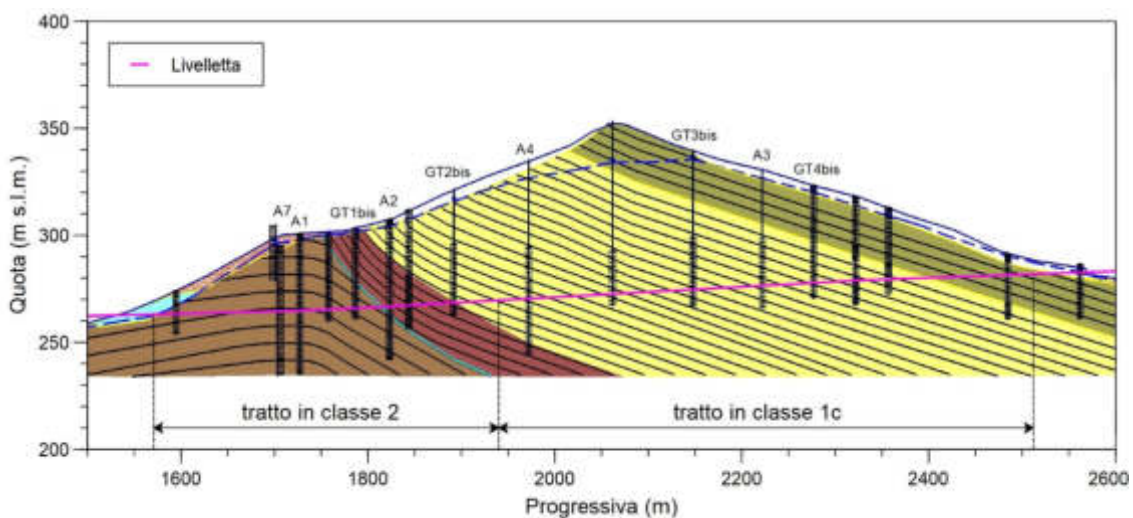


Figura 14. Classifica tecnica della Serre ante operam

## 7. Dati acquisiti in corso d'opera

Lo scavo della Serre è stato completato il 20 giugno u.s..

In corso d'opera, il Responsabile del Monitoraggio, con il supporto dei relativi Addetti, ha monitorato con continuità le concentrazioni di metano:

- nell'atmosfera del sotterraneo, manualmente e con il sistema di monitoraggio automatico e continuo;
- nell'acqua che fluisce in galleria;
- nelle discontinuità e fratture sul fronte e sulle pareti all'intorno del fronte;
- nei fori per i consolidamenti;
- a boccaforo dei sondaggi geognostici a cielo aperto.

I paragrafi seguenti riguardano:

- l'esito dei rilievi geostrutturali del fronte;

- le informazioni ottenute dall'analisi dei carotaggi eseguiti lungo il tracciato ed al fronte;
- i risultati del monitoraggio (manuale ed in continuo) per la ricerca di metano.

## 7.1. Rilievo geostrutturale del fronte di scavo

Il Progetto Esecutivo prevedeva l'attraversamento delle formazioni (cfr. elaborato [1.7]):

- Schlier dall'imbocco Nord fino alla pk 1+812;
- Tripoli da pk 1+812 a 1+890;
- Camerino dalla pk 1+890 fino all'imbocco Sud.

I rilievi geostrutturali eseguiti ad ogni campo di avanzamento del fronte (cfr. elaborato [2.7]) confermano le previsioni sulla litologia dei due cantieri. **Per quanto riguarda l'assetto geostrutturale, l'avanzamento del fronte ha messo in luce la presenza, tra la pk 1+920 e la pk 2+070, di un sistema di lineazioni di frattura in regime transpressivo non presente negli elaborati del Progetto Esecutivo, non evidenziato dalla letteratura scientifica sulle geostrutture dell'area e non individuabile con indagini di superficie per la presenza delle coltri di ricoprimento.**

### 7.1.1. Cantiere imbocco Nord

Nel tratto prossimo all'imbocco Nord la galleria attraversa lo Schlier, formazione costituita da alternanze di marne, marne siltose calcaree e argillose, a volte arenacee, e da calcari marnosi. A partire dall'imbocco, gli strati di marna argilloso – siltosa, che interessano la porzione superiore del fronte, cedono il passo, man mano che si procede con l'avanzamento, agli strati litoidi (calcarei ed arenacei, Figura 15). Nel tratto di galleria che interessa lo Schlier l'ammasso è caratterizzato da pieghe, discontinuità di strato con varie orientazioni, fratture con inclinazione compresa tra 35° ed 80° e spaziatura decimetrica (Figura 16). I rilievi geostrutturali del fronte confermano l'andamento anticlinale dello Schlier ed il passaggio tettonico alla formazione del Tripoli (Figura 17), tra la pk 1+757 e la pk 1+816, previsti dal Progetto Esecutivo (cfr. elaborati [1.7] e [2.1]).

Tra la pk 1+870 e la pk 1+890 si osserva il passaggio dal Tripoli al Camerino (Figura 18). Nel tratto successivo fino alla pk 2+102 (progressiva di fine scavo) l'ammasso è caratterizzato dalla presenza di strati centimetrici di arenarie fini alternati a strati di argille marnose ed arenarie pelitiche, suborizzontali (Figura 19).

Dalla pk 1+920 alla pk 2+070 i rilievi al fronte mostrano la presenza di materiale molto fratturato, tettonizzato, con famiglie di discontinuità aventi inclinazione compresa tra 40° ed 85° e spaziatura decimetrica (K2 e K3, Figura 19). La geometria dei sistemi di frattura individuati indica un regime tensionale di tipo transpressivo. La porzione di materiale tettonizzato, lungo il tracciato, si sposta dal paramento di destra (pk 1+936) verso l'asse della galleria (pk 1+950), per proseguire verso il paramento di sinistra nel tratto successivo (da pk 1+969 a pk 2+052). Il sistema di lineazioni di frattura in regime transpressivo rilevato durante lo scavo della galleria non era collocabile lungo il tracciato a partire dalle informazioni disponibili ante operam.

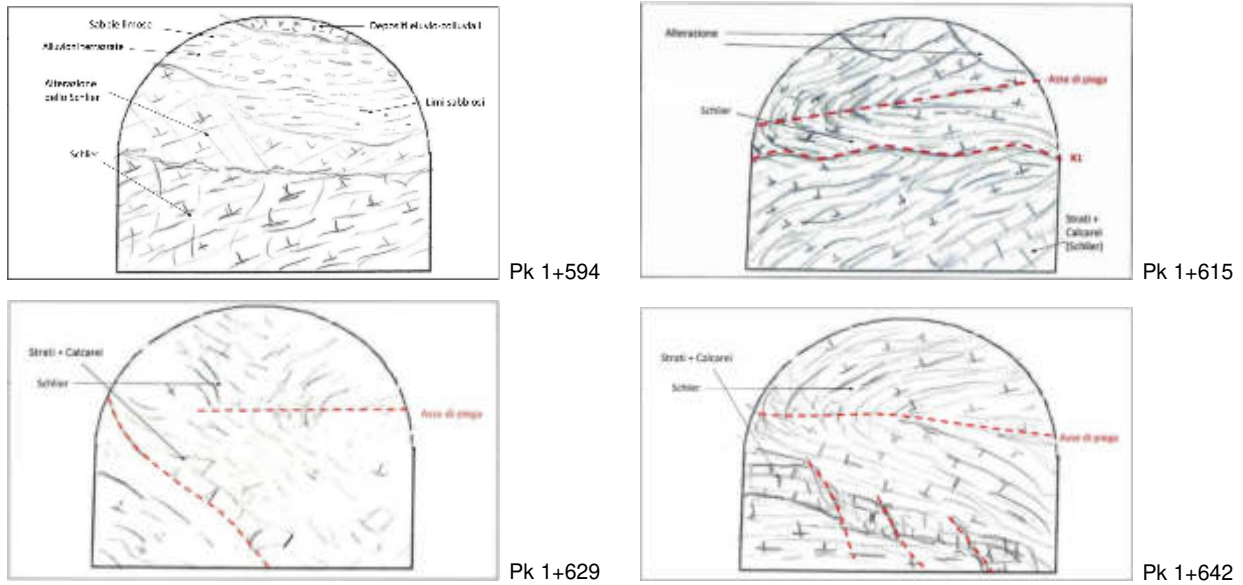


Figura 15. Rilievi geologico strutturali al fronte nel primo tratto di galleria in prossimità dell'imbocco Nord, che interessa la formazione dello Schlier. Rappresentazione pittorica delle litologie e delle discontinuità strutturali

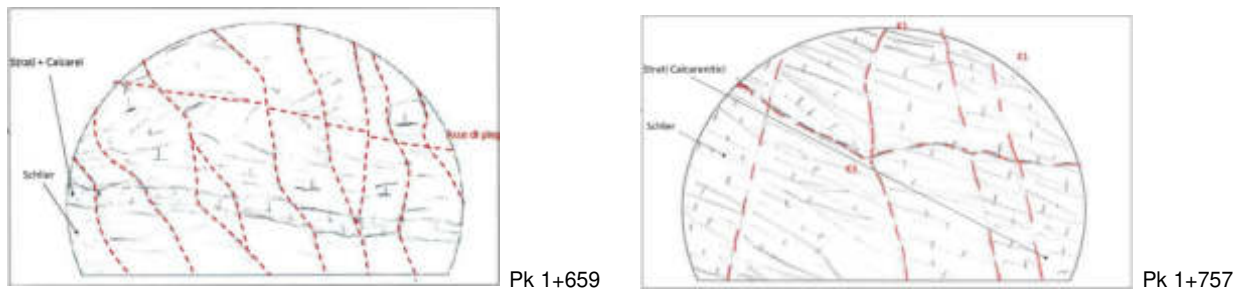


Figura 16. Rilievi geologico strutturali al fronte in corrispondenza dello Schlier, dove sono evidenti le discontinuità. Rappresentazione pittorica delle litologie e delle discontinuità strutturali

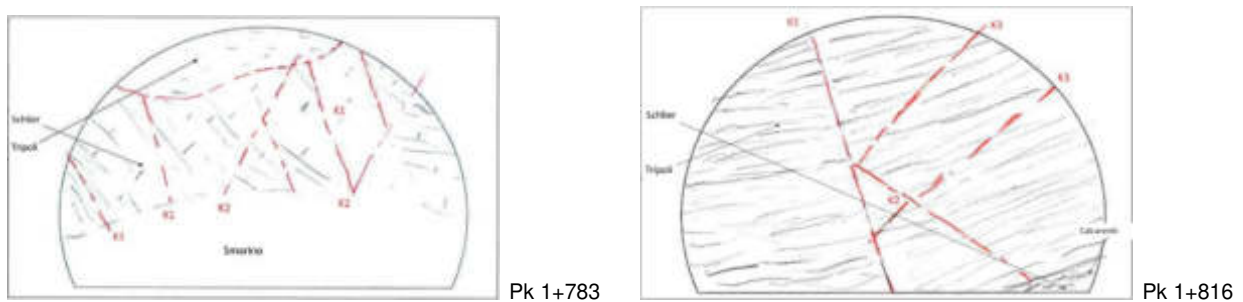


Figura 17. Rilievi geologico strutturali al fronte in corrispondenza del passaggio tettonico tra lo Schlier (calcareniti, in alto nel rilievo a pk 1+783 ed in basso a destra nel rilievo a pk 1+816) ed il Tripoli. Rappresentazione pittorica delle litologie e delle discontinuità strutturali



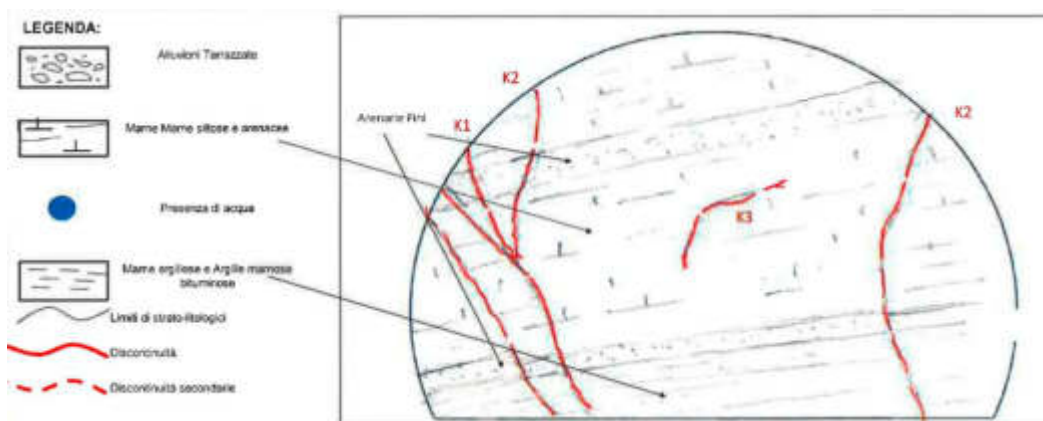


Figura 18. Rilievo geologico strutturale del fronte alla pk 1+870, in corrispondenza del passaggio dal Tripoli (marne argillose e argille marnose bituminose in figura) al Camerino. Rappresentazione pittorica delle litologie e delle discontinuità strutturali

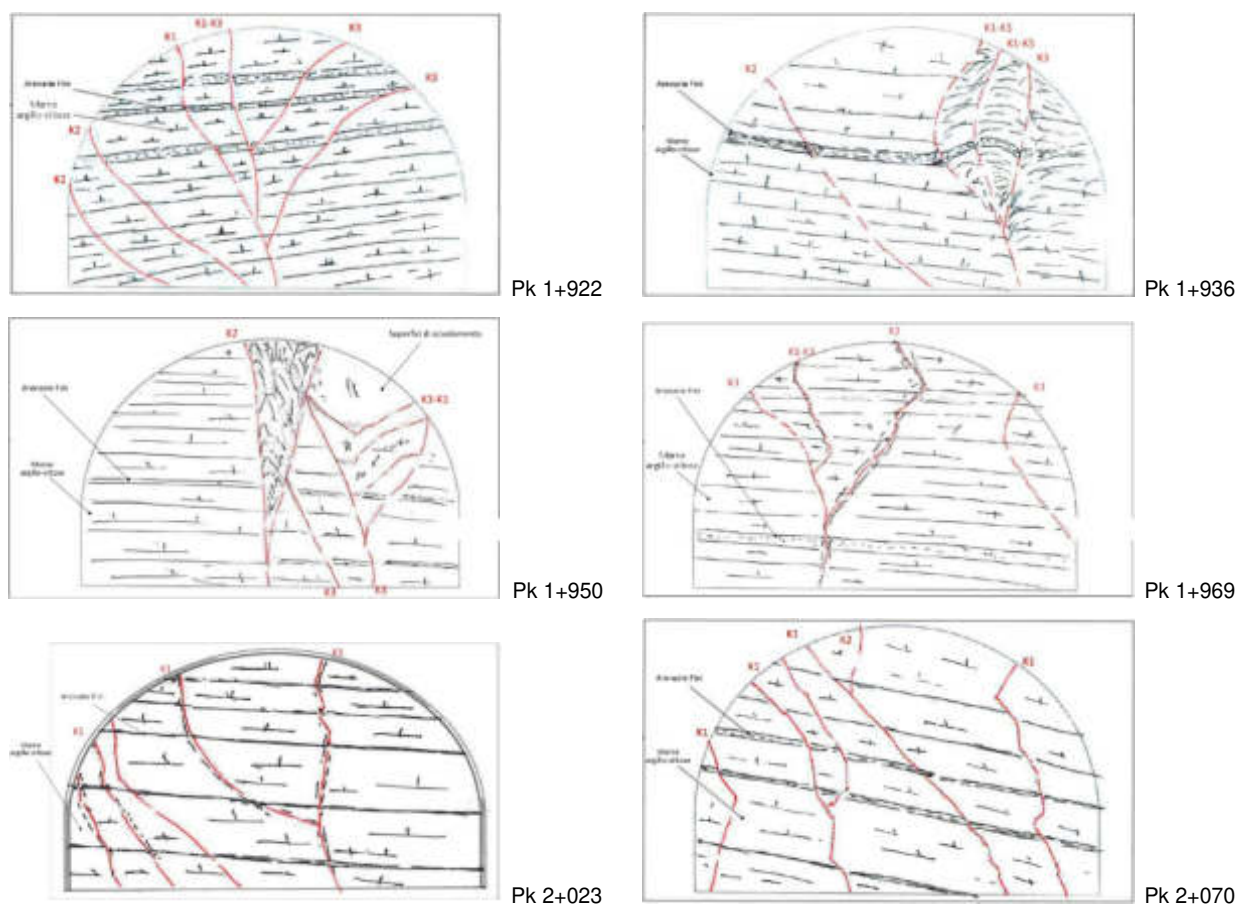


Figura 19. Rilievi geologici strutturali al fronte in cui è riconoscibile il sistema di lineazioni di frattura in regime transpressivo. Rappresentazione pittorica delle litologie e delle discontinuità strutturali

Nella classifica tecnica il Tecnico Specialista aveva posto cautelativamente, ante operam, la progressiva di cambio classe a pk 1+940 anziché a pk 1+890, progressiva di passaggio dal Tripoli al Camerino, secondo la ricostruzione geologica di progetto, considerando, pertanto, una fascia di sicurezza di 50 m.

Sulla base delle evidenze emerse in corso d'opera, il tratto tettonizzato è stato scavato mantenendo cautelativamente gli apprestamenti previsti per la classe 2 (cantiere imbocco Nord), garantendo condizioni di massima sicurezza coerentemente con quanto previsto dalla Nota Tecnica.

### 7.1.2. Cantiere imbocco Sud

Lo scavo ha interessato il Camerino, costituito da marne argillo-siltose con presenza di strati pelitici (tra la pk 2+383 e la pk 2+346, Figura 20) ed arenaceo-pelitici (Figura 21), quest'ultimi a partire dalla pk 2+330, procedendo verso Nord. Sono riconoscibili talora discontinuità nell'ammasso (Figura 20 e Figura 21).

Nel corso degli scavi, tra le pk 2+215 e 2+186 (Figura 22), si è riscontrata una ristretta fascia tettonizzata che attraversa trasversalmente il fronte, con giacitura delle superfici di frattura pari a  $200^\circ \div 210^\circ/50^\circ \div 60^\circ$ .

Nel tratto successivo fino alla pk 2+094 (progressiva di fine scavo) l'ammasso, costituito da marne argillo-siltose con presenza di strati arenaceo-pelitici, suborizzontali, è caratterizzato da discontinuità con giacitura che si mantiene pari a  $200^\circ \div 210^\circ/50^\circ \div 70^\circ$  (Figura 23).

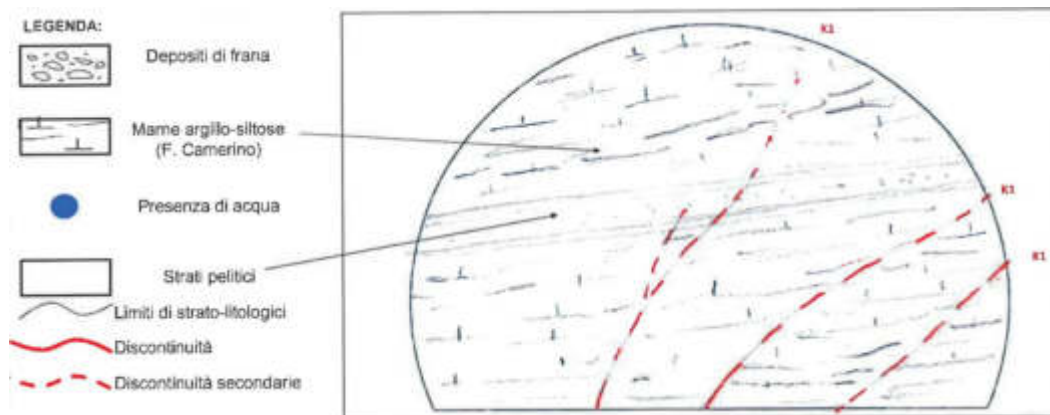


Figura 20. Rilievo geologico strutturale del fronte alla pk 2+346, dove è riconoscibile uno strato pelitico nel Camerino. Rappresentazione pittorica delle litologie e delle discontinuità strutturali

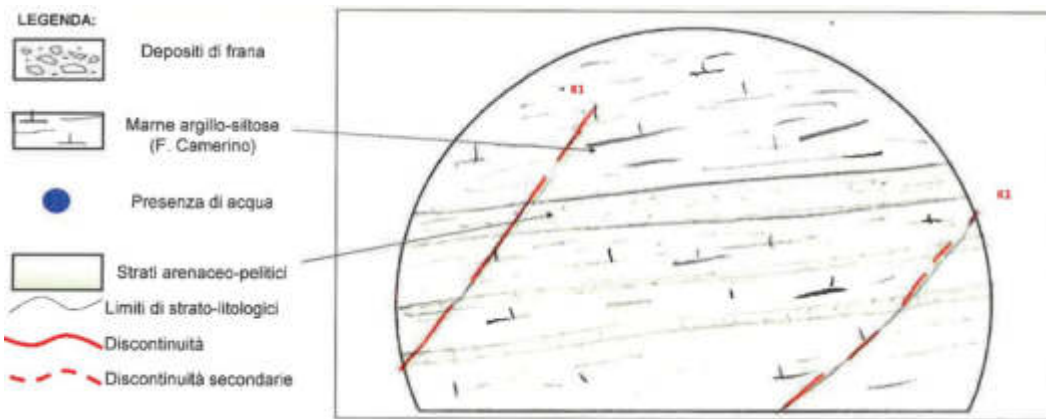


Figura 21. Rilievo geologico strutturale del fronte alla pk 2+330, dove sono riconoscibili strati arenaceo-pelitici nel Camerino. Rappresentazione pittorica delle litologie e delle discontinuità strutturali

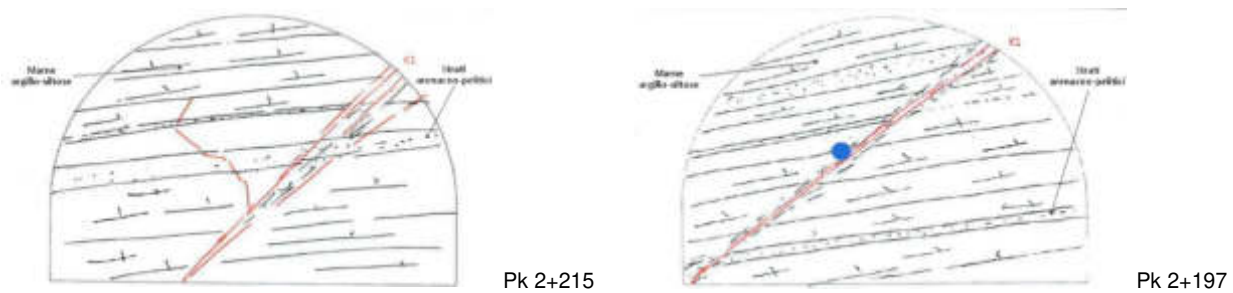


Figura 22. Rilievi geologico strutturali al fronte in corrispondenza della fascia tettonizzata. Rappresentazione pittorica delle litologie e delle discontinuità strutturali

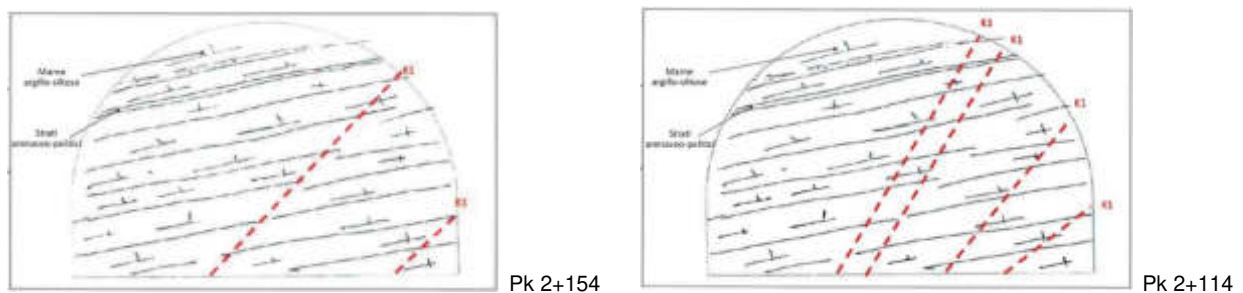


Figura 23. Rilievi geologico strutturali del fronte alla pk 2+154 e alla pk 2+114, dove sono riconoscibili strati arenaceo-pelitici nel Camerino e discontinuità aventi giacitura  $200^\circ \div 210^\circ/50^\circ \div 70^\circ$

## 7.2. Carotaggi lungo il tracciato ed al fronte di scavo

Lungo il tracciato sono state realizzate, per la progettazione esecutiva, indagini (sondaggi a carotaggio e “Gas trap”, Figura 24) per:

- caratterizzare sotto il profilo geomeccanico le formazioni Schlier, Tripoli e Camerino (litofacies pelitico-arenacea e pelitica);
- determinare l’assetto geostrutturale (stato di fratturazione, discontinuità principali, limiti stratigrafici, ecc.);
- individuare e caratterizzare emissioni di metano (“Gas trap” eseguite nei sondaggi GT1, GT2, GT3 e GT4).

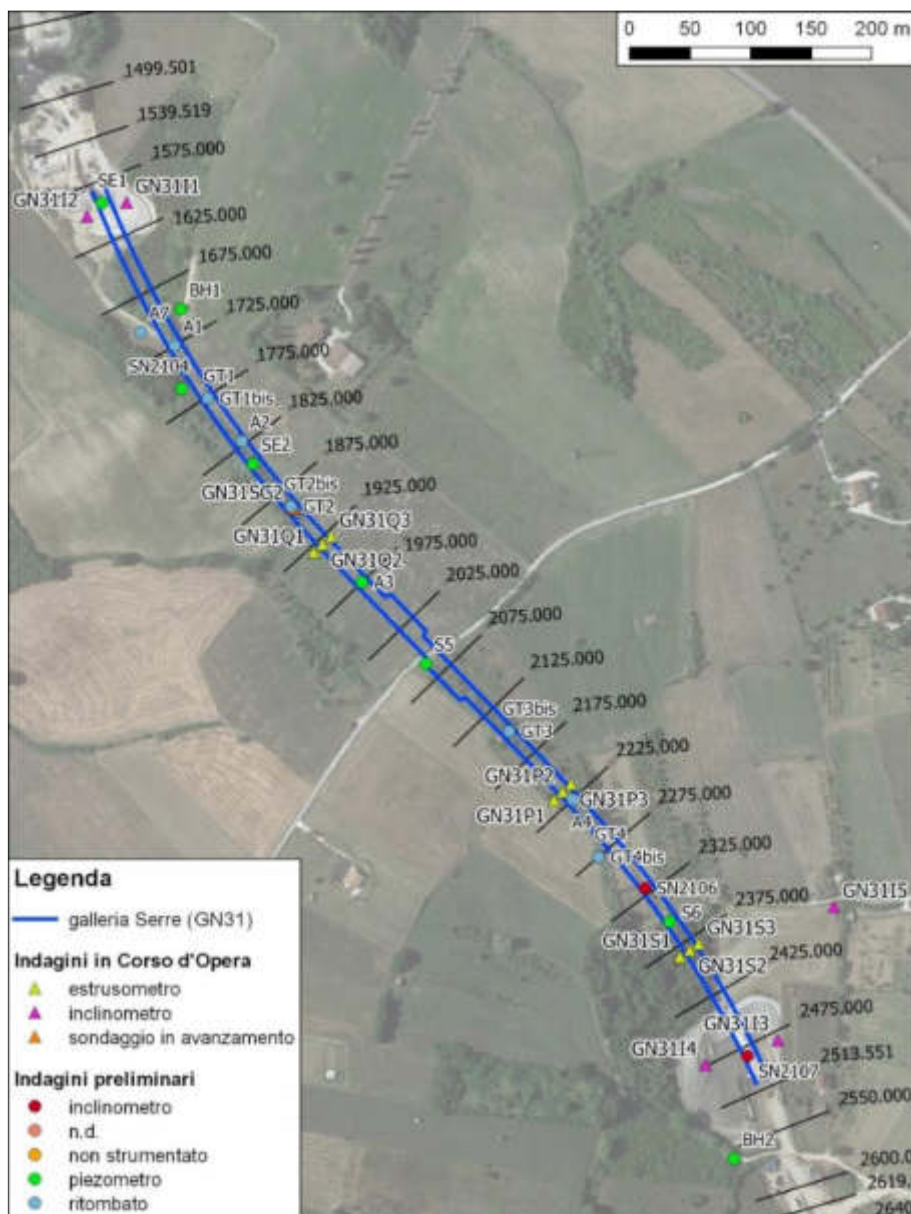


Figura 24. Indagini (preliminari ed in corso d’opera) eseguite lungo il tracciato della Serre

Durante la costruzione della Serre, sono stati realizzati (Figura 24):

- 2 sondaggi verticali, in corrispondenza dell'imbocco Nord della galleria;
- 4 sondaggi verticali, in corrispondenza della pk 1+930 (Figura 25);
- 2 sondaggi orizzontali al fronte, in corrispondenza della pk 1+891 (Figura 26), di lunghezza pari a 18 m (fino a pk 1+909);
- 4 sondaggi verticali, in corrispondenza della pk 2+215;
- 3 sondaggi verticali, in corrispondenza della pk 2+383;
- 1 sondaggio verticale, in corrispondenza della pk 2+400;
- 2 sondaggi verticali, in corrispondenza dell'imbocco Sud della galleria.

I sondaggi a carotaggio continuo (GN31Q1, GN31P1, GN31S3) hanno confermato il modello geomeccanico previsto dal Progetto Esecutivo (elaborati [1.1], [1.2] e [2.7]).

Negli inclinometri prossimi gli imbocchi della galleria ed alla pk 2+400 sono state eseguire misure a boccaforo della concentrazione di metano (paragrafi 7.3.1.1. e 7.3.2.1. )



Figura 25. Carote del sondaggio S1, tratto da 55 a 60 m. In basso lo spezzone di carota da 54 a 55,5 m

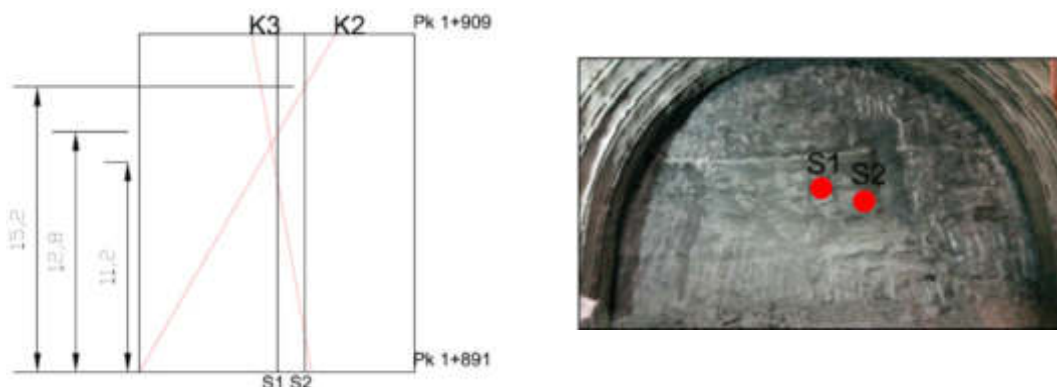


Figura 26. Ubicazione (planimetria sovrapposta alle famiglie di discontinuità identificate e foto del fronte di scavo) dei sondaggi a carotaggio eseguiti al fronte (pk 1+901), di lunghezza pari a 18 m. I sondaggi S1 ed S2 sono indicati in Figura 24, rispettivamente, con i codici GN31SG1 e GN31SG2.



Figura 27. Carote dei sondaggi S1 (a sinistra, tratto compreso tra 15 e 18 m, dal basso verso l'alto) ed S2 (a destra, tratto compreso tra 15 e 18 m, dal basso verso l'alto)

### 7.3. Monitoraggio in corso d'opera della miscela aria – metano

In conformità a quanto previsto dalla Nota Tecnica, il Responsabile del Monitoraggio ha progettato e realizzato il sistema di misure e controlli della composizione e dello stato fisico dell'atmosfera dei due tratti in Classe 2 ed in Classe 1c e la progettazione, realizzazione e controllo del circuito di ventilazione. Il monitoraggio è stato realizzato con:

- rilevamenti manuali, dagli Addetti al Monitoraggio;
- sistema automatico e continuo, costituito, per ognuna delle due Classi da (schemi in Figura 28 e Figura 29):
  - 6 sensori in classe 2 e 5 sensori in classe 1c, opportunamente disposti lungo la galleria;
  - una centralina di acquisizione e trasmissione dati (in galleria);
  - un computer per la registrazione e visualizzazione dei dati e degli allarmi (posto all'esterno della galleria).

In galleria sono state eseguite e registrate misure manuali delle concentrazioni di metano con esplosimetro:

- a boccaforo dei fori di sondaggio in cui sono stati installati inclinometri, a ridosso dei due imbocchi della Serre,
- nelle fasi di consolidamento, in foro (ad una profondità di circa 10 cm), a boccaforo ed a distanza di 20 cm e 50 cm all'esterno del foro (elaborato [2.4]);
- in ambiente, al fronte ed in calotta durante le fasi di consolidamento, scavo, smarino, posa in opera del rivestimento di prima fase, dell'impermeabilizzazione e del rivestimento definitivo (elaborato [2.5]);

e sono state registrate le concentrazioni di metano rilevate dai sensori del sistema di monitoraggio automatico in continuo (elaborato [2.6]).

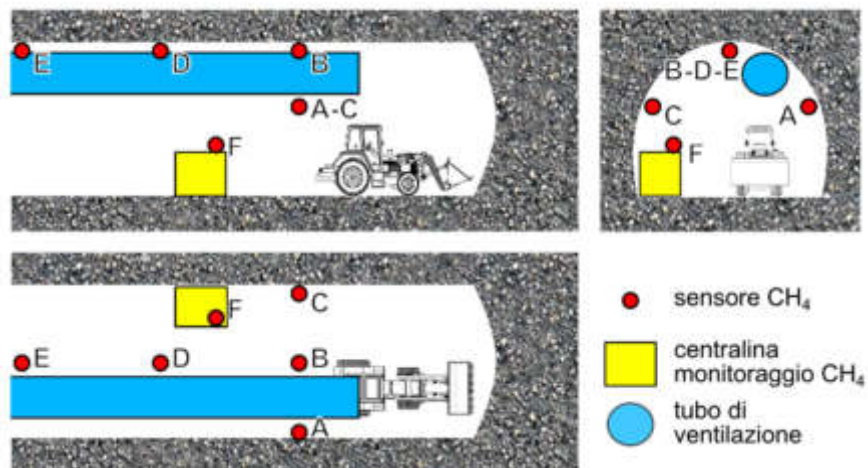


Figura 28. Schema semplificato del sistema di monitoraggio automatico in continuo in Classe 2

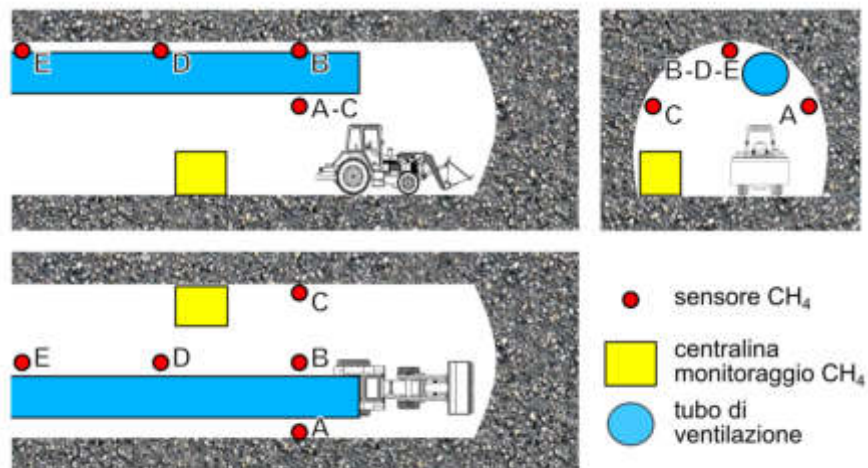


Figura 29. Schema semplificato del sistema di monitoraggio automatico in continuo in Classe 1c

### 7.3.1. Cantiere imbocco Nord

#### 7.3.1.1. Emissioni di metano rilevate a boccaforo dei sondaggi inclinometrici

A partire dal 14 giugno 2017 sono state eseguite misure periodiche di concentrazione di metano a boccaforo dei sondaggi GN3111 e GN3112, realizzati a ridosso dell'imbocco Nord della Serre (Figura 30). Sia gli inclinometri che i pozzetti di protezione non sono dotati di chiusura ermetica (Figura 31).

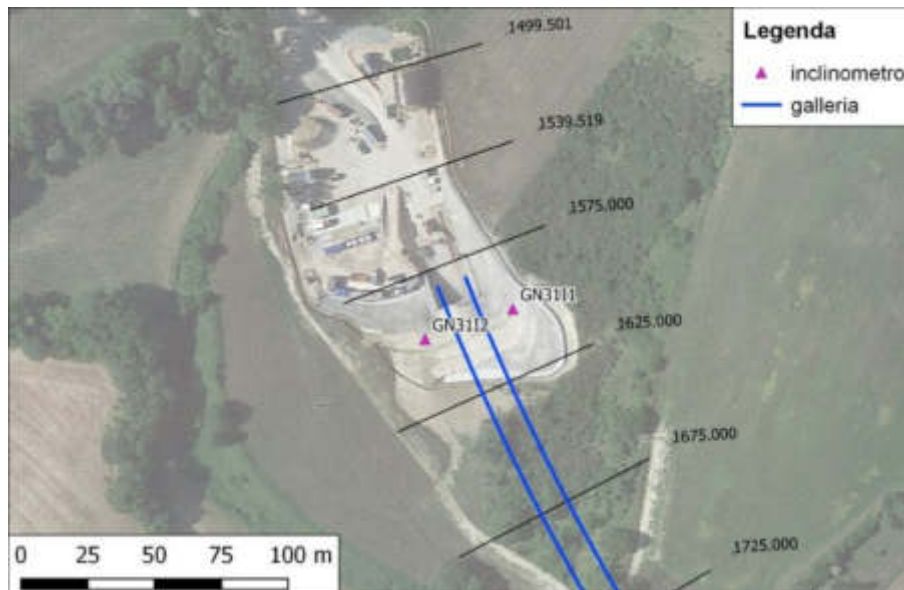


Figura 30. Planimetria dell'imbocco Nord della galleria Serre, con ubicazione dei due inclinometri GN3111 e GN3112



Figura 31. Inclinometri GN3111 (a sinistra) e GN3112 (a destra), realizzati in prossimità dell'imbocco Nord della galleria Serre



Le prime misure sull'inclinometro GN3112 (14, 20 e 25 giugno 2017) hanno rilevato concentrazioni di metano comprese tra 0,25% e 0,30%. Le misure successive non hanno rilevato concentrazioni di metano rilevabili (Figura 32).

Tabella 4. Emissioni di CH<sub>4</sub> rilevate a boccaforo dell'inclinometro GN3112

Codice	Data	Ora	CH <sub>4</sub> (%v/v)	Tappo	Pozzetto	Note
GN3112	14/06/17	16:30	0,30	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3112	20/06/17	16:00	0,25	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3112	25/06/17	11:30	0,30	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3112	28/06/17	10:00	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3112	01/07/17	15:15	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3112	07/07/17	09:15	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3112	11/07/17	15:30	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3112	14/07/17	16:30	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3112	18/07/17	22:00	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3112	03/08/17	12:10	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3112	11/08/17	12:10	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3112	23/08/17	06:10	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3112	04/09/17	08:15	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3112	13/09/17	01:15	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo

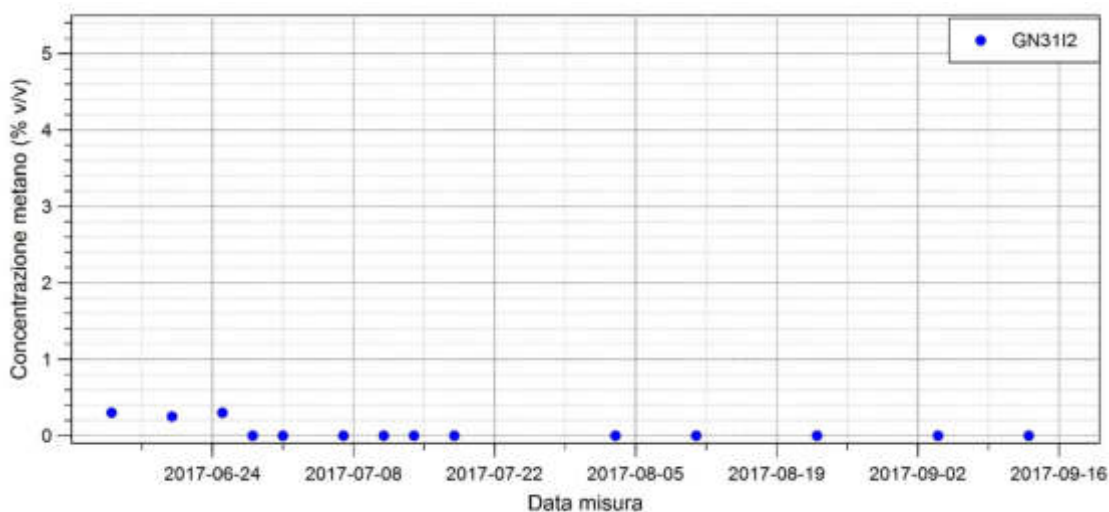


Figura 32. Emissioni di CH<sub>4</sub> misurate a boccaforo dell'inclinometro GN3112

Pur considerando che gli inclinometri non sono destinati al rilevamento di flussi di gas e che:

- la presenza del tubo inclinometrico “sigilla” le pareti del foro, limitando l’eventuale afflusso di gas al tratto di fondo foro;
- le misure delle concentrazioni di gas eseguite sono puntuali, manuali e non continue, e sono state eseguite senza sigillare il tubo inclinometrico a boccaforo,

ciononostante, le emissioni rilevate sono chiari indizi di possibili afflussi di metano nel cantiere sotterraneo, continui nel tempo e con portate che possono creare miscele potenzialmente esplosive in galleria.

### 7.3.1.2. Metano rilevato nei fori di consolidamento al fronte ed al contorno

I fori per i consolidamenti al fronte ed al contorno non sono destinati ad individuare flussi di metano. Ciononostante, i risultati delle misure eseguite nei fori di consolidamento (in tutti i fori e non a campione) sono importanti conferme delle ipotesi progettuali del Tecnico Specialista sui possibili flussi di metano verso il cantiere sotterraneo.

Le misure eseguite al fronte ed al contorno, nel corso delle perforazioni previste per le sezioni tipo B2V, B0V e B2, hanno rilevato emissioni di metano dai fori di consolidamento (Gli afflussi di metano rilevati sono riconducibili ad emissioni da strati profondi, che attraversano le discontinuità strutturali dell’ammasso, con modalità emissive tipiche della Classe 2.

Tabella 5 e Figura 33, cfr. elaborato [2.4]). Lungo lo stesso tratto di galleria erano stati registrati afflussi di metano anche a boccaforo dei sondaggi realizzati ante operam (cfr. paragrafo 5.3.1). Le concentrazioni misurate nei fori di consolidamento sono sensibilmente maggiori di quelle registrate nei sondaggi (Figura 33).

Gli afflussi di metano rilevati sono riconducibili ad emissioni da strati profondi, che attraversano le discontinuità strutturali dell’ammasso, con modalità emissive tipiche della Classe 2.

Tabella 5. Emissioni di metano rilevate nei fori di consolidamento al fronte ed al contorno nel cantiere imbocco Nord

Campo	Da pk	A pk	Data	Lavorazione	Pk misura	CH <sub>4</sub> (%v/v)	Punto di misura	Nota
1	1609	1623	08/06/17	Consolidamento (fronte)	1607	0,40	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 56. Fori di 18 m
			08/06/17	Consolidamento (fronte)	1607	1,10	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 58
			08/06/17	Consolidamento (fronte)	1607	0,90	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 58
			09/06/17	Consolidamento (fronte)	1607	0,50	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 53
			09/06/17	Consolidamento (fronte)	1607	0,80	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 77
			09/06/17	Consolidamento (fronte)	1607	0,40	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 77
			09/06/17	Consolidamento (fronte)	1607	0,15	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 78
			14/06/17	Consolidamento (fronte)	1607	0,60	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 30

Campo	Da pk	A pk	Data	Lavorazione	Pk misura	CH <sub>4</sub> (%v/v)	Punto di misura	Nota
			14/06/17	Consolidamento (fronte)	1607	0,30	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 31
2	1623	1637	02/07/17	Consolidamento (fronte)	1621	0,30	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 60
			02/07/17	Consolidamento (fronte)	1621	0,40	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 62
			02/07/17	Consolidamento (fronte)	1621	0,60	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 72
			02/07/17	Consolidamento (fronte)	1621	0,25	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 79
			03/07/17	Consolidamento (fronte)	1621	0,25	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 50
4	1651	1665	27/07/17	Consolidamento (contorno)	1651	1,85	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 26
			27/07/17	Consolidamento (contorno)	1651	0,35	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 26
11	1796	1809	23/11/17	Consolidamento (fronte)	1797	0,35	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 67
			23/11/17	Consolidamento (fronte)	1797	0,40	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 78
			24/11/17	Consolidamento (fronte)	1797	5,00	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 35
			24/11/17	Consolidamento (fronte)	1797	5,00	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 35
			24/11/17	Consolidamento (fronte)	1797	0,20	Fori di consolidamento, a 20 cm	Foro n. 35
			24/11/17	Consolidamento (fronte)	1797	0,15	Acqua	Misura speditiva su campioni di acqua, foro n° 36. L = 24 m
			24/11/17	Consolidamento (fronte)	1797	0,35	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 36
			25/11/17	Consolidamento (fronte)	1797	5,00	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 9
			25/11/17	Consolidamento (fronte)	1797	1,60	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 9
			25/11/17	Consolidamento (fronte)	1797	0,30	Fori di consolidamento, a 20 cm	Foro n. 9
			25/11/17	Consolidamento (fronte)	1797	1,60	Acqua	Misura speditiva su campioni di acqua, foro n° 9. L = 24 m
			25/11/17	Consolidamento (fronte)	1797	0,55	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 12
			25/11/17	Consolidamento (fronte)	1797	5,00	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 13
			25/11/17	Consolidamento (fronte)	1797	0,55	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 13
26/11/17	Consolidamento (fronte)	1797	0,45	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 58			

Campo	Da pk	A pk	Data	Lavorazione	Pk misura	CH <sub>4</sub> (%v/v)	Punto di misura	Nota
			26/11/17	Consolidamento (fronte)	1797	0,95	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 61
12	1809	1824	10/12/17	Consolidamento (fronte)	1809	1,00	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 34
			10/12/17	Consolidamento (fronte)	1809	0,70	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 34
			10/12/17	Consolidamento (fronte)	1809	0,35	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 35
13	1824	1842	05/01/17	Consolidamento (fronte)	1824	0,30	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 4
			05/01/17	Consolidamento (fronte)	1824	0,20	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 4
			05/01/17	Consolidamento (fronte)	1824	0,50	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 5
			05/01/17	Consolidamento (fronte)	1824	0,30	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 5
14	1842	1858	15/01/18	Consolidamento (fronte)	1842	2,90	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 1
			15/01/18	Consolidamento (fronte)	1842	0,30	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 1
15	1858	1876	25/01/18	Consolidamento (fronte)	1858	3,00	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 1
			25/01/18	Consolidamento (fronte)	1858	1,00	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 1
			25/01/18	Consolidamento (fronte)	1858	5,00	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 7
			25/01/18	Consolidamento (fronte)	1858	3,50	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 7
			25/01/18	Consolidamento (fronte)	1858	0,20	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 26
			26/01/18	Consolidamento (fronte)	1858	1,00	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 35
			26/01/18	Consolidamento (fronte)	1858	0,20	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 35
20	1937	1955	08/04/18	Consolidamento (fronte)	1938	1,50	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. *
			08/04/18	Consolidamento (fronte)	1938	0,55	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. *
			08/04/18	Consolidamento (fronte)	1938	0,70	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 2
			08/04/18	Consolidamento (fronte)	1938	0,30	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 2
			08/04/18	Consolidamento (fronte)	1938	0,50	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 17
			08/04/18	Consolidamento (fronte)	1938	0,20	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 17
			08/04/18	Consolidamento (fronte)	1938	0,30	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 42

Campo	Da pk	A pk	Data	Lavorazione	Pk misura	CH <sub>4</sub> (%v/v)	Punto di misura	Nota
			07/04/18	Consolidamento (fronte)	1938	0,40	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 15
			07/04/18	Consolidamento (fronte)	1938	0,10	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 15
			07/04/18	Consolidamento (fronte)	1938	0,60	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 14
			07/04/18	Consolidamento (fronte)	1938	0,20	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 14
			07/04/18	Consolidamento (fronte)	1938	0,10	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 37
21	1955	1973	20/04/18	Consolidamento (fronte)	1955	0,65	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 39
			20/04/18	Consolidamento (fronte)	1955	0,15	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 39
22	1973	1991	15/05/18	Consolidamento (fronte)	1973	0,35	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 17
			15/05/18	Consolidamento (fronte)	1973	0,40	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 19
			15/05/18	Consolidamento (fronte)	1973	0,70	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 21
			15/05/18	Consolidamento (fronte)	1973	0,45	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 21
			15/05/18	Consolidamento (fronte)	1973	0,40	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 29
			15/05/18	Consolidamento (fronte)	1973	0,65	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 31
			15/05/18	Consolidamento (fronte)	1973	0,30	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 31
			15/05/18	Consolidamento (fronte)	1973	0,40	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 42
23	1991	1996	28/05/18	Consolidamento (fronte)	1989	1,80	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 23
			28/05/18	Consolidamento (fronte)	1989	0,70	Fori di consolidamento, a boccaforo	Foro n. 23

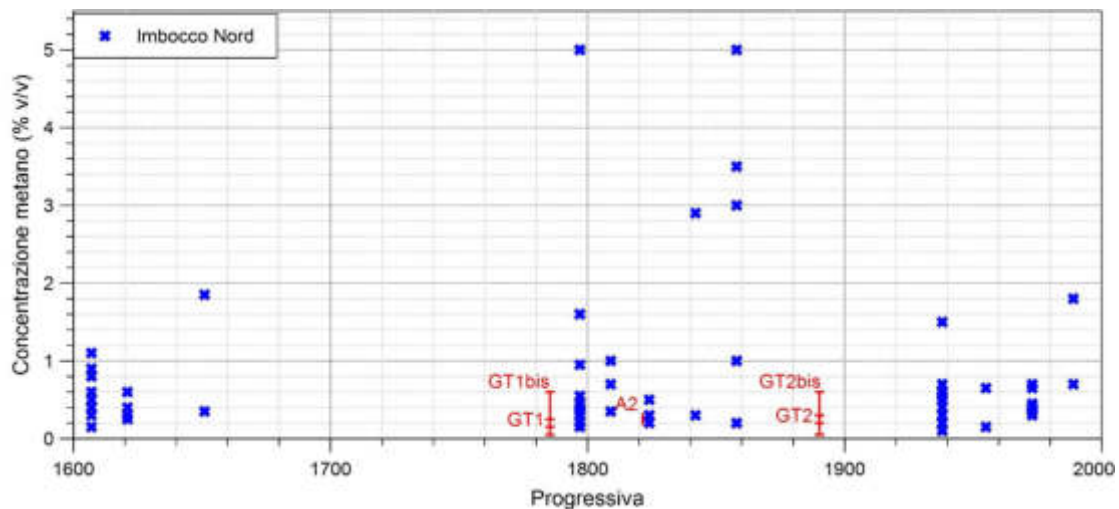


Figura 33. Emissioni di metano rilevate nei fori di consolidamento al fronte nel cantiere imbocco Nord. Sono rappresentati (con linea rossa) gli intervalli di valori di concentrazione registrati nei rilievi a boccaforo dei sondaggi ante operam.

### 7.3.1.3. Miscele aria – metano rilevate nella galleria

I controlli in atmosfera con esplosimetri manuali, eseguiti dagli Addetti al Monitoraggio e dal Responsabile del Monitoraggio, non hanno riscontrato presenza significativa di miscele aria – metano.

Viceversa, il sistema di monitoraggio automatico e continuo ha registrato afflussi continui, con valori massimi di concentrazione di metano pari a circa 0,15% in volume (cfr. elaborato [2.6]), indicativi della presenza di miscele grisutose nel cantiere.

Concentrazioni di miscela aria – metano sono state rilevate con continuità nell'intero periodo di registrazione (Figura 34 e Figura 35).

Le concentrazioni misurate risultano maggiori durante le operazioni di scavo, inferiori durante le operazioni di perforazione per i consolidamenti al fronte.

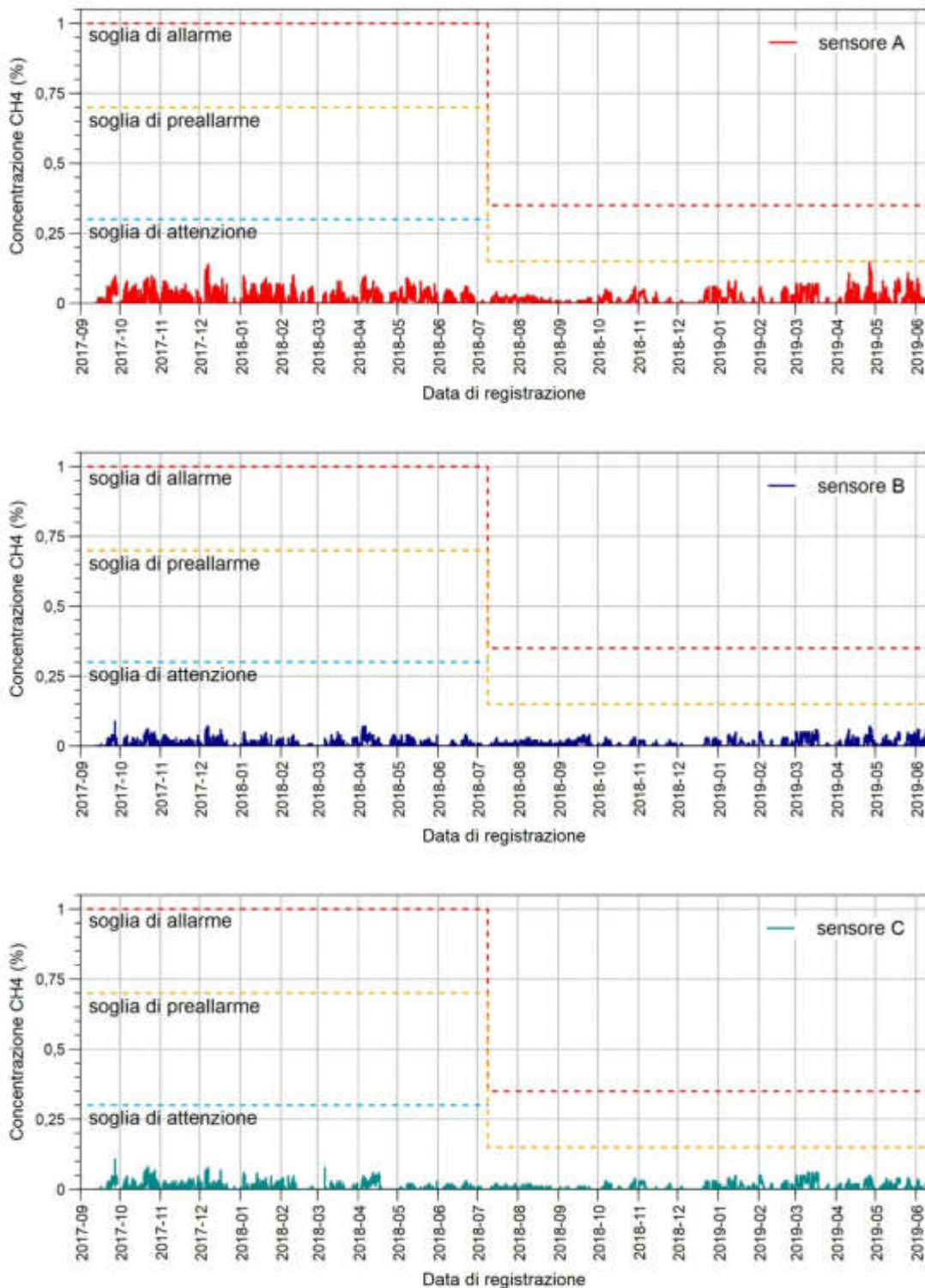


Figura 34. Concentrazioni massime di metano rilevate ogni 10 minuti dai sensori A, B e C del sistema automatico del cantiere imbocco Nord della Serre (Figura 28). Le concentrazioni rilevate in seguito ad interventi di taratura, spostamento o deriva dei sensori sono state filtrate nella rappresentazione.

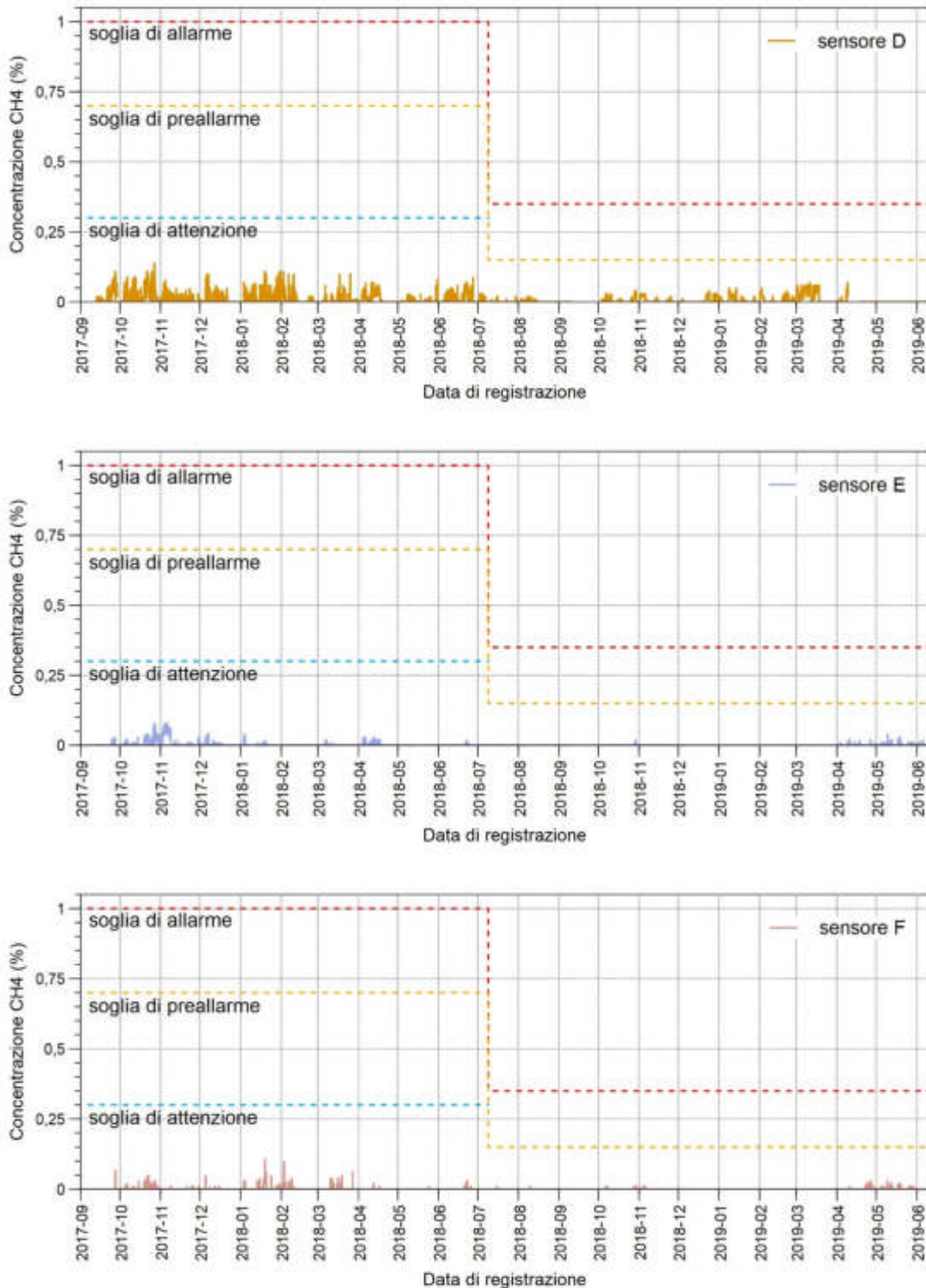


Figura 35. Concentrazioni massime di metano rilevate ogni 10 minuti dai sensori D, E ed F del sistema automatico nel cantiere imbocco Nord della Serre (Figura 28). Le concentrazioni rilevate in seguito ad interventi di taratura, spostamento o deriva dei sensori sono state filtrati nella rappresentazione.



L'influenza della ventilazione sulla diluizione delle miscele aria – metano, fino a concentrazioni tali da consentire il proseguimento delle lavorazioni in condizioni di massima sicurezza, è confermata dalle misure di concentrazione registrate dal sistema di monitoraggio automatico e continuo nei seguenti periodi di chiusura del cantiere:

- 1 ÷ 4 marzo 2018: chiusura a causa di un'intensa nevicata (progressiva fronte 1+905 circa);
- 28 marzo ÷ 2 aprile 2018: chiusura per festività pasquali (progressiva fronte 1+929 circa);
- 27 ÷ 30 aprile 2018: chiusura per festività del 1° maggio (progressiva fronte 1+955 circa)
- 29 giugno 2018 ÷ 9 aprile 2019: interruzione dei lavori di scavo (progressiva fronte 2+025 circa).

Nel primo periodo la portata della ventilazione è stata pari a circa 42 m<sup>3</sup>/s, valore adottato durante le lavorazioni per garantire il ricambio d'aria ed una velocità di deflusso lungo la galleria > 0,3 m/s (sezione di scavo pari a circa 135 m<sup>2</sup>). In tali condizioni non sono state rilevate concentrazioni di metano superiori alla soglia di sensibilità dei sensori.

In tutti gli altri periodi la portata dell'aria di ventilazione, in assenza di lavorazioni, è stata ridotta a circa 26 m<sup>3</sup>/s (corrispondente ad una velocità di deflusso dell'aria lungo la galleria > 0,2 m/s). Nei tre periodi il sistema di monitoraggio ha rilevato maggiori concentrazioni di metano con valori pari, rispettivamente, a 0,06%, 0,04% e 0,08% (Figura 36, Figura 37 e Figura 38).

Considerando che in galleria erano stati realizzati (Tabella 6):

- il rivestimento di prima fase;
- il rivestimento definitivo in calotta fino ad una distanza di circa 70/85 m dal fronte;
- l'arco rovescio fino ad una distanza di circa 35/40 m dal fronte,

gli afflussi di metano, di portata limitata ma continua, confermano l'ipotesi (formulata ante operam dal Tecnico Specialista), che si sarebbero determinati afflussi di metano in galleria provenienti dagli strati profondi, in collegamento idraulico con il tracciato attraverso il sistema di faglie che interessano l'area di intervento, con modalità emissive tipiche della Classe 2 (cfr. elaborato [2.1]).

Tabella 6. Configurazione del cantiere nei periodi di chiusura

Progressive	Periodo chiusura cantiere		
	28/03/2018 – 02/04/2018	27/04/2018 – 30/04/2018	29/06/2018 – 09/04/2019
Fronte di scavo	1+929	1+955	2+025
Ventolino	1+895	1+935	1+991
Impermeabilizzazione	1+862	1+900	1+965
Cassaforma per getto calotta	1+842	1+878	1+940
Arco sensori (A, B, C)	1+891	1+912	1+985
Sensore D	1+884	-	-
Sensore E	1+875	-	-
Sensore F	1+895	-	-

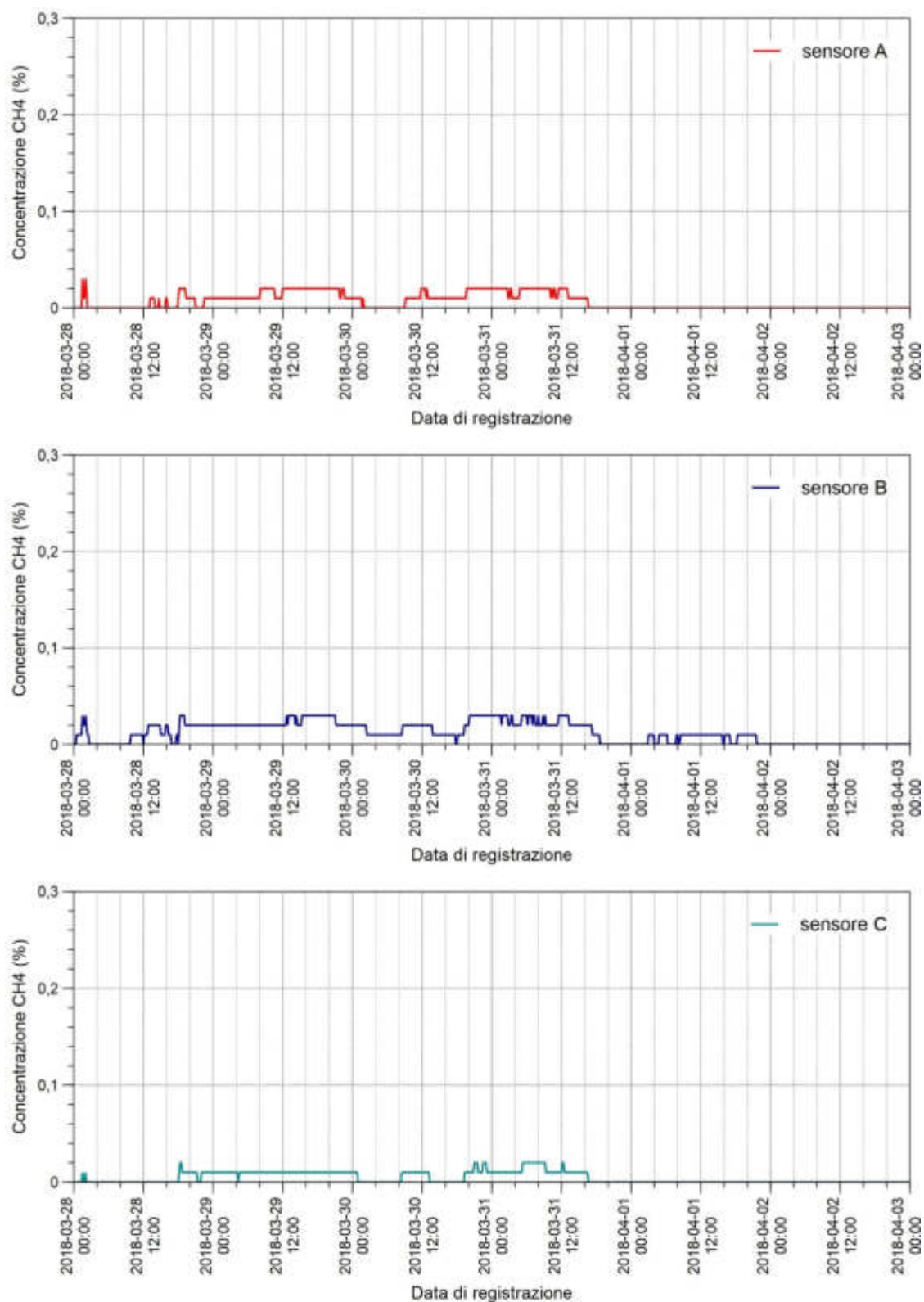


Figura 36. Concentrazioni massime di metano rilevate ogni 10 minuti dai sensori A, B e C (Figura 28) dal 28 marzo al 2 aprile 2018

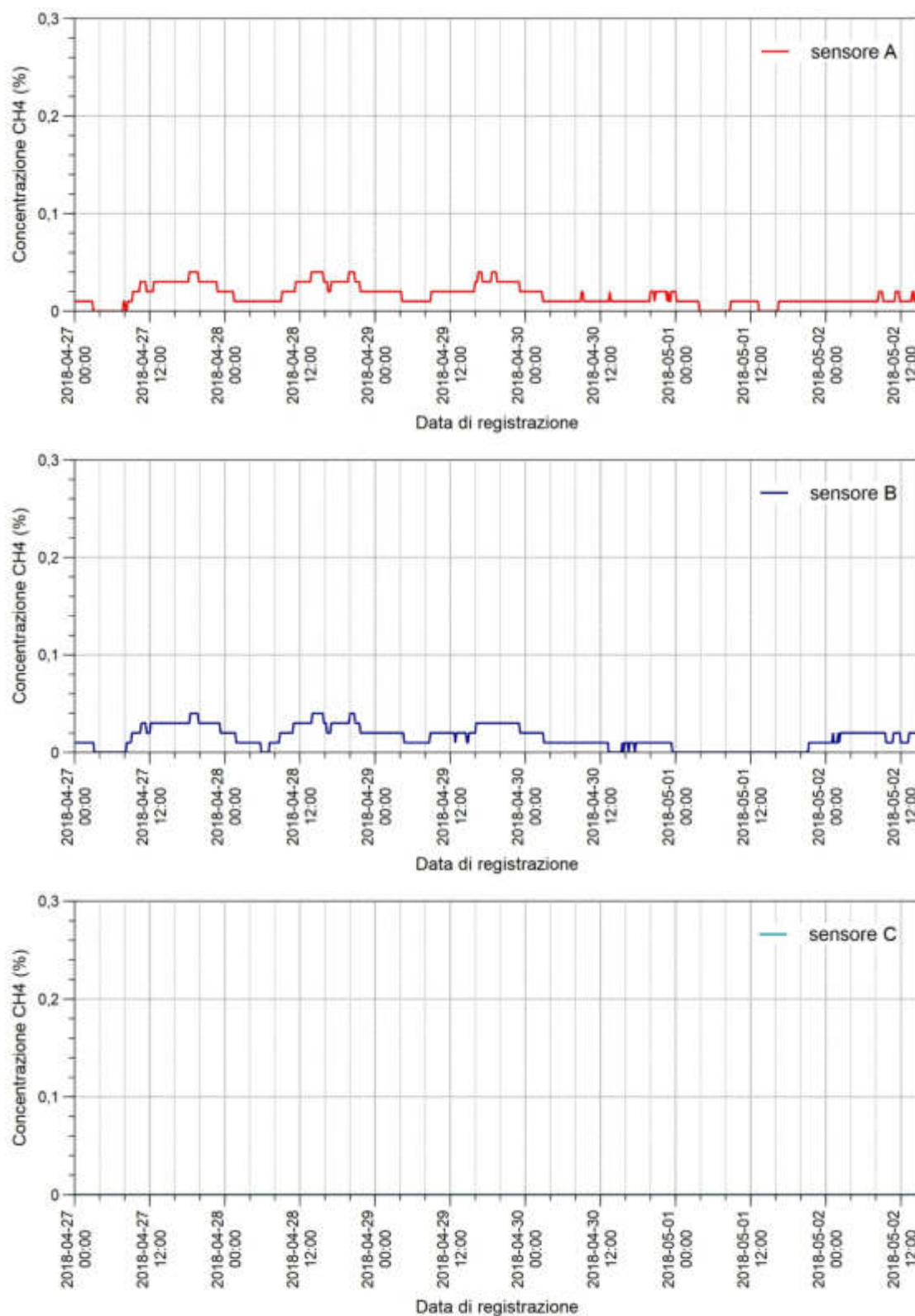


Figura 37. Concentrazioni massime di metano rilevate ogni 10 minuti dai sensori A, B e C (Figura 28) dal 27 aprile al 2 maggio 2018

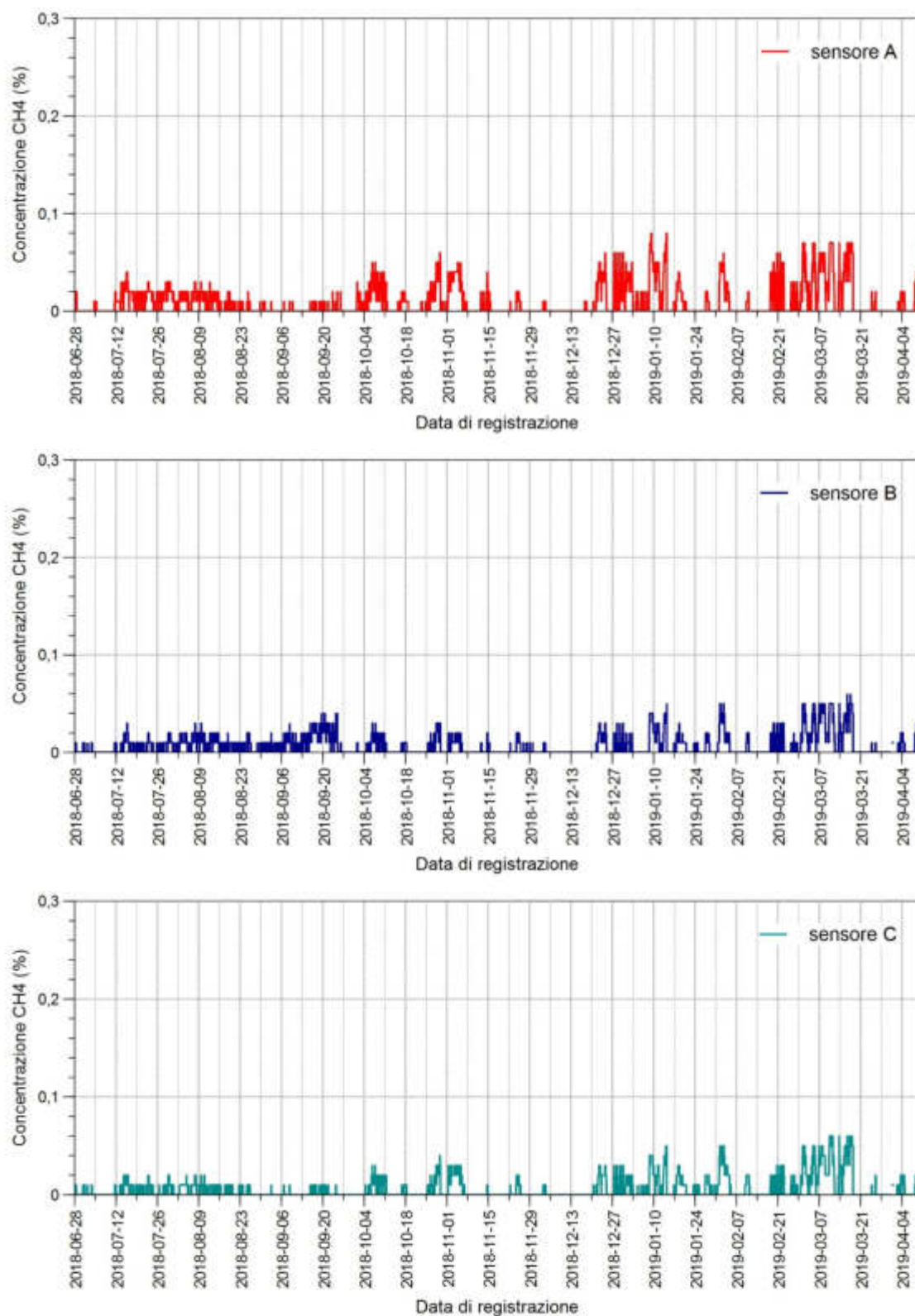


Figura 38. Concentrazioni massime di metano rilevate ogni 10 minuti dai sensori A, B e C (Figura 28) dal 28 giugno 2018 al 9 aprile 2019

## 7.3.2. Cantiere imbocco Sud

### 7.3.2.1. Afflussi di metano rilevate a boccaforo dei sondaggi inclinometrici

Dal 28 luglio 2017 sono state eseguite misure periodiche di concentrazione di metano a boccaforo dei sondaggi inclinometrici GN3113 e GN3114, a ridosso dell'imbocco Sud (Figura 39). A partire dal 13 settembre 2017 è stato monitorato anche l'inclinometro GN3115, posto in corrispondenza della pk 2+400, ad una distanza di circa 115 m dal tracciato della galleria. Sia gli inclinometri che i pozzetti di protezione non sono stati dotati di chiusura ermetica.

Il sondaggio GN3113 ha fatto registrare valori di concentrazione di metano che hanno superato il fondo scala dell'esplosimetro (5% in volume) nelle prime misure, effettuate con foro precedentemente tappato (Tabella 7 e Figura 40). Nelle misure successive si sono registrati ancora valori non nulli di concentrazione anche a foro aperto. Nel foro GN3114 (Tabella 8 e Figura 41), nei primi rilievi sono stati misurati valori massimi di concentrazione di metano pari a 1,8% e successivamente i tenori sono diminuiti fino ad annullarsi, presumibilmente perché i significativi spostamenti inclinometrici registrati hanno determinato la parziale occlusione del foro. Nel foro GN3115 le misure sono state effettuate tutte a foro aperto (Tabella 9). I valori misurati (Tabella 9 e Figura 42), inizialmente dell'ordine del 2,0 ÷ 2,5% in volume con un picco massimo pari a 4,5%, sono diminuiti nel tempo fino a raggiungere valori nulli dopo quattro giorni dalla prima misura.

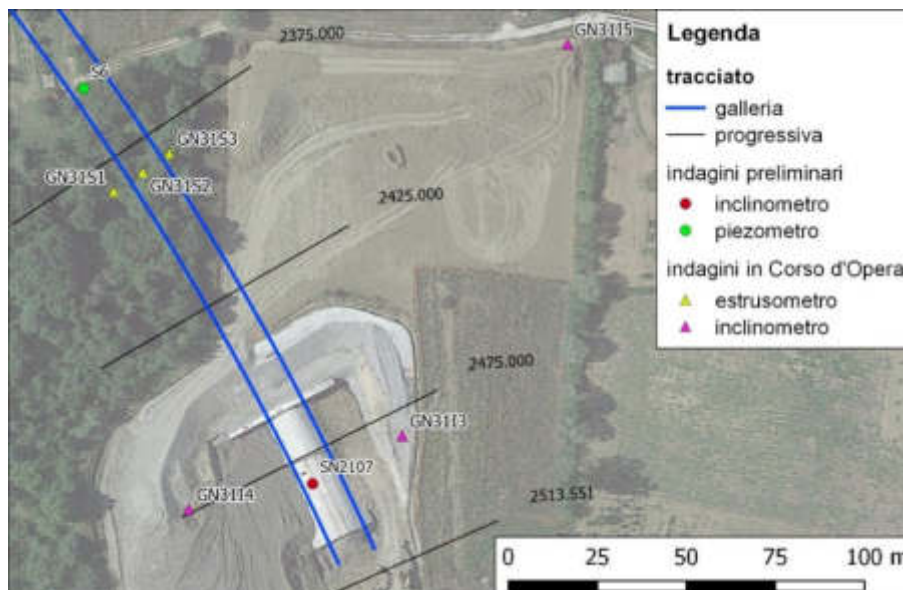


Figura 39. Planimetria dell'imbocco Sud della galleria Serre, con ubicazione degli inclinometri GN3113, GN3114 e GN3115

Tabella 7. Emissioni di CH<sub>4</sub> rilevate a boccaforo dell'inclinometro GN31I3

Codice	Data	Ora	CH <sub>4</sub> (%v/v)	Tappo	Pozzetto	Note
GN31I3	28/07/2017	08:50	5,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	28/07/2017	09:05	1,35	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	31/07/2017	10:20	5,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	31/07/2017	10:30	0,80	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	01/08/2017	08:10	5,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	03/08/2017	11:00	3,50	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	22/08/2017	11:30	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	30/08/2017	13:00	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	06/09/2017	02:00	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	13/09/2017	00:10	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	16/09/2017	07:45	1,10	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	19/09/2017	11:20	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	22/09/2017	16:30	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	27/09/2017	16:50	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	12/10/2017	17:10	0,75	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	13/10/2017	11:10	0,90	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	16/10/2017	10:10	0,65	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	30/10/2017	09:30	0,40	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	02/11/2017	17:50	1,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN31I3	06/11/2017	10:00	0,40	No	Chiuso	Misura a boccaforo

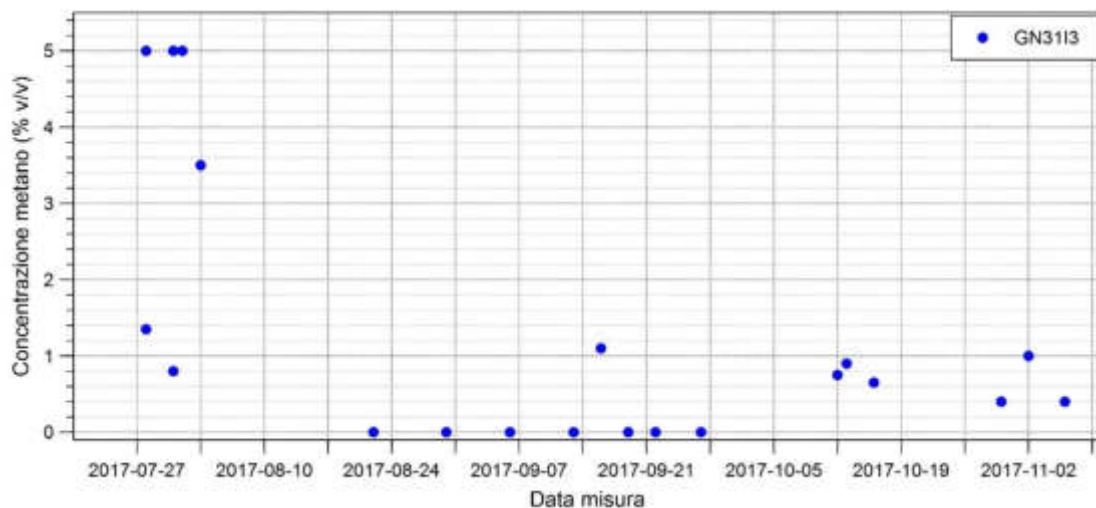


Figura 40: Emissioni di CH<sub>4</sub> misurate a boccaforo dell'inclinometro GN31I3

Tabella 8. Emissioni di CH<sub>4</sub> rilevate a boccaforo dell'inclinometro GN3114

Codice	Data	Ora	CH <sub>4</sub> (%v/v)	Tappo	Pozzetto	Note
GN3114	28/07/2017	08:30	1,80	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	28/07/2017	08:40	0,90	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	31/07/2017	10:00	0,50	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	31/07/2017	10:15	0,30	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	01/08/2017	08:30	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	03/08/2017	11:20	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	22/08/2017	11:15	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	30/08/2017	13:10	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	06/09/2017	02:20	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	13/09/2017	00:00	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	16/09/2017	07:30	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	19/09/2017	11:15	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	22/09/2017	16:40	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	27/09/2017	16:40	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	12/10/2017	17:00	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	13/10/2017	11:00	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	16/10/2017	10:00	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	30/10/2017	09:15	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	02/11/2017	17:40	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3114	06/11/2017	09:45	0,00	Si	Chiuso	Misura a boccaforo

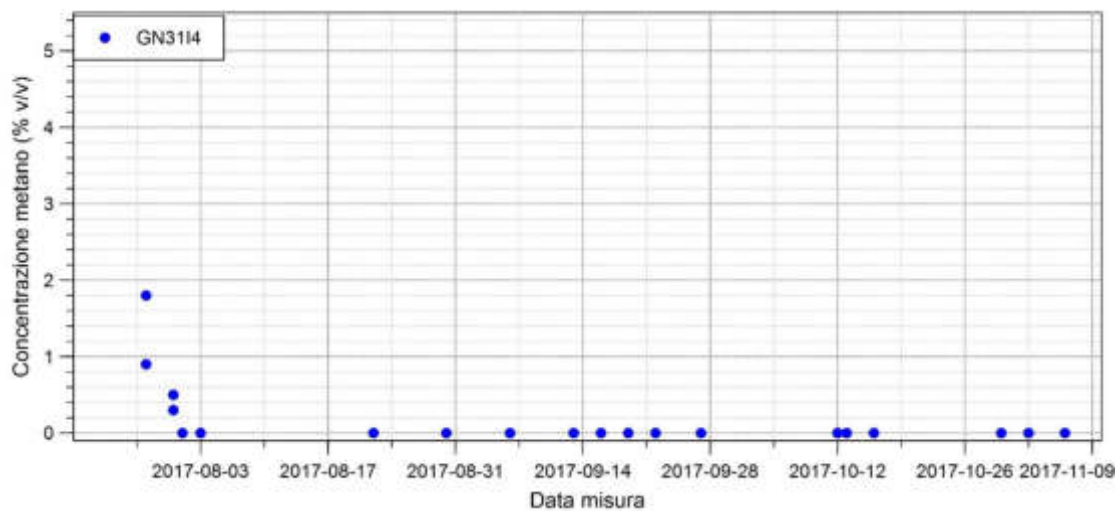


Figura 41: Emissioni di CH<sub>4</sub> misurate a boccaforo dell'inclinometro GN3114

Tabella 9. Emissioni di CH<sub>4</sub> rilevate a boccaforo dell'inclinometro GN3115

Codice	Data	Ora	CH <sub>4</sub> (%v/v)	Tappo	Pozzetto	Note
GN3115	13/09/2017	11:00	2,10	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3115	14/09/2017	10:30	2,25	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3115	15/09/2017	07:30	1,25	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3115	16/09/2017	08:00	4,80	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3115	19/09/2017	11:40	0,80	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3115	22/09/2017	16:00	0,55	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3115	27/09/2017	16:20	0,30	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3115	12/10/2017	16:40	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3115	30/10/2017	10:30	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3115	02/11/2017	18:00	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo
GN3115	06/11/2017	10:30	0,00	No	Chiuso	Misura a boccaforo

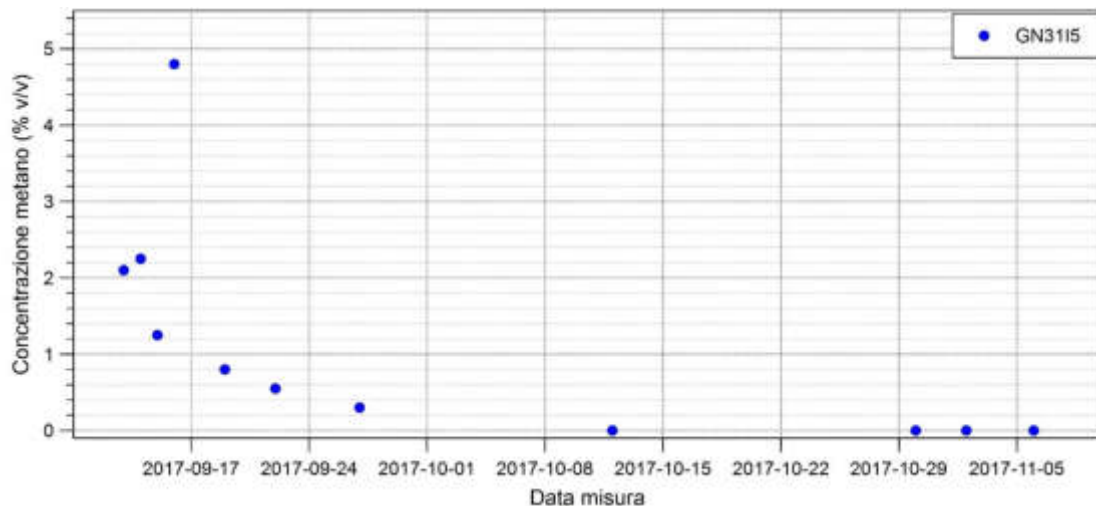


Figura 42: Emissioni di CH<sub>4</sub> misurate a boccaforo dell'inclinometro GN3115

Pur considerando che i sondaggi inclinometrici non sono progettati per il rilevamento di flussi di gas e che:

- la presenza del tubo inclinometrico “sigilla” le pareti del foro, limitando l’eventuale afflusso di gas al tratto di fondo foro;
- le misure delle concentrazioni di gas eseguite sono puntuali, manuali e non continue, e sono state eseguite, perlopiù, senza sigillare il tubo inclinometrico a boccaforo,

ciononostante, i risultati delle misure sono indizio di possibili afflussi di metano nel cantiere sotterraneo, continui nel tempo e con portate che possono creare miscele potenzialmente esplosive in galleria.



### 7.3.2.2. Metano rilevato nei fori di consolidamento al fronte, al contorno e durante le prospezioni al fronte

La ricerca di afflussi di metano eseguita in tutti i fori per i consolidamenti del fronte e del contorno hanno fornito indizi che confermano le ipotesi progettuali del Tecnico Specialista sui possibili flussi di metano verso il cantiere sotterraneo.

Nel corso di questa attività, al fronte ed al contorno, delle sezioni tipo B2V, B0V e B2, si sono registrate concentrazioni di metano non nulle (Tabella 10 e Figura 43).

Gli afflussi sono riconducibili all'attraversamento di zone fratturate negli strati arenacei del Camerino (Classe 1c).

Nel corso delle prospezioni al fronte per la ricerca del metano (Figura 44) nei campi di avanzamento in cui la sezione tipo adottata (sezione tipo B0) non prevedeva interventi di consolidamento al fronte ed al contorno (tratto di galleria compreso tra le pk 2+292,50 e 2+153,7) non sono state registrate emissioni di metano. Ciononostante, sondaggi realizzati ante operam (cfr. paragrafo 5.3.1) hanno indicato presenza di metano in questo tratto di galleria (Figura 43).

Tabella 10. Emissioni di metano rilevate nei fori di consolidamento al fronte ed al contorno nel cantiere imbocco Sud

Campo	Da pk	A pk	Data	Lavorazione	Pk misura	CH <sub>4</sub> (%v/v)	Punto di misura	Nota
1	2459,9	2445,9	22/08/17	Consolidamento (fronte)	2459,9	0,15	Acqua	Misura speditiva su campioni di acqua, foro n° 19. L = 24 m
			22/08/17	Consolidamento (fronte)	2459,9	0,15	Acqua	Misura speditiva su campioni di acqua, foro n° 21. L = 24 m
			22/08/17	Consolidamento (fronte)	2459,9	0,15	Acqua	Misura speditiva su campioni di acqua, foro n° 30. L = 24 m
2	2445,9	2431,9	06/09/17	Consolidamento (fronte)	2447,3	0,30	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 79
			06/09/17	Consolidamento (fronte)	2447,3	0,45	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 74
3	2431,9	2417,9	19/09/17	Consolidamento (fronte)	2431,9	0,25	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 78
4	2417,9	2403,9	08/10/17	Consolidamento (fronte)	2417,9	0,45	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 76
			08/10/17	Consolidamento (fronte)	2417,9	0,25	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 60
5	2403,9	2389,9	20/10/17	Consolidamento (fronte)	2403,9	0,30	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 10
			20/10/17	Consolidamento (fronte)	2403,9	0,20	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 11

Campo	Da pk	A pk	Data	Lavorazione	Pk misura	CH <sub>4</sub> (%v/v)	Punto di misura	Nota
			21/10/17	Consolidamento (fronte)	2403,9	0,45	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 61
			21/10/17	Consolidamento (fronte)	2403,9	0,15	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 62
			22/10/17	Consolidamento (fronte)	2403,9	0,35	Fori di consolidamento, in foro	Foro n. 77

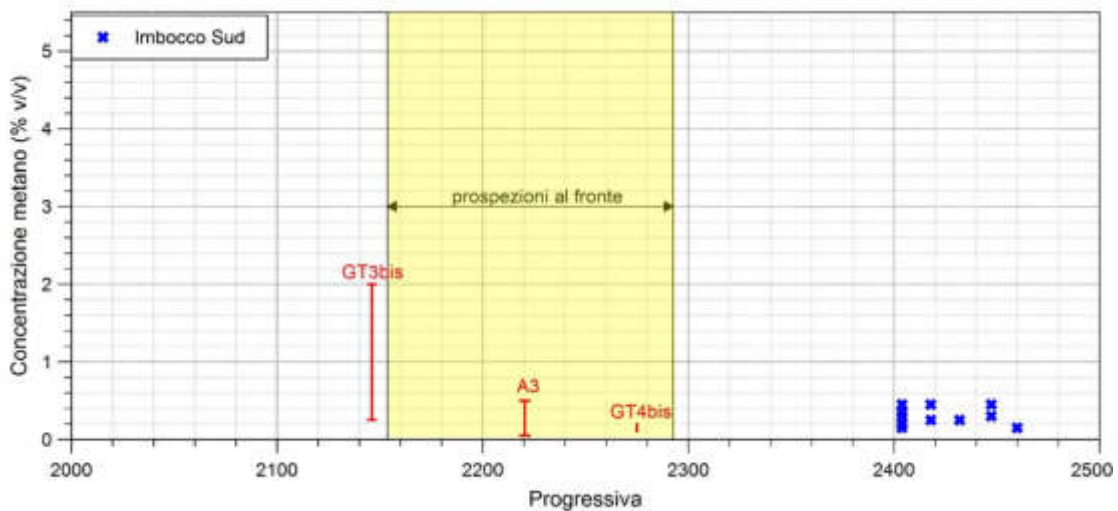


Figura 43. Emissioni di metano rilevate nei fori di consolidamento al fronte nel cantiere imbocco Sud. Nella figura sono rappresentati (con linea rossa) gli intervalli di valori di concentrazione registrati nei rilievi a boccaforo dei sondaggi ante operam

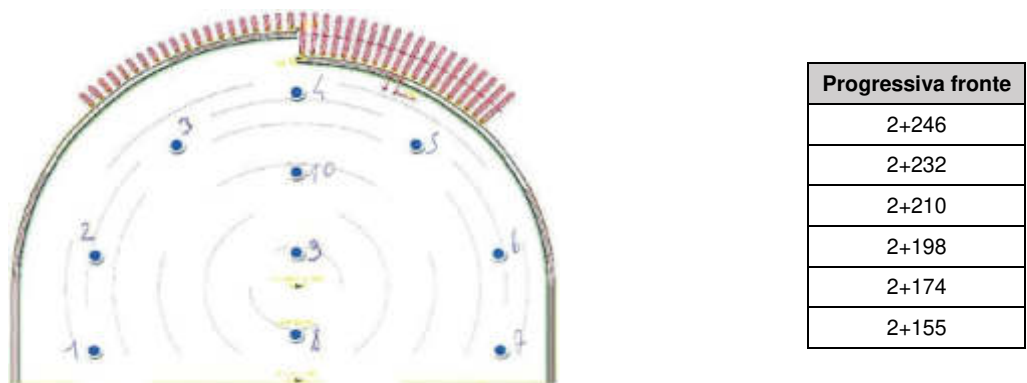


Figura 44. Disposizione dei fori di prospezione al fronte per la ricerca del metano (a sinistra) ed indicazione delle progressive del fronte di scavo in corrispondenza delle quali sono state effettuate le prospezioni (a destra)

### 7.3.2.3. Afflussi di metano in galleria

Il costante controllo dell'atmosfera con esplosimetri manuali, da parte degli Addetti al Monitoraggio e dal Responsabile del Monitoraggio, non ha rilevato presenza significativa di miscele aria – metano nel cantiere.

Nel cantiere Sud (in classe 1c) il sistema di monitoraggio automatico e continuo ha rilevato flussi di metano discontinui (Figura 45), con valori di concentrazione inferiori a quelli misurati nel cantiere imbocco Nord (in classe 2), e, prevalentemente localizzati nei tratti in cui prevale la litofacies arenacea (litoide e fratturata) del Camerino.

Le concentrazioni rilevate, sempre inferiori a 0,15% in volume (Figura 45), sono risultate maggiori durante le operazioni di scavo, inferiori durante le operazioni di perforazione per i consolidamenti al fronte e pressoché nulle in assenza di lavorazioni al fronte dopo la messa in opera del rivestimento di prima fase.

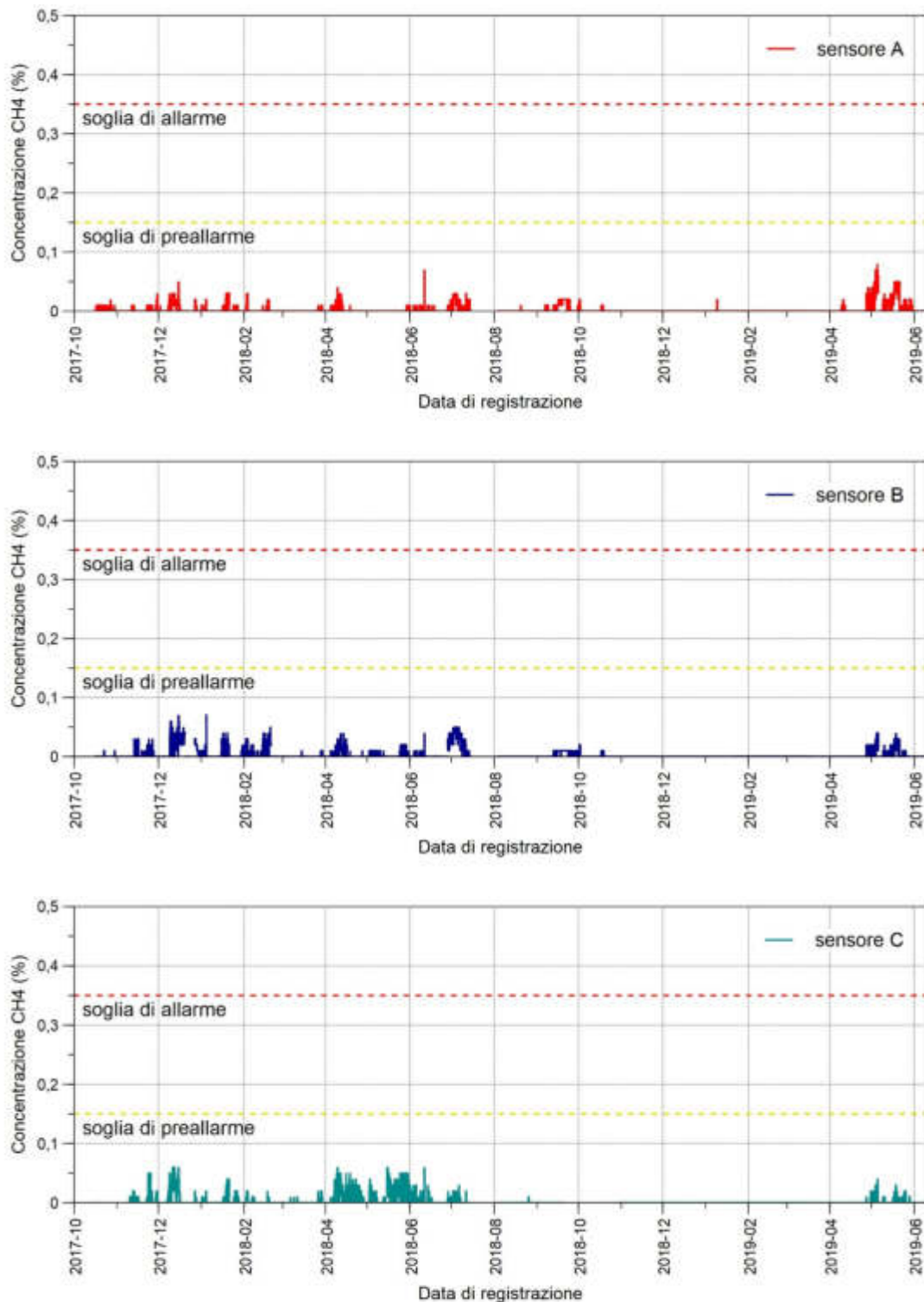


Figura 45. Concentrazioni massime di metano rilevate ogni 10 minuti dai sensori A, B e C del sistema automatico del cantiere imbocco Sud della Serre (Figura 29). Le concentrazioni rilevate in seguito ad interventi di taratura, spostamento o deriva dei sensori sono state filtrati nella rappresentazione.

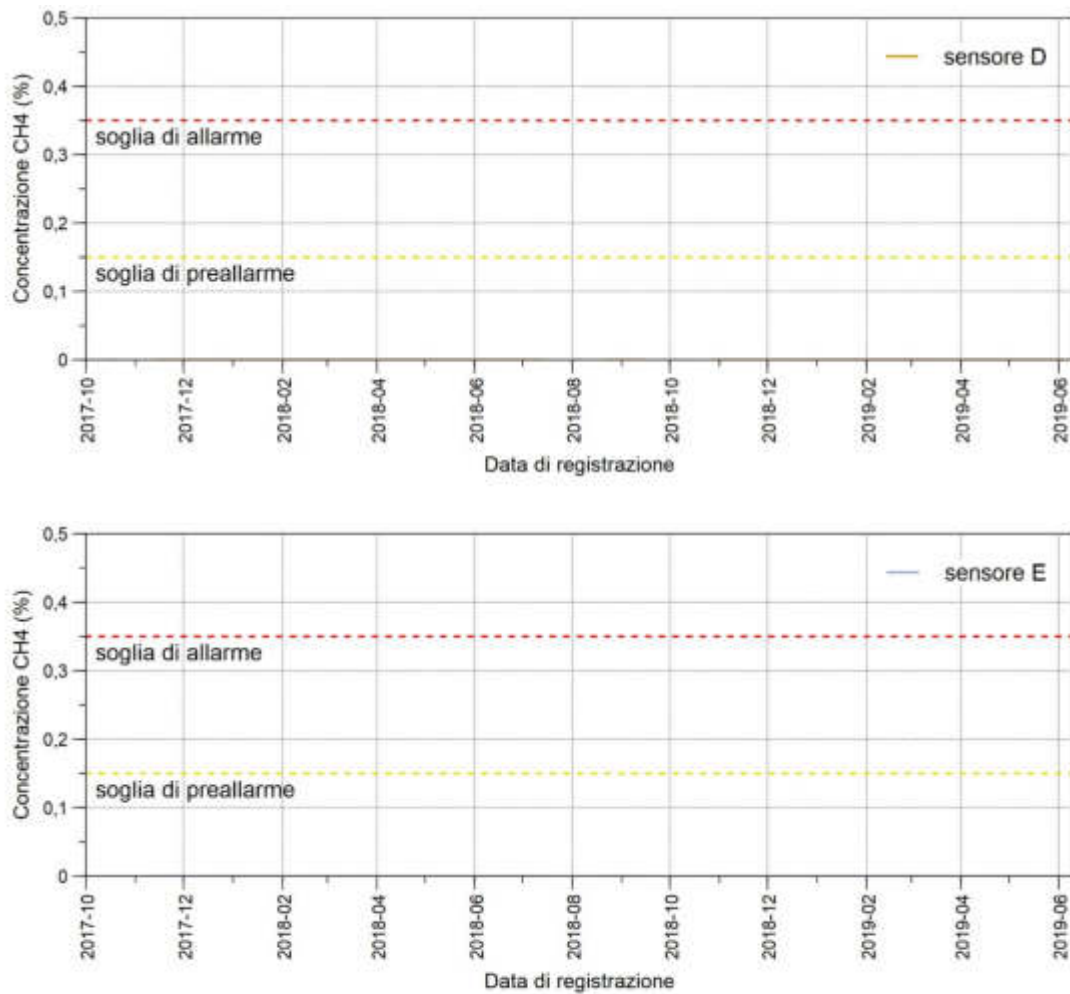


Figura 46. Concentrazioni massime di metano rilevate ogni 10 minuti dai sensori D e E del sistema automatico del cantiere imbocco Sud della Serre (Figura 29)

## 8. Verifica del modello di flusso e dell'indice di classifica

Il Tecnico Specialista, ante operam, ha stabilito, sulla base delle informazioni a disposizione in fase di progetto esecutivo, la seguente classifica:

- Classe 2 nel tratto compreso tra la pk 1+570,90 (imbocco Nord) e la pk 1+940,00;
- Classe 1c nel tratto compreso tra la pk 1+940,00 e la pk 2+512,00 (imbocco Sud).

Nell'attribuzione degli indici di classifica il Tecnico Specialista ha tenuto conto:

- delle modalità progettuali costruttive (tecniche di consolidamento, tecnica di scavo, ingombri, distanza del fronte di scavo dal rivestimento definitivo, ecc.) e delle possibili sorgenti di innesco delle miscele aria – metano (urti temperature, fiamme, ecc.);
- delle previsioni sulle modalità di flusso del metano verso il cantiere sotterraneo.

Gli elementi di conoscenza desunti dall'analisi dei documenti storici e della letteratura tecnico-scientifica su:

- geologia strutturale dell'area ed eventi sismici nell'area di intervento;
- emissioni spontanee di metano in superficie nel territorio prossimo alla zona di interesse;
- titoli minerari per la ricerca ed estrazione di idrocarburi liquidi e gassosi in terraferma rilasciati dal Ministero per lo Sviluppo Economico e stratigrafie dei pozzi esplorativi e di quelli produttivi prossimi all'area di intervento;
- studi ed indagini per la ricerca del metano (sondaggi, indagini geofisiche, ecc.) lungo od in prossimità del tracciato dell'opera e delle gallerie del 2° (Croce di Calle e Mistrianello) e del 3° e 4° stralcio funzionale, che interessano le stesse formazioni,

portavano a considerare molto probabili gli afflussi di metano nell'atmosfera del cantiere sotterraneo, durante la realizzazione della galleria, conseguenti a:

- risalita da strati profondi, in collegamento idraulico con il tracciato attraverso il sistema di faglie che interessano l'area di intervento nello Schlier e nel Tripoli;
- attraversamento di strati arenacei fratturati, a più elevata permeabilità nel Camerino,

ovvero con modalità emissive tipiche della Classe 2 nello Schlier e nel Tripoli e della Classe 1c nel Camerino.

Nella classifica tecnica ante operam il Tecnico Specialista aveva posto cautelativamente la progressiva di cambio classe a pk 1+940 anziché a pk 1+890, progressiva di passaggio dal Tripoli al Camerino, secondo la ricostruzione geologica di progetto, considerando una fascia di sicurezza di 50 m.

In conformità con quanto stabilito dalla Nota Tecnica, durante l'avanzamento dei due fronti (Nord e Sud), il Tecnico Specialista ha analizzato sistematicamente e con continuità:

- i risultati dei rilievi dei fronti di scavo;
- le concentrazioni di metano misurate durante l'avanzamento ed a fronte fermo:
  - manualmente, a boccaforo dei sondaggi inclinometrici posti all'esterno della galleria, in corrispondenza degli imbocchi (Figura 47b);

- manualmente, in foro (ad una profondità di circa 10 cm), a boccaforo ed a distanza di 20 cm e 50 cm all'esterno del foro, durante l'esecuzione delle perforazioni di consolidamento al fronte ed al contorno (Figura 47c);
  - dal sistema di monitoraggio automatico continuo nel cantiere sotterraneo (Figura 48 e Figura 49);
- le valutazioni ed osservazioni periodiche inoltrategli dal Responsabile del Monitoraggio.

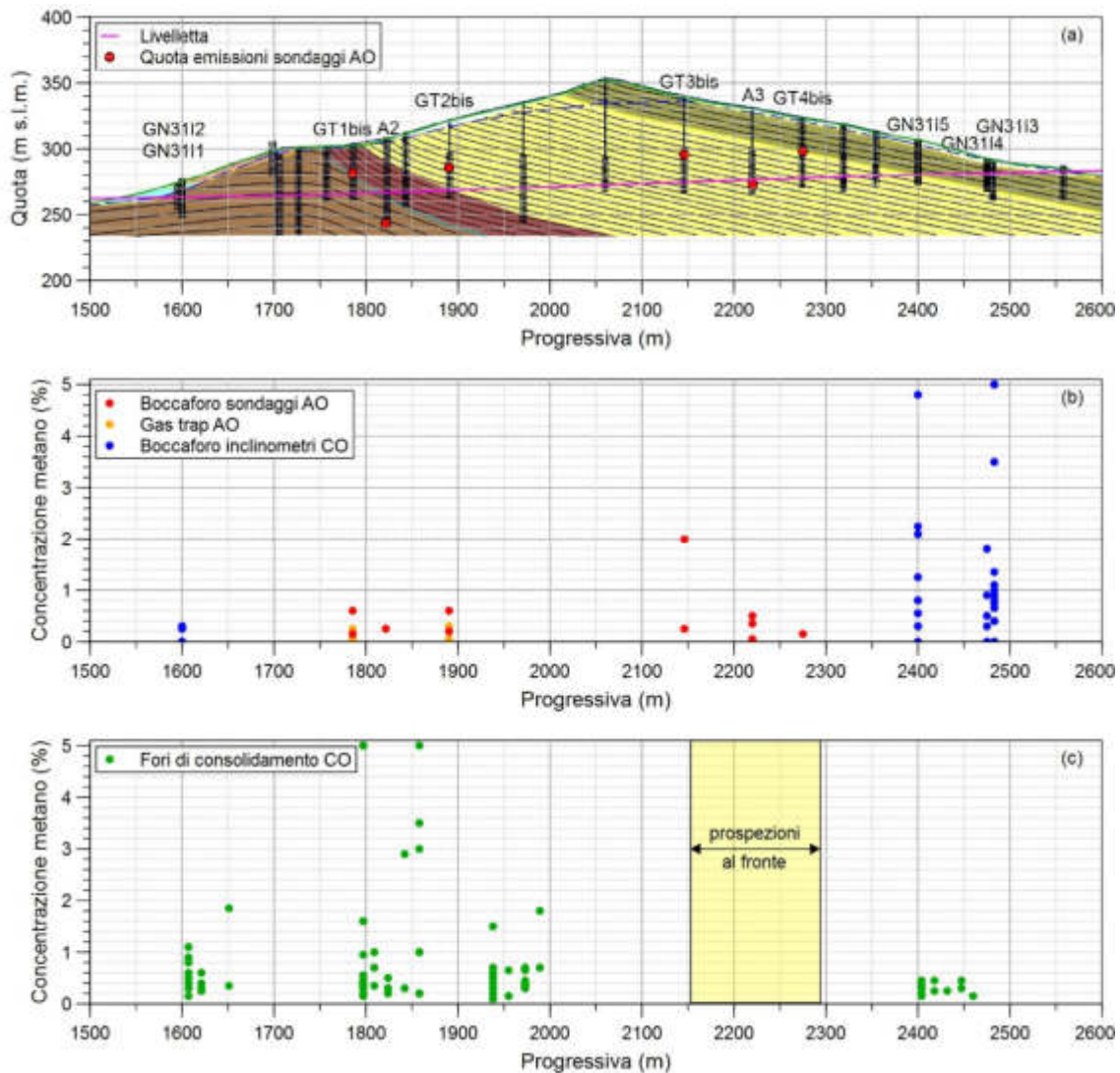


Figura 47. Quadro sinottico delle concentrazioni di metano rilevate: (a, b) a boccaforo dei sondaggi, nel corso delle indagini con “Gas trap” realizzate ante operam, a boccaforo dei sondaggi inclinometrici per il monitoraggio degli imbocchi; (c) nei fori di consolidamento al fronte ed al contorno dello scavo

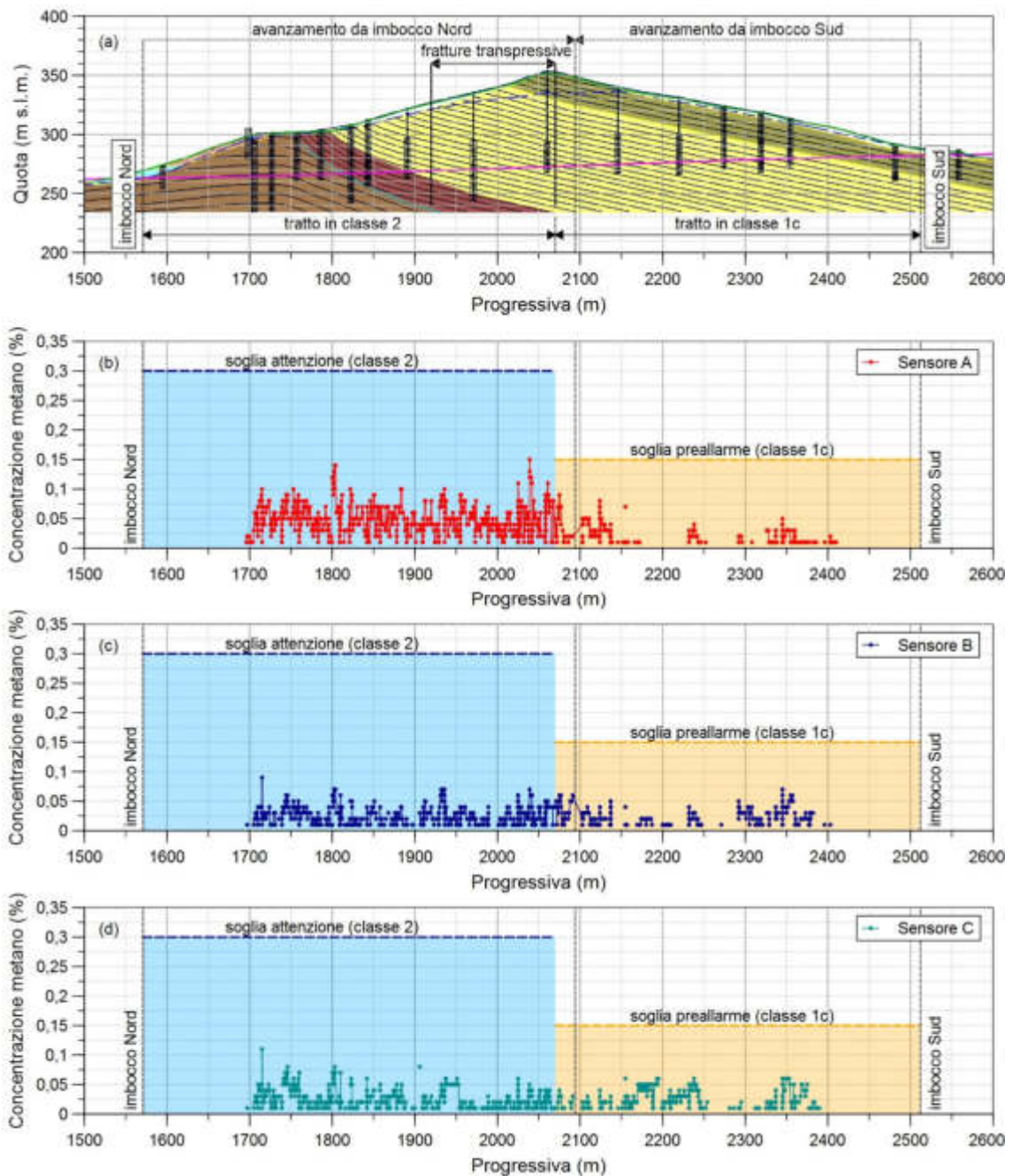


Figura 48. Concentrazioni massime di metano rilevate durante lo scavo della Serre dai sensori A, B e C del sistema automatico (cfr. Figura 28 e Figura 29). Le concentrazioni sono riferite alla progressiva del fronte di scavo.



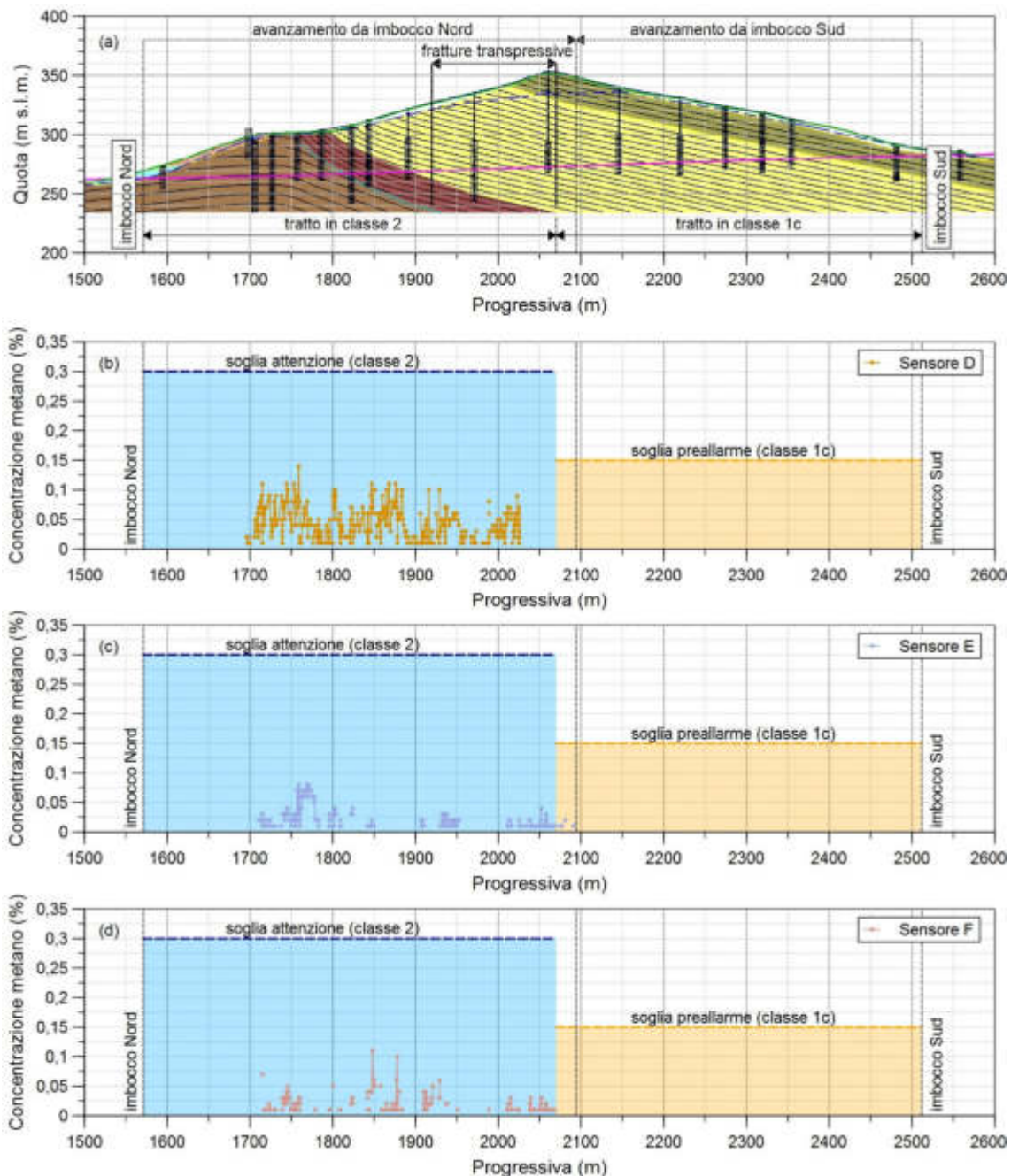


Figura 49. Concentrazioni massime di metano rilevate durante lo scavo della Serre dai sensori D, E ed F (quest'ultimo presente solo nel cantiere imbocco Nord) del sistema automatico (cfr. Figura 28 e Figura 29). Le concentrazioni sono riferite alla progressiva del fronte di scavo.

Il costante controllo, in corso d'opera, del fronte di scavo ha messo in luce la presenza di un sistema di lineazioni di frattura in regime transpressivo, all'interno della Formazione del Camerino, tra la pk 1+920 e la pk 2+070, non presente negli elaborati del Progetto Esecutivo, in corrispondenza del quale si sono registrati afflussi continui di metano nel cantiere sotterraneo (Figura 47c, Figura 48 e Figura 49) anche nei periodi di chiusura del cantiere (Figura 36, Figura 37 e Figura 38), a fronte

fermo, con portate di ventilazione inferiori al valore di progetto. Tale sistema non era prevedibile a partire dalle informazioni disponibili in fase di progettazione:

- in quanto non documentato nella letteratura tecnico-scientifica;
- perché non sono state condotte indagini geofisiche profonde (sismica a riflessione) nell'area di interesse;
- perché la presenza delle coltri di ricoprimento e la conseguente mancanza di affioramenti delle formazioni (Schlier, Tripoli e Camerino) lungo il tracciato della Serre non hanno consentito il riconoscimento di faglie in superficie.

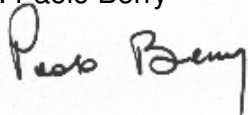
Pertanto, in linea con la Nota Tecnica che prevede la costante verifica, in corso d'opera, e l'aggiornamento, da parte del Tecnico Specialista, dell'indice o degli indici di classifica attribuiti in fase di progetto, qualora *"riscontri incongruenze tra le previsioni e la situazione in essere"*, il Tecnico Specialista ha imposto (cfr. Allegato 10 ed Allegato 11):

- di continuare l'avanzamento con gli apprestamenti della Classe 2, anziché passare alla Classe 1c, anche nel tratto caratterizzato dalla presenza di materiale tettonizzato con lineazioni di frattura in regime transpressivo (e, quindi, con modalità emissive tipiche della Classe 2);
- di controllare con continuità il fronte di scavo fino a quando la situazione non si sarebbe esaurita.

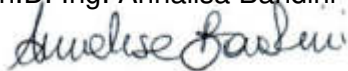
Bologna, 20 giugno 2019

Il Tecnico Specialista


Prof. Ing. Paolo Berry



Ph.D. Ing. Annalisa Bandini



Ph.D. Ing. Carlo Cormio



## Riferimenti bibliografici

Calamita, F., Deiana, G., 1980. Evidenze di una fase tettonica distensiva del Messiniano basale nel "bacino di Camerino" (Appennino umbro-marchigiano). Studi Geologici Camerti VI: 7–11.

Cantalamesa, G., Centamore, E., Chiocchini, U., Micarelli, A., Potetti, M., di Lorito, L., 1986. Il Miocene delle Marche. Studi Geologici Camerti, volume speciale "La Geologia delle Marche": 35–55.

Chiocchini, U., Cipriani, C., 1986. Caratteri petrografici delle arenarie torbiditiche mioceniche dei "bacini minori". Studi Geologici Camerti, volume spec. "La Geologia delle Marche": 57–60.

Deiana, G., Cello, G., Chiocchini, M., Galdenzi, S., Mazzoli, S., Pistolesi, E., Potetti, M., Romano, A., Turco, E., Principi, M., 2002. Tectonic evolution of the external zones of the Umbria-Marche Apennines in the Monte San Vicino-Cingoli area. Bollettino della Società Geologica Italiana, volume special: 229–238.

Scisciani, V., Agostini, S., Calamita, F., Pace, P., Cilli, A., Giori, I., Paltrinieri, W., 2014. Positive inversion tectonics in foreland fold-and-thrust belts: A reappraisal of the Umbria–Marche Northern Apennines (Central Italy) by integrating geological and geophysical data. Tectonophysics 637: 218–237, doi: 10.1016/j.tecto.2014.10.010.

Scisciani, V., Tavarnelli, E., Calamita, F., Paltrinieri, W., 2002. Pre-thrusting normal faults within syn-orogenic basins of the Outer Central Apennines, Italy: implications for Apennine tectonics. Bollettino della Società Geologica Italiana, volume speciale, 295–304.

Scisciani, V., Rusciadelli, G., Calamita, F., 2000. Faglie normali nell'evoluzione tortoniano-messiniane dei bacini sinorogenici dell'Appennino centrale esterno. Bollettino della Società Geologica Italiana 119: 715–732.