



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio microsismico (2023)

PAG. 1 DI 32

CONCESSIONE BORDOLANO STOCCAGGIO

Ciclo di stoccaggio 2023-2024

MONITORAGGIO MICROSISMICO

(Aggiornamento dati al 31 Dicembre 2023)

Marzo 2024	S. Del Gaudio	A. Mantegazzi	C. Coti
	M. Liberati	G. Tango	
DATA DI EMISSIONE	PREPARATO	VERIFICATO	APPROVATO

Questo documento è di proprietà Snam-Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.



SOMMARIO

1. INTRODUZIONE.....	3
2. SISMICITÀ NATURALE DELL'AREA	4
2.1 SISMICITÀ STORICA E RECENTE	4
2.2 CLASSIFICAZIONE DEL RISCHIO SISMICO	5
2.3 ZONAZIONE SISMOGENETICA.....	6
2.4 SORGENTI SISMOGENETICHE	7
2.5 PERICOLOSITÀ SISMICA	8
3. CONFIGURAZIONE DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO.....	9
3.1 ASPETTI METODOLOGICI	9
3.2 RETE DI SUPERFICIE	10
3.3 STRUMENTAZIONE DI POZZO PROFONDO.....	12
3.4 OPERATIVITÀ DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO	13
3.5 SISTEMI DI TRASMISSIONE E ACQUISIZIONE DEI DATI	14
4. RISULTATI DEL MONITORAGGIO.....	15
4.1 CLASSIFICAZIONE DEGLI EVENTI	15
4.2 ANALISI ED ELABORAZIONE DEI SEGNALI	17
4.3 INTERPRETAZIONE DEI DATI	18
5. CONCLUSIONI	21
6. ALLEGATI.....	23



1. INTRODUZIONE

L'esercizio del giacimento di Bordolano (CR), attivato allo stoccaggio nel corso del 2016, prevede l'ottemperanza ad una serie di adempimenti e di prescrizioni contenute nei provvedimenti ministeriali di autorizzazione dell'attività. In particolare, i decreti di VIA (MATTM, 2009 e 2014) e il decreto di approvazione del programma lavori (MiSE-MATTM, 2011) prescrivono l'esecuzione di alcuni monitoraggi di natura geologica e dinamica per la verifica dei seguenti aspetti:

- gestione dei fluidi e misura delle pressioni di esercizio del giacimento;
- spostamenti dell'acquifero di fondo;
- analisi dei movimenti del suolo;
- analisi della microsismicità.

Questa relazione tecnica intende riscontrare in particolare le prescrizioni riguardanti le attività di monitoraggio microsismico, ossia:

- Punto A8) del decreto DVA-DEC-0001633 del 12.11.2009: *"Dovrà essere predisposta a carico del Proponente una rete di monitoraggio dei potenziali disturbi microsismici prodotti dall'esercizio dell'impianto; le stazioni, la strumentazione e il programma di misure dovranno essere concordati con ARPA Lombardia"*.
- Art. 1, comma 3, del decreto MiSE-MATTM del 28.12.2011: *"La documentazione prodotta in ottemperanza alle prescrizioni nn. A7), A8) e A9) del decreto del Ministero dell'ambiente 12 novembre 2009, n. 1633 dovranno essere inoltrate anche alla Divisione II – Sezione UNMIG di BOLOGNA e alla Divisione VII del Ministero dello sviluppo economico"*.
- Prescrizione 1) del Decreto DVA-2014-0014583 del 16.05.2014, che definisce i seguenti parametri che la rete deve essere in grado di soddisfare:
 - o Soglia di localizzazione con magnitudo minima 0.9 in tutta la proiezione in superficie del limite del giacimento;
 - o Registrare sismi in un raggio di 5 km dai fondo-pozzo, ovvero 5 km arealmente e fino a circa 7 km in profondità (considerando la profondità media di circa 1,7 km del giacimento) senza limite di magnitudo.

Il piano di monitoraggio, messo a punto da Stogit e concordato con ARPA Lombardia per la verifica di questi aspetti (rif. **prescrizione A8 e 1a**), si basa sull'installazione di una rete di superficie composta da sette stazioni. La rete è operativa dal 19 dicembre 2013 con le prime tre stazioni collocate in aree di proprietà Stogit/Snam per il monitoraggio ante-operam (periodo di "bianco", rif. **prescrizione 1c**); una quarta stazione è stata installata nel luglio 2014. A completamento della rete ulteriori tre stazioni, poste in terreni di proprietà privata, sono state attivate nel corso del 2016, anno in cui è stata avviata l'attività di stoccaggio.

Questo documento è di proprietà Snam-Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.



In ottemperanza alla **prescrizione 1h** del decreto U. Prot. DVA-2014-0014583 del 16.5.2014 (vedasi Cap. 3.3), si è conclusa con esito positivo l'installazione e attivazione della strumentazione microsismica nel pozzo Bordolano 1 dir A nel mese di aprile 2022 come da comunicazione Stogit Prot. 368/OPER/AT del 17.05.2022, con avvio del monitoraggio ed inizio acquisizione dei dati a partire da maggio 2022.

Questa relazione contiene nella prima parte una serie di informazioni sulla sismicità naturale dell'area; successivamente sono presentati i risultati dell'interpretazione dei dati microsismici aggiornati al 31 dicembre 2023.

2. SISMICITÀ NATURALE DELL'AREA

La Pianura Padana è caratterizzata da una sismicità relativamente moderata di natura tettonica, concentrata prevalentemente lungo il margine pedeappenninico emiliano-romagnolo e con terremoti meno frequenti e più sparsi arealmente a nord del Fiume Po.

Il settore di pianura lombarda in cui è ubicata la Concessione Bordolano Stoccaggio è infatti caratterizzato storicamente da un'attività sismica di origine tettogenetica molto ridotta, in quanto i principali lineamenti tettonici sono posti a profondità elevata, molto superiore a quella del giacimento di stoccaggio.

2.1 Sismicità storica e recente

La raccolta di dati sulla sismicità storica e recente dell'area si è basata su informazioni disponibili in rete e su specifiche consultazioni dei cataloghi di INGV. In particolare, per quanto riguarda l'analisi della sismicità storica, sono stati utilizzati il Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani ver. 4.0 del 2022 (CPTI15) ed il Database Macrosismico Italiano ver. 4.0 del 2022 (DBMI15): ciò ha consentito l'analisi e la stima della sismicità storica in un arco di tempo compreso tra l'anno 1000 e l'anno 2020. In particolare, i cataloghi contemplati forniscono dati parametrici sia macrosismici che strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2020.

Nella tabella seguente è riportato l'elenco dei sismi storici con epicentri posti entro un raggio di 20 km dal Comune di Bordolano (CR), di cui vengono indicati la data, l'area epicentrale e i valori di magnitudo (Mw).

Data ed Ora (UTC)	Area Epicentrale	Magnitudo (Mw)
12 maggio 1802	Valle dell'Oglio	5.60
6 settembre 1829	Cremona	4.40
26 febbraio 1885	Pianura Padana	5.01



Ad integrazione di queste informazioni e per considerare anche eventuali eventi di magnitudo inferiore a 4, è stata effettuata sul sito INGV (<http://cnt.rm.ingv.it/>) una ricerca sulla sismicità recente, considerando sempre un raggio di 20 km dal Comune di Bordolano (CR).

Estraendo i dati disponibili dal database ISIDE, è stata eseguita un'indagine per il periodo compreso tra il 1985 ed il 2023, i cui risultati hanno evidenziato una sismicità naturale ridotta caratterizzata da sismi che ricadono unicamente all'esterno della concessione a profondità comprese tra 4 e 38 km, ben superiori a quelle del giacimento (ubicato ad una profondità media di 1.700 m s.l.m.).

L'indagine eseguita ha evidenziato come l'area appartenente alla Concessione Bordolano Stoccaggio sia caratterizzata da un tasso di sismicità naturale ridotto. Le profondità degli ipocentri dei sismi sono solitamente molto superiori a quelle del giacimento e ricollegabili ad assestamenti tettonici profondi dell'area.

2.2 Classificazione del rischio sismico

Sulla base di specifici provvedimenti legislativi (O.P.C.M. n. 3274 del 20 marzo 2003) il territorio nazionale è stato classificato in quattro categorie a differente rischio sismico, calcolato sia in base alla frequenza degli eventi che alla loro intensità. La zonazione, effettuata su base comunale e in fase di continuo aggiornamento, prevede il seguente schema di classificazione:

- Zona 1: sismicità alta
- Zona 2: sismicità media
- Zona 3: sismicità bassa
- Zona 4: sismicità molto bassa

A seguito di delibera della Regione Lombardia (D.G.R. 11 luglio 2014, n. 2129), entrata in vigore il 16 aprile 2016, tutti i Comuni ricadenti all'interno della Concessione Bordolano Stoccaggio sono classificati in Zona 3 (Figura 1), quindi a bassa sismicità.

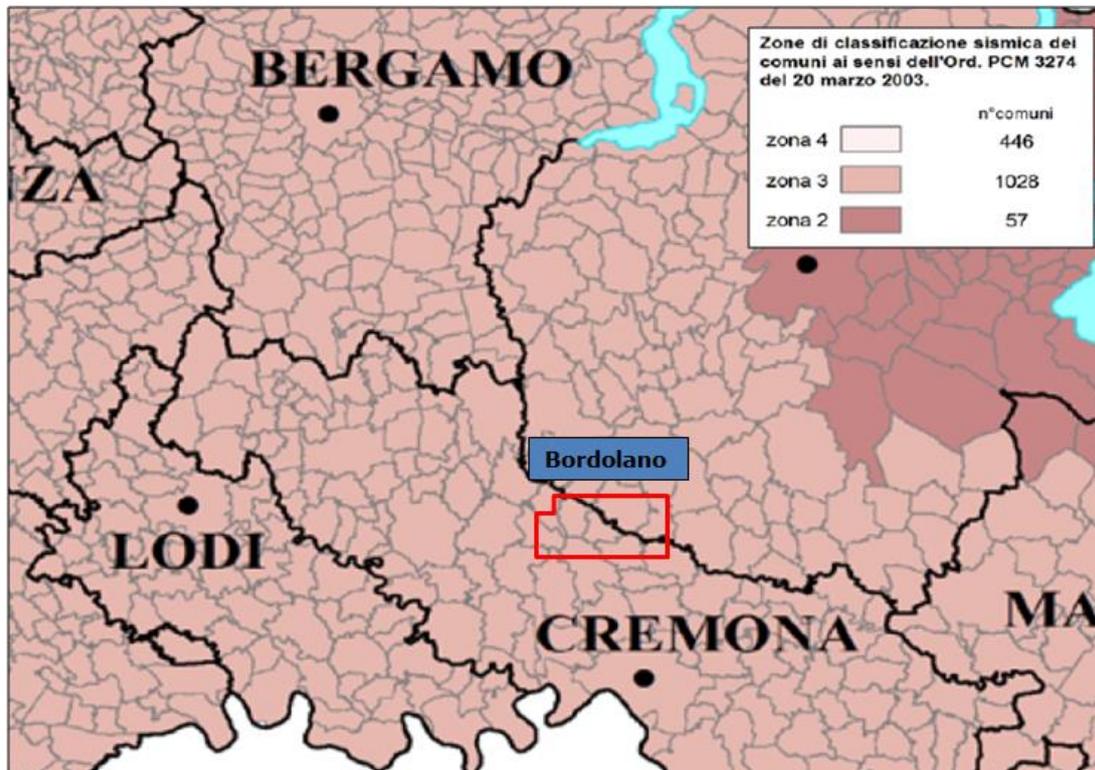


Figura 1

2.3 Zonazione sismogenetica

In base ad uno studio condotto da INGV (Meletti e Valensise, 2004) sono state individuate nel territorio nazionale una serie di aree sismogenetiche, rappresentate da zone nelle quali sono attesi terremoti con magnitudo $M \geq 5$; questa zonazione, denominata ZS9, rappresenta il principale punto di riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica del territorio, in particolare per quanto attiene ai criteri di costruzione degli edifici. La ZS9 si basa su dati derivanti dal catalogo dei terremoti e dalla localizzazione delle sorgenti sismogenetiche (faglie attive) ed è quindi coerente ed aggiornato con il quadro sismotettonico del territorio nazionale ad oggi disponibile.

Nel dettaglio, la Figura 2 mostra che la Concessione di Bordolano risulta ubicata all'esterno delle zone sismogenetiche (ZS906 e ZS907). La sorgente sismogenetica della zona 906 è costituita dal sistema delle Giudicarie distante da Bordolano più di 60 km; la zona 907 è caratterizzata da una sismicità medio-bassa, con la sola eccezione del terremoto di Soncino del 1802 (M 5.6), la cui distanza epicentrale da Bordolano è di oltre 20 km.

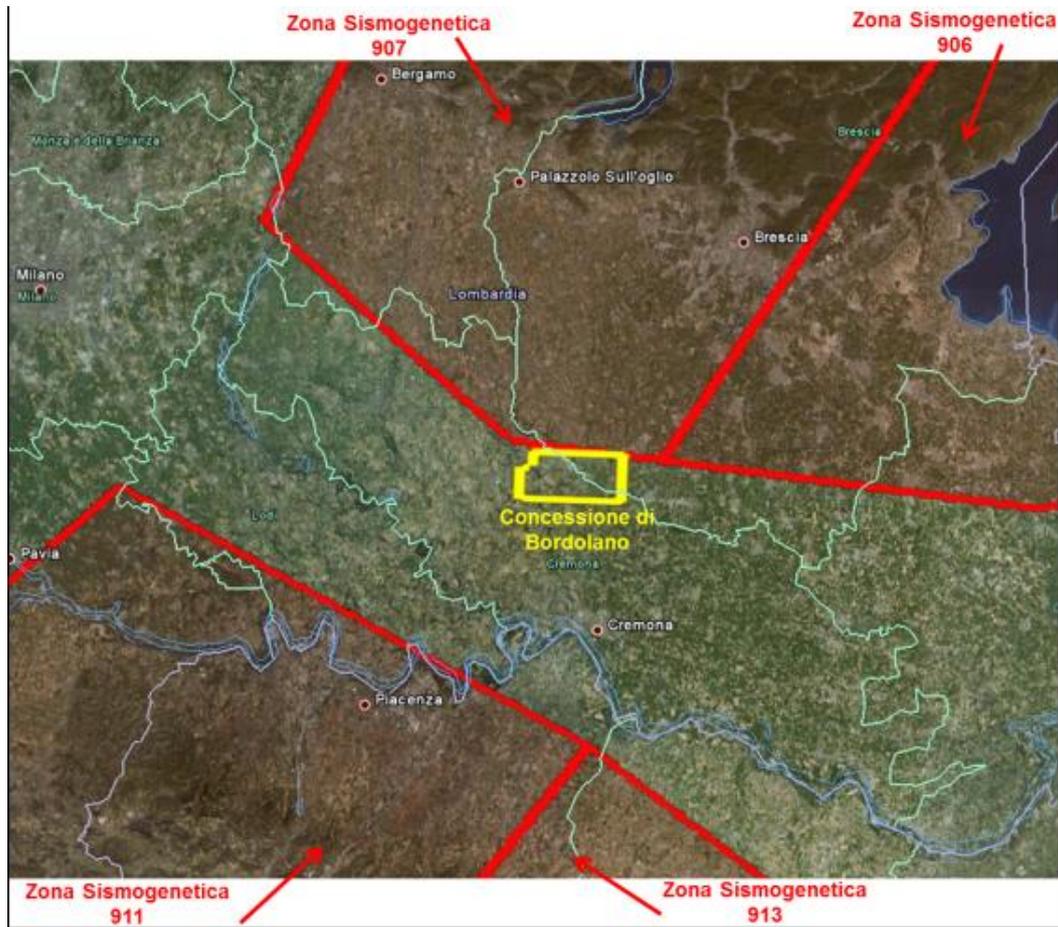


Figura 2

2.4 Sorgenti sismogenetiche

Verso la fine degli anni '90, INGV ha avviato uno studio volto alla creazione di un catalogo delle sorgenti sismogenetiche italiane (DISS, "Database of Individual Seismogenic Sources", INGV). Questo catalogo viene continuamente aggiornato e l'ultima versione è stata rilasciata a dicembre 2021 (DISS 3.3.0).

Il giacimento di Bordolano non è interessato dalla presenza di sorgenti sismogenetiche come si nota dalla Figura 3 (in blu la proiezione in superficie del contatto gas-acqua originale e in arancione la proiezione in superficie delle sorgenti sismogenetiche composite).

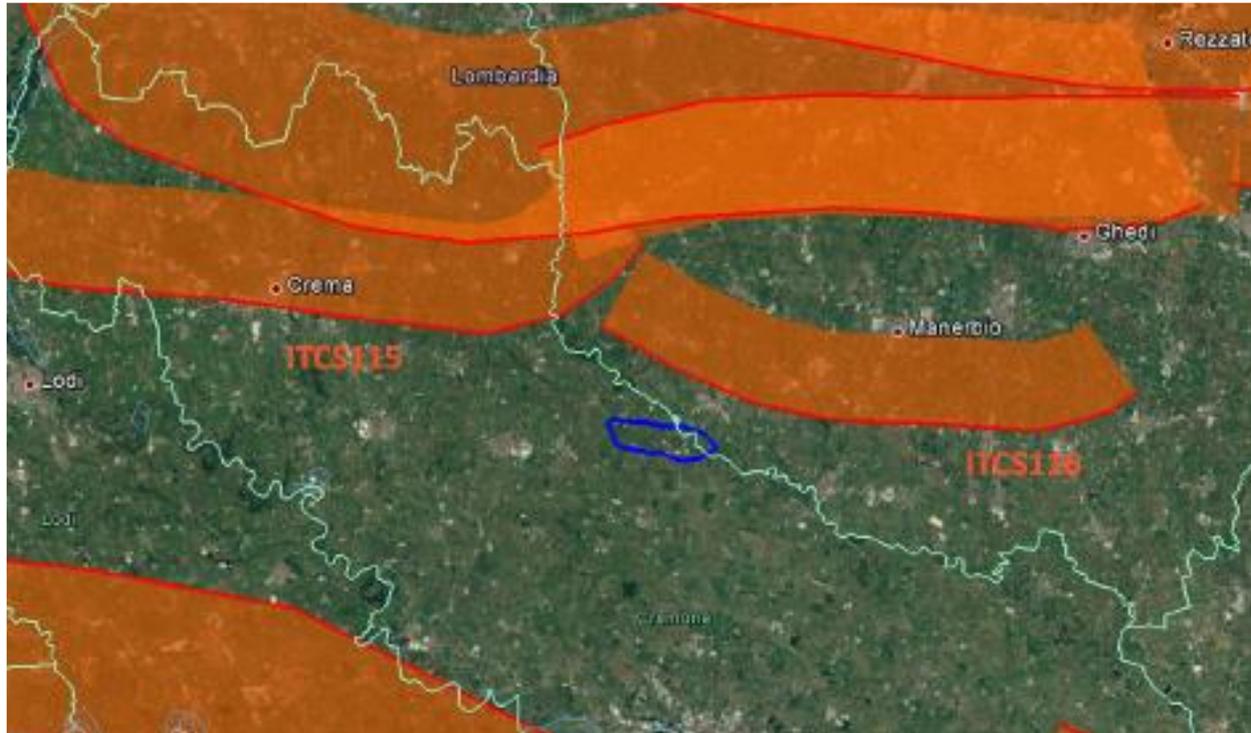


Figura 3

2.5 Pericolosità sismica

La pericolosità sismica, intesa in senso probabilistico, è lo scuotimento del suolo atteso in un dato sito con una certa probabilità che un certo valore di scuotimento si verifichi in un dato intervallo di tempo. Questo tipo di stima si basa sulla definizione di una serie di elementi di input (catalogo dei terremoti, zone sorgenti, relazione di attenuazione del moto del suolo, ecc.) e dei parametri di riferimento (scuotimento in accelerazione o spostamento, tipo di suolo, finestra temporale, ecc.). La pericolosità sismica di base, ricavata mediante studi di zonazione, può essere rappresentata in mappe di pericolosità sismica, nelle quali vengono riportati i valori di accelerazione massima del suolo. Nell'ambito del progetto INGV-DPC S1 (2005-2007) sono state rilasciate una serie di mappe di pericolosità sismica per diverse probabilità di eccedenza in 50 anni, basate sullo stesso impianto metodologico e sugli stessi dati di input di MPS04.

Nella Figura 4 è riportata la mappa probabilistica simulata relativa al sito di stoccaggio di Bordolano, che riporta il parametro dello scuotimento $a(g)$ (accelerazione orizzontale massima del suolo), elaborata per una probabilità di accadimento del 10% che nell'arco di 50 anni si verifichi il superamento dei limiti di $a(g)$ stimati, indicati nella mappa con scala cromatica.

I valori di $a(g)$ attesi nell'area della Concessione di Bordolano sono compresi tra 0.075 e 0.125, per cui essa risulta essere classificata come area a bassa pericolosità sismica.

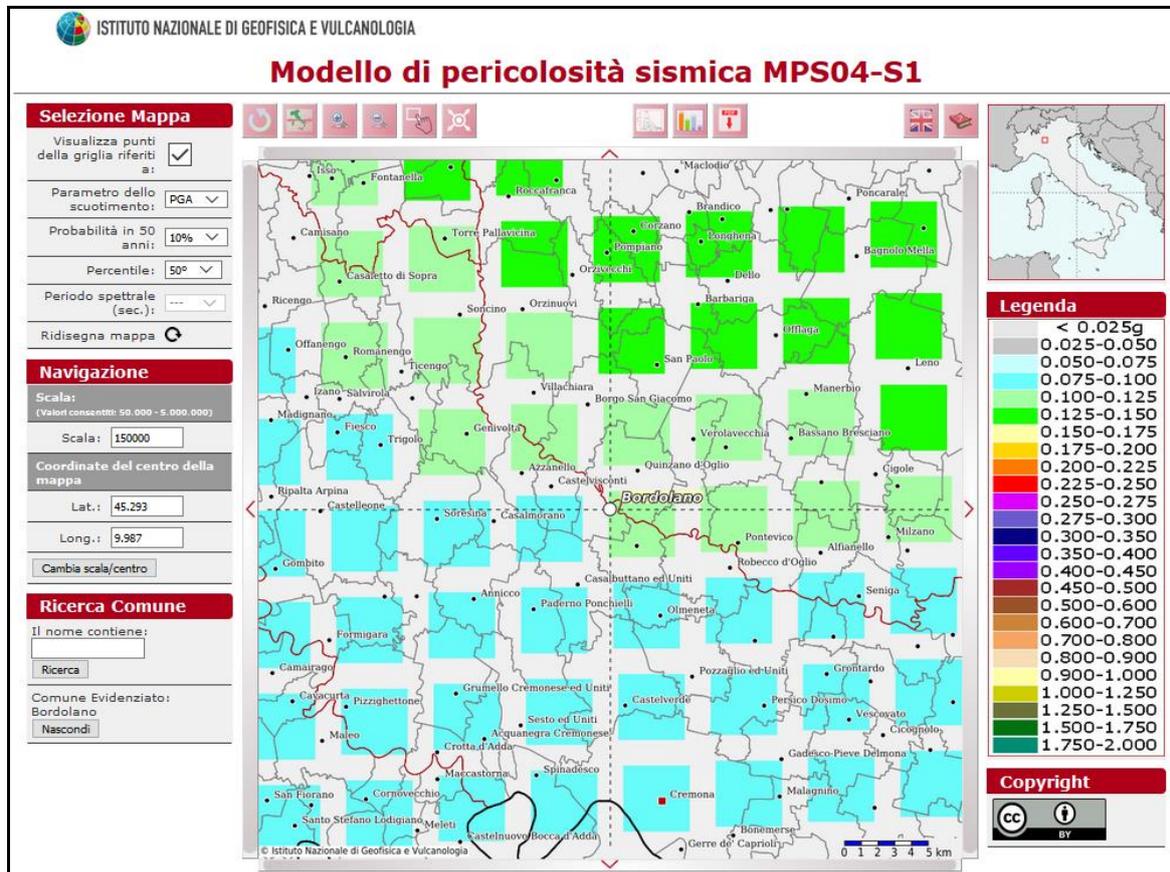


Figura 4

3. CONFIGURAZIONE DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO

3.1 Aspetti metodologici

La sorveglianza degli aspetti di carattere microsismico è mirata alla detezione della sismicità naturale del sito e alla verifica di microsismi eventualmente associabili all'esercizio del giacimento a seguito delle variazioni di pressione indotte dal gas-cycling. Il monitoraggio microsismico nei campi di stoccaggio viene condotto da Stogit secondo due differenti modalità operative (rete di superficie e/o strumentazione di pozzo), in funzione delle caratteristiche geologiche del giacimento e di eventuali prescrizioni associate a decreti autorizzativi all'esercizio.

Questo documento è di proprietà Snam-Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.

Nella Concessione Bordolano Stoccaggio il monitoraggio microsismico è eseguito da dicembre 2013 attraverso apposita rete di superficie e, a partire da maggio 2022, anche con strumentazione di pozzo profondo.

3.2 Rete di superficie

La rete di monitoraggio microsismico di Bordolano è situata nella pianura lombarda, al confine tra le province di Cremona e Brescia, in un contesto ambientale prevalentemente agricolo, con numerosi centri abitati in genere di limitata dimensione. La zona, appartenente al bacino idrografico del Fiume Oglio, è caratterizzata da depositi alluvionali prevalentemente sabbiosi.

La rete di monitoraggio presenta un'estensione di circa 9 km in direzione W-E e di circa 5 km in direzione N-S (rif. **prescrizione 1d**). La Figura 5 evidenzia l'ubicazione delle sette stazioni e riporta inoltre il limite della concessione di stoccaggio (linea gialla) e la proiezione in superficie del limite del giacimento (linea blu). In Allegato 1 sono fornite le schede monografiche delle sette stazioni.

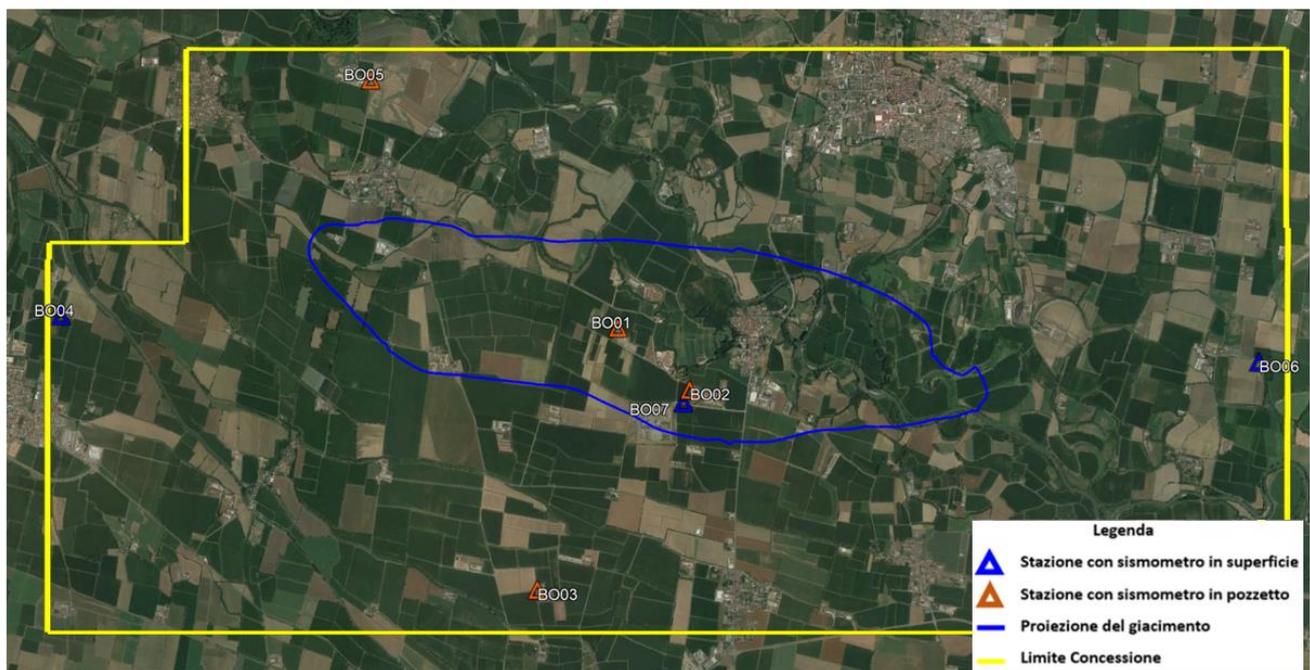


Figura 5

La realizzazione della rete di superficie di Bordolano è stata preceduta da uno studio di fattibilità mirato ad individuare la configurazione ottimale per gli scopi prefissati.

I siti idonei per l'installazione delle stazioni sono stati individuati esclusivamente entro la concessione di stoccaggio, valutando le condizioni ambientali, geologiche e logistiche della zona d'interesse, tenendo



anche in considerazione la loro accessibilità in condizioni meteorologiche sfavorevoli e la lontananza da fonti di disturbo antropico in grado di compromettere la qualità del segnale.

Le stazioni BO02 e BO05 sono dotate di pozzetto per l'alloggiamento del sismometro a profondità di 70 metri; questo espediente consente di acquisire segnali di migliore qualità, meno affetti dal disturbo superficiale di origine antropica, garantendo una più elevata sensibilità della rete e una riduzione della soglia di detezione. Dai mesi di agosto 2023 e settembre 2023, anche i sensori delle stazioni BO01 e BO03 sono stati installati in pozzetto, ad una profondità, rispettivamente, pari a 104 m e 150 m, per migliorare ulteriormente le performance della rete. Nella tabella seguente sono riportate le sigle e le coordinate di ogni stazione (quote in metri riferite a livello mare, riferimento cartografico WGS84).

STAZIONE	LATITUDINE	LONGITUDINE	Quota rispetto al liv. mare (m)	Profondità geofoni da piano campagna (m)
BO01	45°17'36.281"N	9°58'15.407"E	-41	104
BO02	45°17'17.103"N	9°58'46.634"E	-8.2	70
BO03	45°16'14.83"N	9°57'40.33"E	-90	150
BO04	45°17'39.910"N	9°54'12.795"E	64.9	0
BO05	45°18'52.922"N	9°56'27.413"E	-22.60	70
BO06	45°17'25.660"N	10°02'54.867"E	50.5	0
BO07	45°17'13.193"N	9°58'43.971"E	61.2	0

Le stazioni di monitoraggio microsismico sono ubicate in aree recintate di circa 50 mq, all'interno delle quali è collocato un pozzetto che ospita la strumentazione, costituita da:

- sismometro a 3 componenti a corto periodo
- registratore/Digitizer a 24 bit DYMAS24 (SolGeo s.r.l.) con dinamica >132 dB
- frequenza di campionamento a 200 Hz
- antenna GPS per la sincronizzazione temporale
- sistema di alimentazione
- batterie tampone
- Le stazioni BO01, BO02 e BO07 sono collegate alla rete elettrica, mentre le stazioni BO03, BO04, BO05 e BO06 sono alimentate a pannelli solari.

Nel corso del 2017, in ottemperanza alla **prescrizione 1a**, si è provveduto all'installazione nella stazione BO02 di un sensore accelerometrico di superficie Mod. SA/10 con le seguenti caratteristiche tecniche:

- n. 3 canali
- fondo-scala in accelerazione: 2g
- fondo-scala in tensione: 10V differenziale

Questo documento è di proprietà Snam-Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.

- sensibilità: 5V/g differenziale
- damping: 0,707
- frequenza di campionamento: 200 Hz

3.3 Strumentazione di pozzo profondo

In ottemperanza alla **prescrizione 1h)** del decreto U. Prot. DVA-2014-0014583 del 16.5.2014, si è provveduto all'installazione di geofoni a carattere permanente nel pozzo Bordolano 1 dir A, espressamente dedicato al monitoraggio del giacimento, la cui ubicazione è evidenziata in Figura 6. Le operazioni di installazione della strumentazione in pozzo hanno avuto luogo nel mese di aprile 2022, con successivo avvio dell'acquisizione dei dati a partire da maggio 2022.



Figura 6

In particolare, l'analisi si basa su registrazioni in continuo di eventi rilevati da cinque sensori del sistema Sercel SlimWave® a 3 componenti (geofoni); ogni singolo sensore è costituito da un velocimetro GeoWave® SGHT-15. I dati sono registrati in continuo in formato SEGY ed organizzati in cartelle comprendenti le 24 ore giornaliere di registrazione.

I sensori, distanziati di alcune decine di metri, sono posti lungo la parte inferiore del foro in corrispondenza di differenti livelli stratigrafici (Figura 7). Le profondità di installazione dei sensori microsismici misurate da Tavola-rotary (70,88 m sul livello mare) lungo la traiettoria deviata del foro, sono le seguenti: 1569 m, 1622 m, 1670 m, 1723 m, 1785 m. Tali profondità corrispondono alle seguenti quote riferite a livello mare: 1494,051 m (argille di copertura), 1547,05 m (argille di copertura), 1595,05 m (argille di copertura), 1648,05 m (livello di stoccaggio), 1710,05 m (argille basali).

Il sistema consente di monitorare in continuo, con riferimento temporale al sistema UTC (Tempo Universale Coordinato), eventuali fenomeni microsismici a livello del giacimento.

Questo documento è di proprietà Snam-Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.


Figura 7

La serie di moduli strumentati in pozzo è completata, in corrispondenza del quarto sensore (BOW4), con l'installazione di un inclinometro per il monitoraggio dell'eventuale variazione di inclinazione del pozzo Bordolano 1 dir A rispetto alla verticale; tale inclinometro acquisisce e trasmette una misura ogni 15 secondi all'interno di un file in formato csv.

3.4 Operatività del sistema di monitoraggio

Durante il periodo di osservazione, il sistema di monitoraggio di Bordolano nel suo complesso (rete di superficie e strumentazione di pozzo profondo) ha fornito dati con continuità e con un buon tasso di operatività.

Nello specifico, la rete di superficie ha sempre assicurato la copertura della disponibilità dei dati, con il contemporaneo funzionamento di minimo 3 stazioni durante tutti i giorni dell'anno. Tale condizione di operatività assicura la disponibilità annua dei dati elaborabili riferiti all'intera rete. La ridondanza della strumentazione della rete permette, infatti, di compensare la mancanza temporanea di alcuni punti registrazione.

Nel gennaio 2019 è stato effettuato un intervento di integrazione e di potenziamento dei pannelli fotovoltaici che ha permesso di ridurre i problemi di mancata alimentazione delle stazioni. Ad ulteriore rafforzamento delle condizioni di funzionamento, per ovviare all'eventuale spegnimento delle singole



stazioni durante i periodi di nebbia/brutto tempo, nel mese di ottobre 2023 sono state installate 4 celle a combustibile presso le stazioni BO03, BO04 BO05 e BO06 (tutte alimentate con pannelli fotovoltaici).

Più in dettaglio, nel corso del 2023 la rete ha avuto una percentuale di funzionamento **superiore al 95%**. La tabella seguente riepiloga la situazione annuale della diagnostica delle singole stazioni.

2023	BO01	BO02	BO03	BO04	BO05	BO06	BO07
GENNAIO-DICEMBRE % DATI DISPONIBILI	92,05%	100,00%	100,00%	96,16%	100,00%	96,99%	100,00%

Si fa presente che la percentuale di funzionamento della stazione BO01 è influenzata dal fatto che la stazione è stata volutamente spenta per 29 giorni complessivi tra i mesi di luglio e agosto, per consentire la perforazione del pozzetto in cui è stato installato lo strumento.

3.5 Sistemi di trasmissione e acquisizione dei dati

Le stazioni di monitoraggio sono raggiungibili da remoto come una normale macchina di rete, consentendo di verificarne lo stato di funzionamento e di variare i parametri della strumentazione direttamente dal centro di controllo.

Il protocollo di trasmissione dati (Figura 8), valutato attentamente in fase di progettazione di dettaglio, è basato sul protocollo SeedLink e trasmette i file in formato internazionale standard Miniseed. Gli elementi principali del sistema sono:

- server per la gestione dell'acquisizione
- server per l'acquisizione e pre-processing automatico
- sistema di storage dei dati raw online e relativo back-up

Il server di elaborazione provvede a gestire lo storage dei dati, sia raw che elaborati.

I dati delle singole stazioni sono trasmessi in continuo, tramite modem di tipo UMTS, al centro di controllo presso gli uffici della Sede Operativa Stogit di Crema (Unità Giacimenti), che ne gestisce il flusso svolgendo il pre-processing automatico per l'individuazione di possibili eventi significativi e la successiva elaborazione manuale degli eventi d'interesse (rif. **prescrizione 1a**).

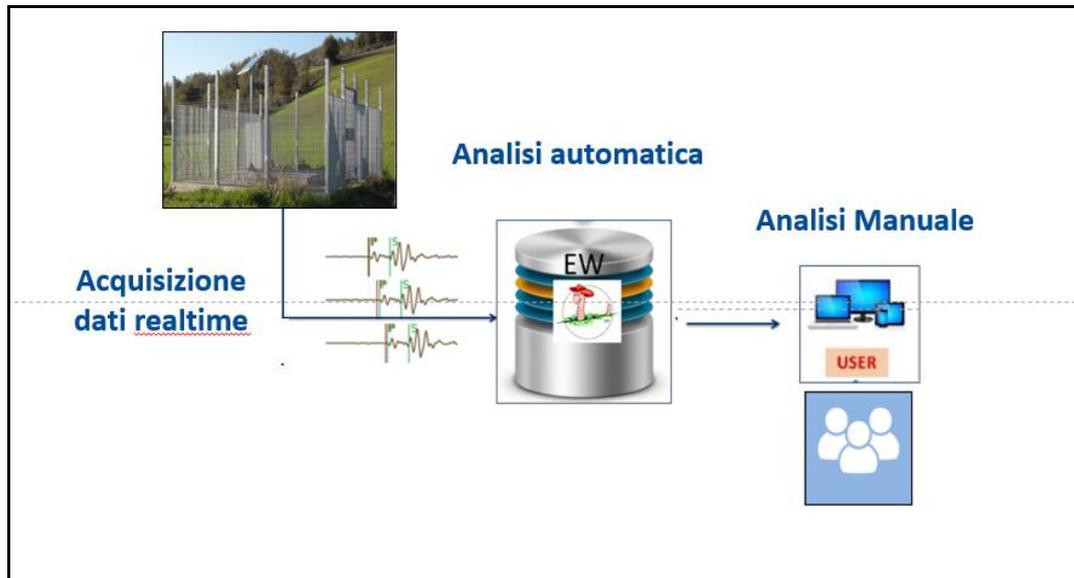


Figura 8

4. RISULTATI DEL MONITORAGGIO

4.1 Classificazione degli eventi

Relativamente alla rete microsismica di superficie, gli eventi sismici identificati sono stati classificati in base alla posizione ipocentrale rispetto al centro del giacimento, adottando il seguente schema di riferimento:

- Sismi Locali: eventi con ipocentro ricadente all'interno dell'area interessata dalla prescrizione ("*raggio di almeno di 5 km dai fondo pozzo*") ed eventi con ipocentro ricadente entro i domini di rilevazione DI e DE definiti nel documento tecnico "Indirizzi e Linee-guida per i monitoraggi" pubblicato dal MiSE nel mese di novembre 2014, di seguito descritti:
 - Dominio Interno di rilevazione (DI) - Volume all'interno del quale si ritiene che possano verificarsi fenomeni di sismicità indotta o di deformazione del suolo associati all'attività svolta. Esso rappresenta il volume di riferimento per il quale saranno identificati, monitorati e analizzati con la massima sensibilità i fenomeni di sismicità e deformazione del suolo. Per le attività di stoccaggio, è il volume che comprende la zona mineralizzata (giacimento usato per lo stoccaggio), come ricostruita dallo studio geologico preliminare, e un'ulteriore fascia nell'intorno del giacimento fino ad una distanza di 2-3 km, in funzione dell'estensione del giacimento.
 - Dominio Esteso di rilevazione (DE) - Volume circostante il Dominio Interno di rilevazione che comprende una porzione maggiore di sottosuolo, al fine di definire e contestualizzare al meglio i fenomeni monitorati. Per tutte le attività si suggerisce che esso si estenda oltre il Dominio

Questo documento è di proprietà Snam-Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.

Interno di rilevazione per una fascia di ampiezza compresa tra 5-10 km, tenendo conto delle dimensioni del giacimento e della tipologia di attività.

Per il giacimento di Bordolano, di cui si dispone di una sismica 3D ad alta risoluzione, di modelli geodinamici e geomeccanici di dettaglio, tenendo conto della tipologia del giacimento, del fatto che l'area è classificata a bassa pericolosità sismica, e del fatto che lo stoccaggio del gas naturale non prevede l'iniezione nel sottosuolo di un fluido incompressibile, sono da considerarsi valide le distanze di 2 km per il DI e di 5 km per il DE, in coerenza con quanto definito dalla prescrizione ministeriale vigente su Bordolano (*"registrare sismi in un raggio di almeno di 5 km dai fondo pozzo"*, evidenziato con linea verde in Figura 9). Nella Figura 9 è inoltre identificato il DI con linea rossa (distanza di 2 km oltre la proiezione in superficie del giacimento), mentre il DE è identificato con linea bianca (distanza di 5 km oltre l'estensione del Dominio Interno).

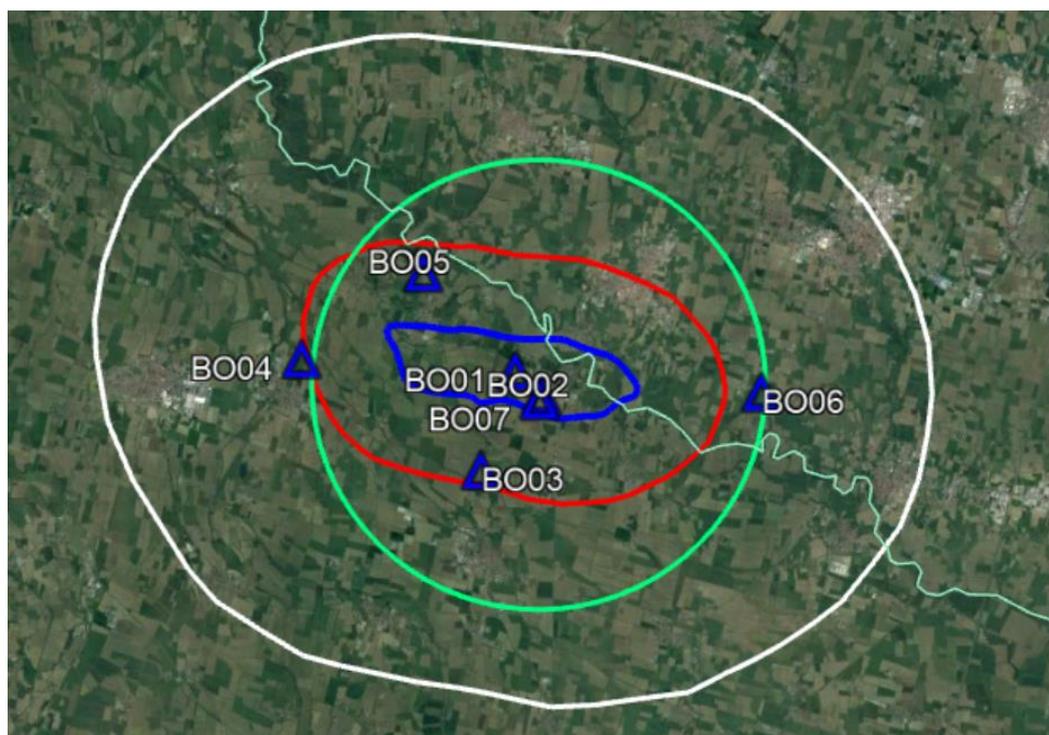


Figura 9

- Sismi Regionali: eventi con epicentro esterno ai domini di rilevazione fino ad una distanza di 50 km dal centro del giacimento, ritenuta congrua per una caratterizzazione sismologica dell'area a scala regionale (contesto di "avampaese" alpino, noto in base alle ricostruzioni geologico-strutturali del sottosuolo lombardo, caratterizzato da strutture sepolte in gran parte disattivate dal punto di vista tettonico). Tale distanza è superiore all'area di interesse oggetto della prescrizione ministeriale

Questo documento è di proprietà Snam-Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.



("registrare sismi in un raggio di almeno di 5 km dai fondo pozzo") ma viene tenuta in considerazione a dimostrazione del corretto funzionamento della rete ed in accordo con i criteri di progettazione della rete stessa. Per i motivi sopra detti, non si ritiene opportuna un'estensione superiore a 50 km dell'area di indagine regionale. La rete di monitoraggio di Bordolano è stata infatti progettata con l'obiettivo di monitorare fenomeni locali.

Relativamente alla strumentazione microsismica di pozzo profondo, gli eventi sismici identificati sono stati classificati in base alla differenza tra i tempi di arrivo delle fasi P ed S, che determina se un evento è di interesse o meno ai fini del monitoraggio in giacimento/copertura.

4.2 Analisi ed elaborazione dei segnali

Rete di superficie

L'analisi dei segnali acquisiti dalla rete di superficie fino al 31 dicembre 2023 è stata eseguita secondo due modalità fra loro complementari:

- analisi automatica dei dati in arrivo dalle stazioni remote, per identificare e segnalare possibili eventi di interesse;
- analisi manuale a cura dell'operatore per validare ed elaborare in dettaglio gli eventi individuati, definendone ipocentro e magnitudo.

L'approccio metodologico seguito si è articolato nelle seguenti fasi:

- discriminazione del rumore dai segnali sismici effettivi;
- individuazione della tipologia di sisma e selezione dei tempi di primo arrivo delle onde P e delle onde S;
- elaborazione dei segnali di tipo locale (ricadenti probabilmente nel DI o nel DE), procedendo al calcolo dell'ipocentro e della magnitudo;
- acquisizione dal sito internet INGV delle informazioni in merito a ipocentro e magnitudo per gli eventi di tipo regionale, registrati dalla rete di Bordolano

Il processing e l'analisi dei dati microsismici vengono effettuati attraverso l'utilizzo di un software sviluppato internamente, in cui è stato implementato un sistema di allerta automatico che, nel caso di evento sismico, provvede all'invio di mail. La localizzazione automatica (calcolata sulla base dei tempi dei primi arrivi delle fasi P ed S alle singole stazioni) viene successivamente raffinata manualmente dall'operatore utilizzando il programma hypoinverse, che minimizza i residui temporali per il modello di velocità a strati orizzontali.

Attualmente, per il giacimento di Bordolano è stato messo a punto un modello di velocità a strati piani e paralleli, il cui rapporto di velocità tra le onde P e le onde S è posto uguale a 1.73 (rif. **prescrizione 1b**).

Questo documento è di proprietà Snam-Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.



Tale modello è costruito sulla base di dati di letteratura ed è propedeutico al funzionamento degli algoritmi di localizzazione automatica del software. Ad oggi non è mai stata registrata sismicità locale, tale da richiederne un dettaglio maggiore e tecniche di analisi avanzate.

La magnitudo locale (ML) viene calcolata, attraverso il programma localmag, nelle sole stazioni con un buon rapporto segnale/rumore, dall'ampiezza massima delle onde S: viene applicata la relazione di Hatton-Boore (1984) al segnale convertito per la risposta del sismografo Wood-Anderson. Per quanto riguarda i sismi classificati come "regionali" (ossia esterni al DE, fino ad una distanza massima di 50 km dalla rete), vengono riportate nel bollettino Stogit la localizzazione ed il valore di magnitudo calcolati da INGV, disponibili dal loro sito internet. Infatti, lo scopo della rete di Bordolano è quello di registrare gli eventi eventualmente indotti dall'attività di stoccaggio e non quello di registrare la sismicità naturale a livello nazionale, compito proprio di enti pubblici quali ad esempio INGV.

Strumentazione di pozzo profondo

L'analisi dei segnali acquisiti dalla strumentazione di pozzo profondo fino al 31 dicembre 2023 è stata eseguita applicando il seguente flusso:

- associazione di fasi P e S entro tempi di arrivo compatibili, con ampiezze che risultano nettamente maggiori del rumore di fondo;
- la differenza tra i tempi di arrivo P e S è funzione della distanza dei sismometri dall'ipocentro e dipendente dal modello di velocità disponibile e costruito coerentemente con tutti i dati disponibili;
- coerenza dei tempi di arrivo sui cinque sensori, e differenza compatibile con le velocità locali e con l'angolo di incidenza.

4.3 Interpretazione dei dati

Riassumendo, tutti gli eventi identificati vengono analizzati manualmente e opportunamente esaminati per una loro caratterizzazione sismologica e classificazione secondo le seguenti categorie.

Rete di superficie:

- **DI:** Sismi ricadenti entro il volume del Dominio Interno di rilevazione
- **DE:** Sismi ricadenti entro il volume del Dominio Esteso di rilevazione
- **R:** Sismi regionali ricadenti oltre il volume del Dominio Esteso di rilevazione, fino ad una distanza massima di 50 km dal centro della rete

I sismi ricadenti oltre i 50 km di distanza dalla rete non vengono riportati nel presente documento, in quanto ritenuti non significativi ai fini del monitoraggio del giacimento.

Strumentazione di pozzo profondo:

- Relativamente alla strumentazione microsismica di pozzo profondo, gli eventi microsismici identificati sono classificati come di interesse o meno ai fini del monitoraggio in giacimento/copertura, in base alla differenza tra i tempi di arrivo delle fasi P ed S.

La rete di superficie **non ha registrato sismi locali, ossia ricadenti entro un raggio di 5 km ed entro i limiti definiti dai domini di rilevazione DI e DE**. I sismi più prossimi presentano distanza epicentrale superiore a 12 km dal centro del giacimento (di coordinate LAT 45.29° e LONG 9.96°), come riportato in Figura 10 che evidenzia la posizione in mappa degli eventi regionali rilevati dalle stazioni microsismiche di Bordolano nel corso del 2023. Nel complesso i dati acquisiti evidenziano un tasso di sismicità naturale molto ridotto nell'area di Bordolano.

La seguente tabella riporta un consuntivo dei sismi registrati nel corso del 2023 dalla rete di superficie, con la ripartizione nelle differenti tipologie in cui sono classificati:

TIPOLOGIA	NUMERO DI EVENTI
DI	0
DE	0
R	15

Le simulazioni condotte circa la capacità di rilevazione degli eventi da parte della rete hanno dimostrato che i risultati sono coerenti con quanto la rete sia stata effettivamente in grado di registrare nel periodo in esame, compatibilmente con il grado di magnitudo e la distanza considerata degli eventi stessi. Ciò a dimostrazione del corretto funzionamento della rete microsismica di Bordolano, nel rispetto dei criteri di progettazione.

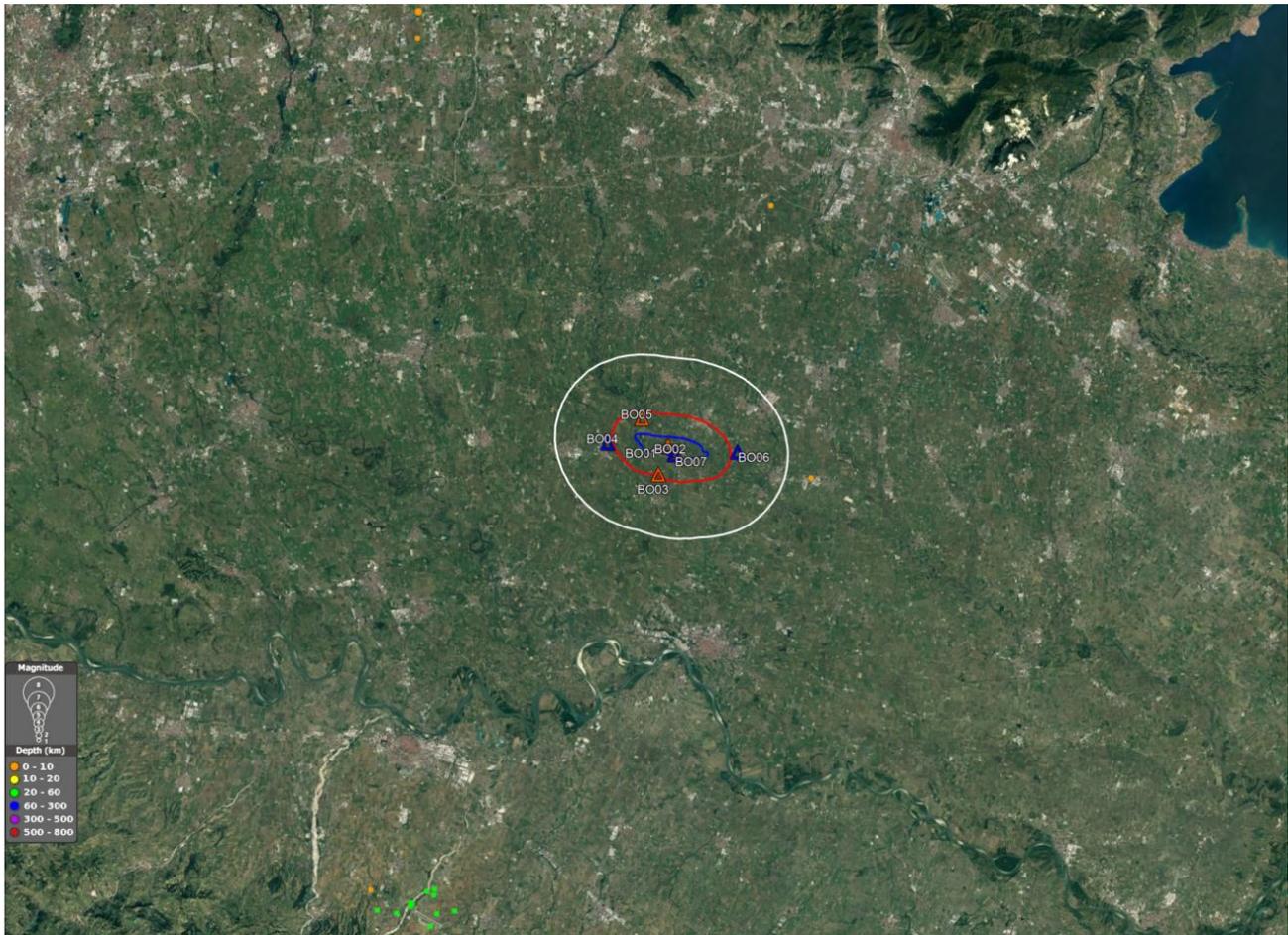


Figura 10

Per quanto riguarda la strumentazione di pozzo, i dati registrati non evidenziano alcun evento ubicato a livello del giacimento/copertura.

In Allegato 2 è fornito l'elenco completo dei sismi registrati dai sistemi di monitoraggio Stogit. Nella prima tabella è riportato l'elenco completo dei sismi regionali registrati dalla rete di superficie durante il periodo di osservazione, con indicazione delle rispettive date, localizzazioni, profondità degli ipocentri, valori di magnitudo e distanza epicentrale rispetto al centro del giacimento.

Nella seconda tabella è fornito l'elenco degli eventi identificati dall'array di pozzo profondo con indicazione dei rispettivi ΔT_s-p : la differenza tra i tempi di arrivo delle fasi P ed S li classifica come non di interesse ai fini del monitoraggio in giacimento.

Relativamente all'inclinometro, come si può evincere dalla Figura 11 non si è verificata nessuna variazione di inclinazione del pozzo Bordolano 1 rispetto alla verticale: il valore di inclinazione ha infatti un andamento costante pari a 0.7° con errore di $\pm 0.1^\circ$, tale valore è coincidente con l'inclinazione del pozzo a quella profondità. Dal grafico si può notare una mancanza di dato (circa 48 ore) verso la fine del

Questo documento è di proprietà Snam-Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.

mese di giugno, dovuto ad un blocco operativo del PC di acquisizione che ha necessitato di essere riavviato manualmente dal campo.

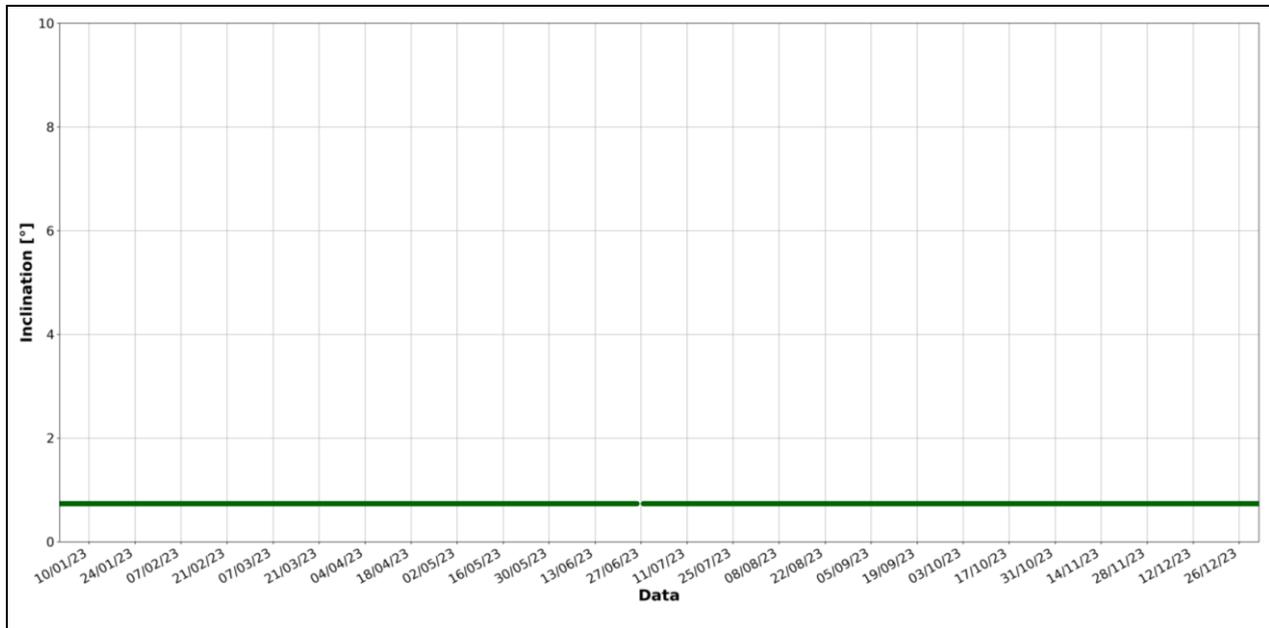


Figura 11

5. CONCLUSIONI

In ottemperanza alle prescrizioni ministeriali per l'esercizio del giacimento di Bordolano, Stogit ha provveduto all'acquisizione ed all'interpretazione di dati microsismici provenienti da una rete di superficie composta da sette stazioni. Le attività di monitoraggio hanno avuto inizio in data 19 dicembre 2013. Il Piano di monitoraggio è stato approvato da ARPA Lombardia (Prot. 0023980 del 23.2.2015).

La rete di superficie Stogit è stata progettata nel rispetto delle prescrizioni ministeriali vigenti ed è in grado di registrare eventi anche a distanze maggiori dell'area di interesse per magnitudo più elevate (rif. **prescrizione 1a-1d**). Ciò, benché non sia di interesse ai fini del monitoraggio dell'attività di stoccaggio, a dimostrazione della validità della rete stessa.

I dati acquisiti fino al 31 dicembre 2023 evidenziano un tasso di sismicità naturale molto ridotto. La rete non ha registrato alcun evento sismico nell'area di interesse oggetto della prescrizione ministeriale ("*registrare sismi in un raggio di almeno di 5 km dai fondo pozzo*"), in accordo con la rete nazionale INGV, né ha registrato sismi con ipocentri posti all'interno dei domini DI e DE.

Gli eventi regionali registrati più prossimi presentano una distanza epicentrale superiore a 12 km dal centro del giacimento. La sismicità registrata dalla rete di Bordolano, fino ad una distanza di 50 km, è in



linea con le capacità di detezione della rete stessa, a riprova che la rete ha funzionato correttamente, nel rispetto dei criteri di progettazione.

Inoltre, in ottemperanza alla **prescrizione 1h)** del decreto U. Prot. DVA-2014-0014583 del 16.05.2014, dal mese di maggio 2022 Stogit acquisisce ed interpreta anche i dati provenienti dalla strumentazione microsismica di pozzo profondo, installata nel pozzo Bordolano 1 dir A.

I dati registrati da entrambe le tipologie di reti non evidenziano eventi riconducibili all'attività di stoccaggio e nessuna variazione geodetica, confermando pertanto l'idoneità tecnica e le condizioni di sicurezza nell'esercizio del giacimento di Bordolano Pool B.

In riferimento alla **prescrizione 1d**, premesso che non si sono mai registrati eventi microsismici correlati all'attività di stoccaggio e che gli studi condotti evidenziano che non vi sono condizioni di aggravio del rischio sismico, Stogit rappresenta che, qualora dovesse manifestarsi nel Dominio Interno di rilevazione ed entro i 5 km dai «fondo-pozzo» un evento di magnitudo uguale o superiore a 3 e se gli studi/approfondimenti dovessero attestarne la correlazione con l'attività di stoccaggio, saranno adottati tutti gli accorgimenti opportuni atti a riportare la magnitudo locale massima dei sismi a valori di magnitudo inferiori a 2, come da prescrizione (ridefinizione dei valori della pressione di esercizio e della frequenza del ciclo di iniezione ed erogazione).



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio microsismico (2023)

PAG. **23** DI 32

6. ALLEGATI

Questo documento è di proprietà Snam-Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio microsismico (2023)

PAG. 24 DI 32

ALLEGATO 1 - MONOGRAFIE DELLE STAZIONI

BO01

Bordolano
(Cluster B)



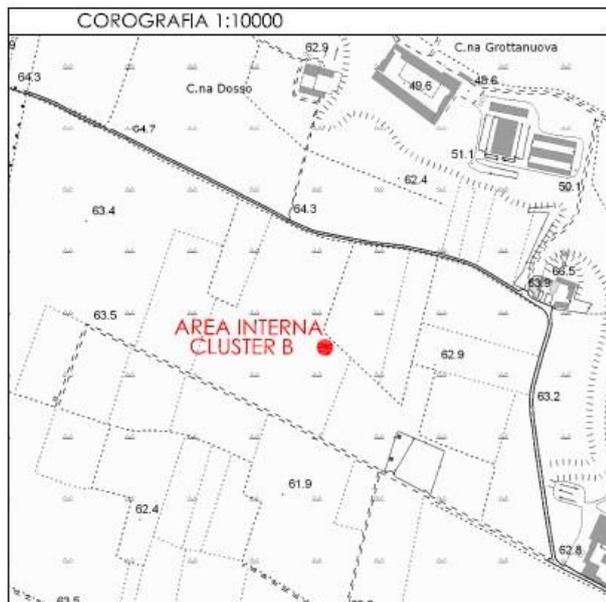
Coordinate:

GEOGRAFICHE WGS84

NORD	45°17'36.281"
EST	9°58'15.407"

PIANE GAUSS-BOAGA

NORD	5016023,76
EST	1576161,52
Q.S.L.M.	63.08



Data di attivazione	17 Dicembre 2013
Sismometro	Sara SSBHV
Monumentazione	Pozzetto 104 m
Profondità sensore l.m.	-41
N. componenti	3
Tipologia di sensore	Sismometro a corto periodo
Acquisitore	Dymas 24
Numero canali	3
Tipo acquisizione	Continua h24
Frequenza di campionamento	200 Hz
Alimentazione	Rete elettrica
Trasmissione dati	Modem GSM
GPS	Si
Accelerometro	-

Questo documento è di proprietà Snam-Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.



STOGIT-GIAC

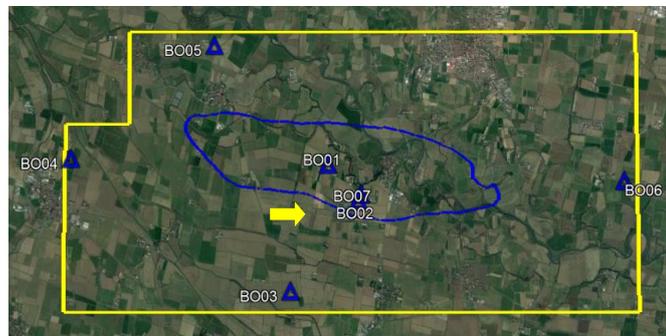
Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio microsismico (2023)

PAG. 25 DI 32

BO02

Bordolano



Coordinate:

GEOGRAFICHE WGS84

NORD 45°17'17.103"

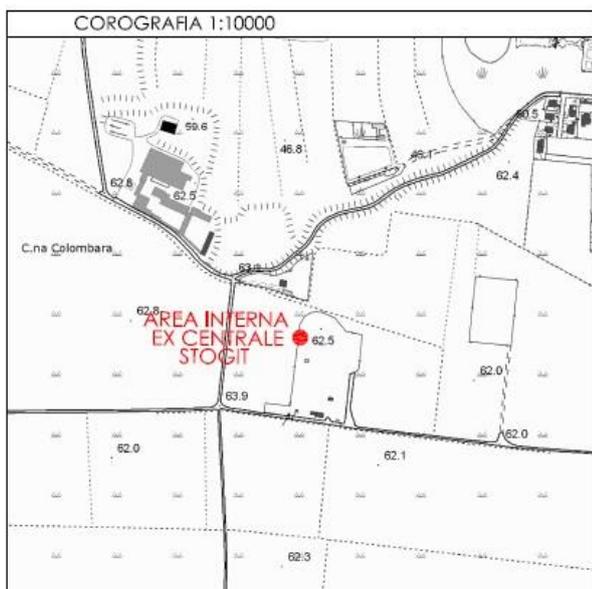
EST 9°58'46.634"

PIANE GAUSS-BOAGA

NORD 5015440,16

EST 1576848,90

Q.S.L.M. 61.87



Data di attivazione	18 Dicembre 2013
Sismometro	Le3DBH
Monumentazione	Pozzetto 70 m
Profondità sensore l.m.	-8.2
N. componenti	3
Tipologia di sensore	Sismometro a corto periodo
Acquisitore	Dymas 24
Numero canali	6
Tipo acquisizione	Continua h24
Frequenza di campionamento	200 Hz
Alimentazione	Rete elettrica
Trasmissione dati	Modem GSM
GPS	Si
Accelerometro	Sara SA/10

Questo documento è di proprietà Snam-Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio microsismico (2023)

PAG. 26 DI 32

BO03

Casalbuttano



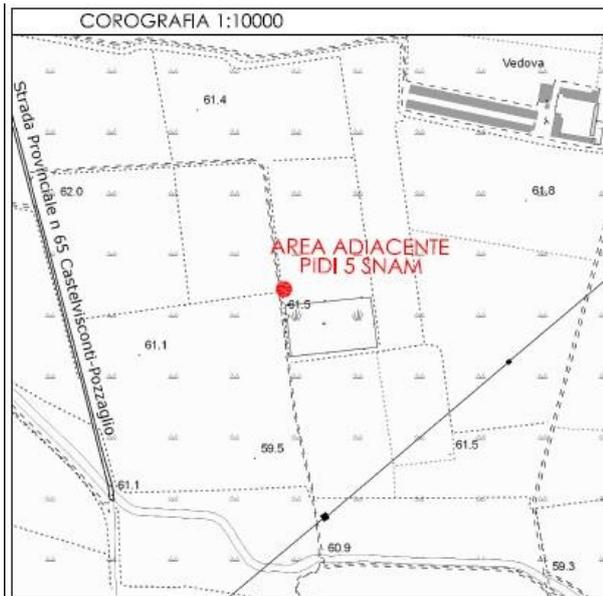
Coordinate:

GEOGRAFICHE WGS84

NORD	45°16'14.83"
EST	9°57'40.33"

PIANE GAUSS-BOAGA

NORD	5013521,40
EST	1575427,68
Q.S.L.M.	60.50



Data di attivazione	19 Dicembre 2013
Sismometro	Sara SSBHV
Monumentazione	Pozzetto 150 m
Profondità sensore l.m.	-89,5
N. componenti	3
Tipologia di sensore	Sismometro a corto periodo
Acquisitore	Dymas 24
Numero canali	3
Tipo acquisizione	Continua h24
Frequenza di campionamento	200 Hz
Alimentazione	2 pannelli solari 150 W
Trasmissione dati	Modem GSM
GPS	Si
Accelerometro	-

Questo documento è di proprietà Snam-Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio microsismico (2023)

PAG. 27 DI 32

BO04



Casalmorano



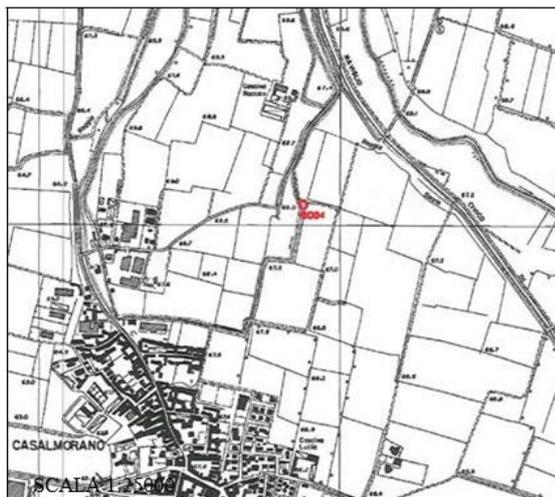
Coordinate:

GEOGRAFICHE WGS84

NORD	45°17'39.910"
EST	9°54'12.795"

PIANE GAUSS-BOAGA

NORD	5016074,27
EST	1570875,84
Q.S.L.M.	65.79



Data di attivazione	19 Luglio 2016
Sismometro	Le3DLite MKIII
Monumentazione	Superficie
Profondità sensore l.m.	64.9
N. componenti	3
Tipologia di sensore	Sismometro a corto periodo
Acquisitore	Dymas 24
Numero canali	3
Tipo acquisizione	Continua h24
Frequenza di campionamento	200 Hz
Alimentazione	2 pannelli solari da 150 W
Trasmissione dati	Modem GSM
GPS	Si
Accelerometro	-

Questo documento è di proprietà Snam-Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio microsismico (2023)

PAG. 28 DI 32

BO05

Castelvisconti



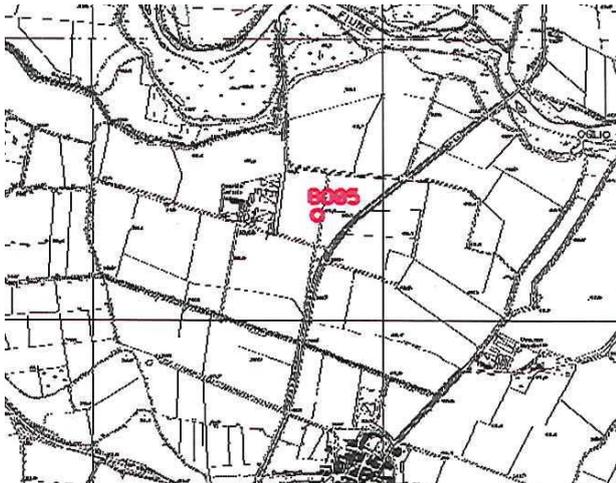
Coordinate:

GEOGRAFICHE WGS84

NORD	45°18'52.922"
EST	9°56'27.413"

PIANE GAUSS-BOAGA

NORD	5018360,92
EST	1573781,59
Q.S.L.M.	48.40



Data di attivazione	01 Dicembre 2016
Sismometro	Le3DBH
Monumentazione	Pozzetto 70 m
Profondità sensore l.m.	-22.60
N. componenti	3
Tipologia di sensore	Sismometro a corto periodo
Acquisitore	Dymas 24
Numero canali	3
Tipo acquisizione	Continua h24
Frequenza di campionamento	200 Hz
Alimentazione	2 pannelli solari da 150 W
Trasmissione dati	Modem GSM
GPS	Si
Accelerometro	-

Questo documento è di proprietà Snam-Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio microsismico (2023)

PAG. 29 DI 32

BO06

Verolavecchia



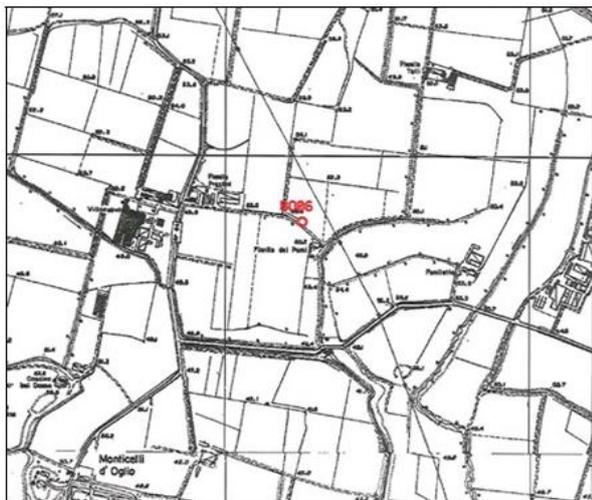
Coordinate:

GEOGRAFICHE WGS84

NORD	45°17'25.660"
EST	10°02'54.867"

PIANE GAUSS-BOAGA

NORD	5015772,32
EST	1582252,89
Q.S.L.M.	51.43



Data di attivazione	20 Luglio 2016
Sismometro	Le3DLite MKII
Monumentazione	Superficie
Profondità sensore l.m.	50.5
N. componenti	3
Tipologia di sensore	Sismometro a corto periodo
Acquisitore	Dymas 24
Numero canali	3
Tipo acquisizione	Continua h24
Frequenza di campionamento	200 Hz
Alimentazione	2 pannelli solari da 150 W
Trasmissione dati	Modem GSM
GPS	Si
Accelerometro	-

Questo documento è di proprietà Snam-Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

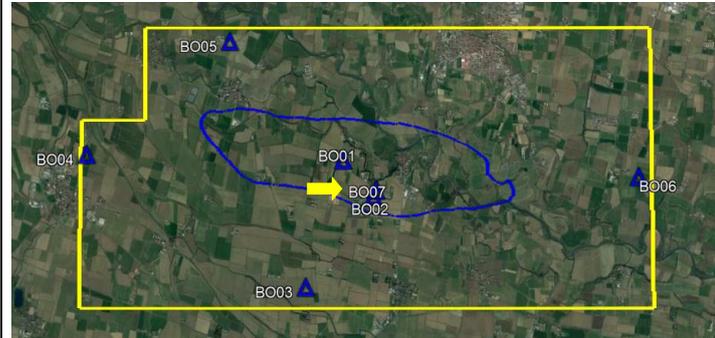
Monitoraggio microsismico (2023)

PAG. 30 DI 32

BO07



Bordolano



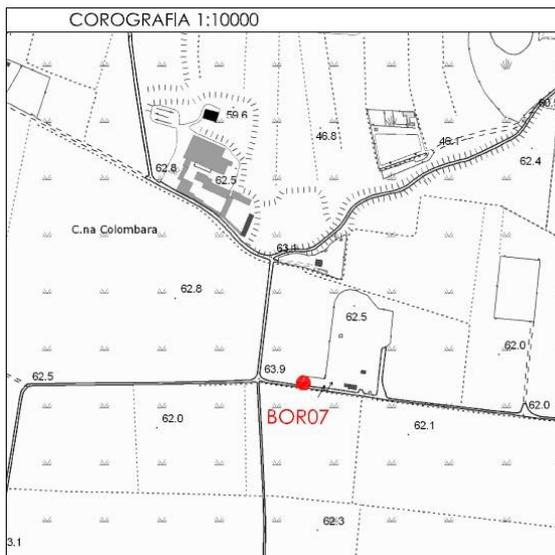
Coordinate:

GEOGRAFICHE WGS84

NORD	45°17'13.193"
EST	9°58'43.971"

PIANE GAUSS-BOAGA

NORD	5015318,79
EST	1576792,35
Q.S.L.M.	62.11



Data di attivazione	15 Luglio 2014
Sismometro	Le3DLite MKII
Monumentazione	Superficie
Profondità sensore l.m.	61.2
N. componenti	3
Tipologia di sensore	Sismometro a corto periodo
Acquisitore	Dymas 24
Numero canali	3
Tipo acquisizione	Continua h24
Frequenza di campionamento	200 Hz
Alimentazione	Rete elettrica
Trasmissione dati	Modem GSM
GPS	Si
Accelerometro	-

Questo documento è di proprietà Snam-Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.

**ALLEGATO 2****ELENCO DEI SISMI REGIONALI REGISTRATI DALLA RETE DI SUPERFICIE DI BORDOLANO
NEL 2023⁽¹⁾**

Nell'elenco sono riportati tutti gli eventi regionali registrati dalla rete Stogit di Bordolano, per i quali si riportano in tabella le localizzazioni ed i valori di magnitudo estratti dal sito internet di INGV.

I tempi sono riferiti all'ora di Greenwich.

Le distanze sono calcolate dal centro del giacimento, di coordinate LAT 45.29° e LONG 9.96°.

Gli eventi indicati con l'asterisco (*) sono eventi che non sono stati individuati in automatico, in quanto registrati da un numero limitato di stazioni, in coerenza con i dati progettuali della rete per tali distanze e valori di magnitudo. Detti eventi sono stati comunque oggetto di analisi manuale.

DATA	ORA (UTC)	ML	Provincia Epicentro	LATITUDINE (Gradi decimali)	LONGITUDINE (Gradi decimali)	Prof. (km)	Distanza (km)
11.04.2023	18:35:50	2.4	Brescia	45.2718	10.1312	7	12
28.07.2023	01:05:48	2.4	Brescia	45.4548	10.0770	9	23
28.09.2023*	02:37:07	2.4	Piacenza	44.9355	9.6567	9	46.7
30.09.2023*	03:28:13	2.4	Piacenza	44.9377	9.7273	21	43.7
30.09.2023*	12:28:58	2.4	Piacenza	44.9210	9.7503	24	44.7
04.10.2023	07:07:34	3.0	Bergamo	45.6303	9.6763	8	44
05.10.2023	01:07:50	2.6	Piacenza	44.9178	9.6862	20.4	47.4
07.10.2023	08:33:18	2.6	Piacenza	44.9195	9.6647	23.2	47.8
08.10.2023	21:08:31	2.4	Piacenza	44.9083	9.7245	23.2	47
10.10.2023	03:20:24	2.7	Piacenza	44.9357	9.7188	20.5	44.2
11.10.2023	22:40:05	2.2	Bergamo	45.6095	9.6762	4.5	42
13.10.2023*	05:19:54	2.5	Piacenza	44.9183	9.7310	21.5	45.6



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio microsismico (2023)

PAG. **32** DI 32

13.10.2023*	05:42:57	2.7	Piacenza	44.9233	9.7013	23.6	46.1
13.10.2023*	06:17:15	2.9	Piacenza	44.9330	9.7268	25	44.2
13.10.2023	07:25:30	3.7	Piacenza	44.9255	9.7023	22	48

⁽¹⁾ Le localizzazioni contenute in questa tabella sono state estratte dal bollettino sismico dell'INGV in data 09.01.2024.

ELENCO ΔT_{S-P} DELLA STRUMENTAZIONE DI POZZO PROFONDO DI BORDOLANO NEL 2023

DATA	ORA (UTC)	ΔT_{S-P} (<i>sec</i>)
-------------	------------------	---

Questo documento è di proprietà Snam-Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.