

Approfondimento Sismicità e Subsidenza nel permesso di ricerca per risorse geotermiche “Montecchio Precalcino”

Indice

Indice	2
1 Introduzione	3
2 Potenziale sismico dell’area	4
2.1 Parametri considerati	4
2.2 Normativa vigente	5
2.3 Sismicità storica	9
2.4 Sismicità strumentale	11
2.4.1 Banca dati ISIDe	11
2.4.2 Rete sismometrica di OGS	13
2.5 Faglie capaci e perforazioni esistenti	16
2.6 Sismicità indotta	18
2.7 Subsidenza	26
2.8 Monitoraggio della Subsidenza	27
2.8.1 Stazione permanente GNSS (OGS-CRS)	27
2.8.2 Infrastruttura di monitoraggio con tecniche satellitari (CNR-IREA)	28
2.9 Monitoraggio Sismico	30
3 Risultati	34
4 Discussioni e Conclusioni	35

1 Introduzione

Il documento in oggetto è stato commissionato dalla Soc. Lifenergy S.r.l., titolare del Permesso di Ricerca (PR). “Montecchio Precalcino”, provincia di Vicenza, per ricerca di risorse geotermiche, ed ha come oggetto l’analisi della sismicità e la possibilità di innesco di fenomeni sismici e di subsidenza concomitanti alla realizzazione e successive prove di produzione, dei pozzi esplorativi profondi “Montecchio Precalcino 1” e “Montecchio Precalcino 2” per i quali è previsto il raggiungimento delle profondità di circa 4300 m dal p.c..

L’analisi sismica ha preso in considerazione i) la normativa vigente con la consultazione della classificazione sismica della Regione Veneto (aggiornata in attuazione dell’ O.P.C.M. 3519/2006 ed ai sensi del D.M. 14 gennaio 2008), ii) la classificazione delle aree sismogenetiche (INGV, 2004) e iii) i valori di Peak Ground Acceleration (PGA).

La definizione della sismicità si basa sui dati di sismicità storica, in un intervallo temporale dal 471 a.C. fino al 1997 e i dati di sismicità strumentale per gli anni compresi tra il 1985 ed il 2014. Per l’analisi della sismicità recente strumentale sono state consultate: la banca dati ISIDe, dell’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e la rete integrata dell’Italia Nord-Orientale gestita dall’OGS.

La necessità di esprimere un giudizio in merito alle richieste del committente sull’eventualità che le attività di perforazione, e successive prove di produzione, possano indurre terremoti e fenomeni di subsidenza, ha determinato la necessità di inquadrare l’assetto tettonico dell’area. In particolare, sono state consultate le banche dati ITHACA (ITaly HAZard from CAPable faults) e DISS version 3 (Database of Individual Seismogenic Sources), nonché numerose pubblicazioni scientifiche (Sugan & Peruzza, 2011; Galadini et al., 2005; Poli et al. 2008; Scardia et al., 2014) allo scopo di verificare la presenza, in un’area prossima al PR. Montecchio Precalcino, di faglie capaci e sorgenti sismogeniche così come descritte e definite rispettivamente dal sito stesso dell’ISPRA (<http://sgi.isprambiente.it/geoportal/catalog/content/project/ithaca.page>) e dal sito dell’INGV (<http://diss.rm.ingv.it/diss/KML-HTMLoptions.html>).

La possibilità di correlazione tra perforazioni, sfruttamento di georisorse ed innesco di terremoti, è un argomento di grande attualità, ad oggi sotto i riflettori del contesto nazionale anche a seguito del recente caso del rapporto ICHESE, e trattato ampiamente negli ultimi decenni anche a scala internazionale. Da qui l’esigenza di dedicare parte dell’elaborato ad una approfondita descrizione di casi bibliograficamente noti in merito alla sismicità indotta, in modo da fornire al committente un quadro il più completo possibile degli studi attualmente pubblicati.

A conclusione della presente relazione vengono forniti consigli sulla pianificazione di un opportuno sistema di monitoraggio sismico e geodetico, necessario in termini di controllo e sicurezza durante le attività previste dal progetto. E' stato infatti previsto un monitoraggio sismico attraverso l'installazione di almeno 5 stazioni localizzate in prossimità dei pozzi di perforazione, a circa 4-5 km in direzione NW ed a circa 8 km in direzione SW oltre la linea di faglia Schio-Vicenza. E' previsto inoltre il monitoraggio della subsidenza con la realizzazione di una stazione GNSS (*Global Navigation Satellite System*) permanente di precisione e mediante l'utilizzo di tecniche avanzate di Radar ad Apertura Sintetica Interferometrica (InSAR) che consentono di misurare le deformazioni al suolo e l'evoluzione degli spostamenti misurati nell'area di studio, con precisione centimetrica e in alcuni casi millimetrica.

2 Potenziale sismico dell'area

2.1 Parametri considerati

Lo studio della sismicità si concentra in un'area limitrofa al cantiere di perforazione, in un intorno di circa 50 km di raggio intorno al capoluogo di Montecchio Precalcino, situato a circa 3-4 km in direzione N-E rispetto al cantiere stesso. Oltre alle note classificazioni sismiche in cui il territorio è suddiviso secondo le attuali normative vigenti, abbiamo analizzato i dati relativi alla sismicità storica e quelli relativi alla sismicità strumentale. I dati sismici di input consultati per la stesura della seguente relazione vengono qui di seguito elencati:

1. Normativa vigente
 - ✓ Classificazione sismica della Regione Veneto (aggiornata in attuazione dell'O.P.C.M. 3519/2006 ed ai sensi del D.M. 14 gennaio 2008);
 - ✓ Classificazione in aree sismogenetiche (INGV, 2004);
 - ✓ Peak Ground Acceleration (PGA) dell'area;
2. Sismicità storica
 - ✓ Database Macrosismico Italiano (DBMI11);
 - ✓ Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI11);
3. Sismicità strumentale
 - ✓ Banca dati ISIDe (Italian Seismological Instrumental and Parametric Data-Base (INGV);
4. Faglie capaci e perforazioni esistenti
 - ✓ Banca dati delle faglie capaci ITHACA (ITaly HAZard from CAPable faults) e DISS version 3 (Database of Individual Seismogenic Sources);

- ✓ Banca dati delle perforazioni profonde eseguite sul territorio italiano (UNMIG – Ministero dello Sviluppo Economico, VIDEPI – Visibilità dei dati afferenti all’attività di esplorazione petrolifera in Italia).

2.2 Normativa vigente

L’area di ricerca esplorativa si trova in zona di pericolosità sismica 3, secondo l’O.P.C.M. 3274 del 20 marzo 2003 (Fig. 1).

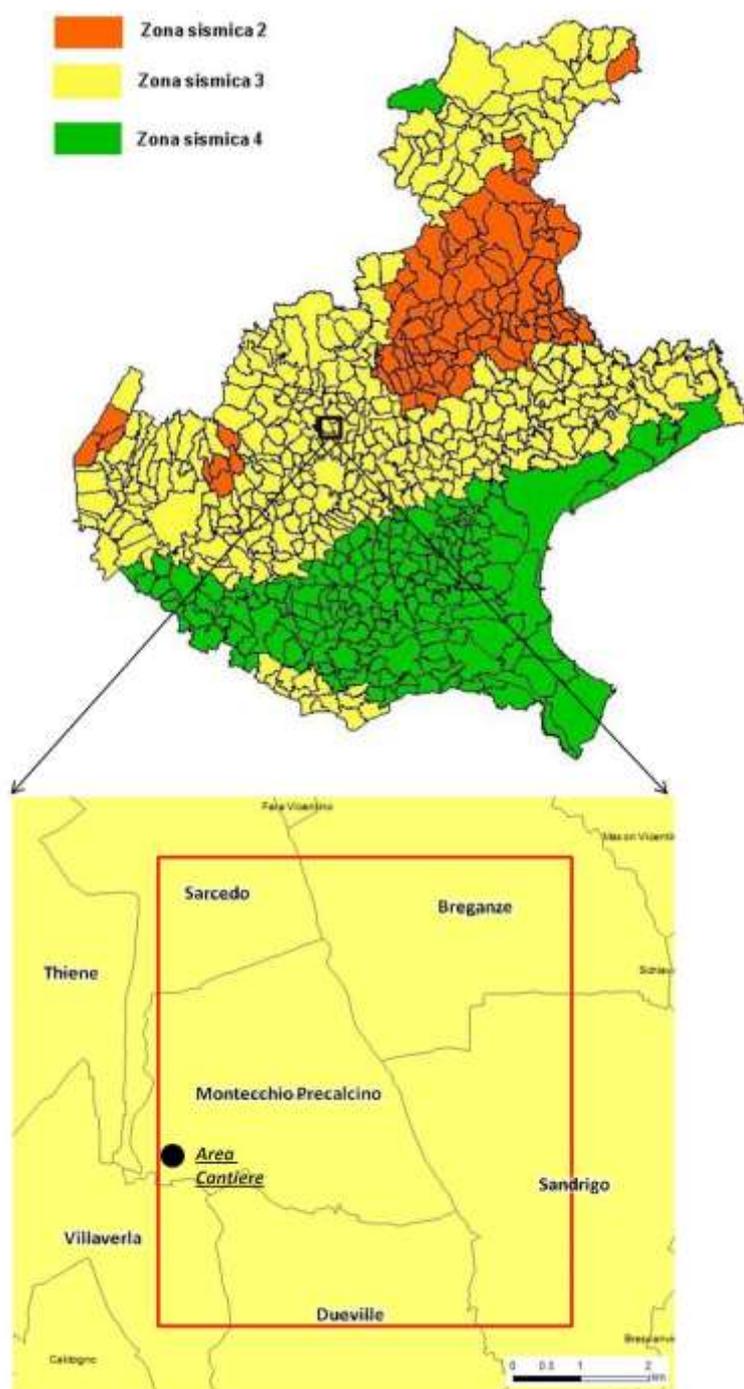


Fig. 1. Classificazione sismica regionale vigente. Il cerchio nero localizza l’area di cantiere.

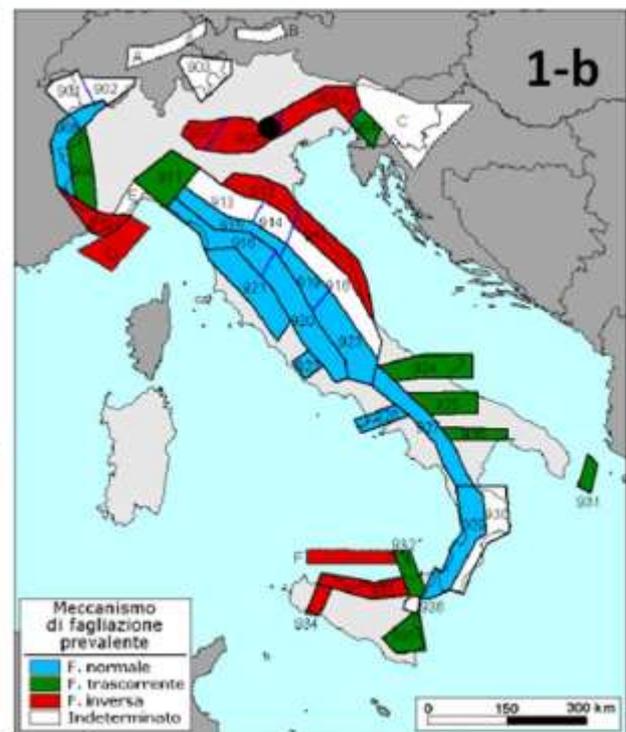
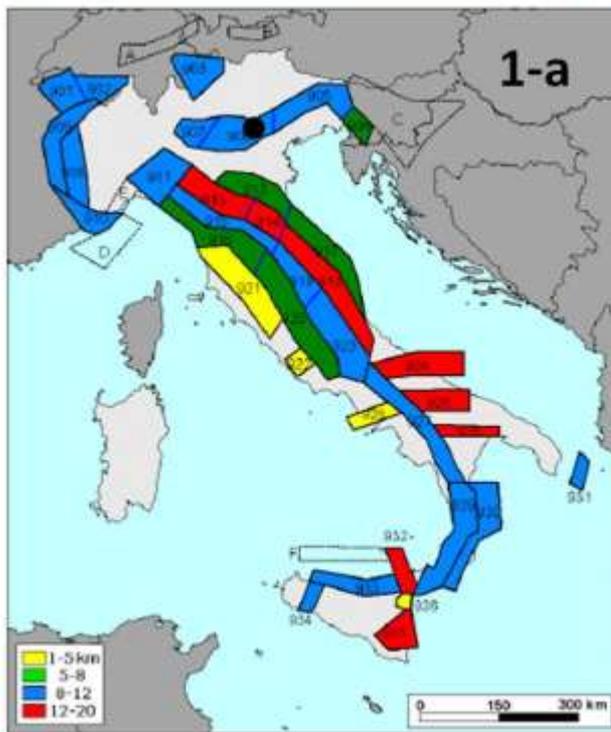
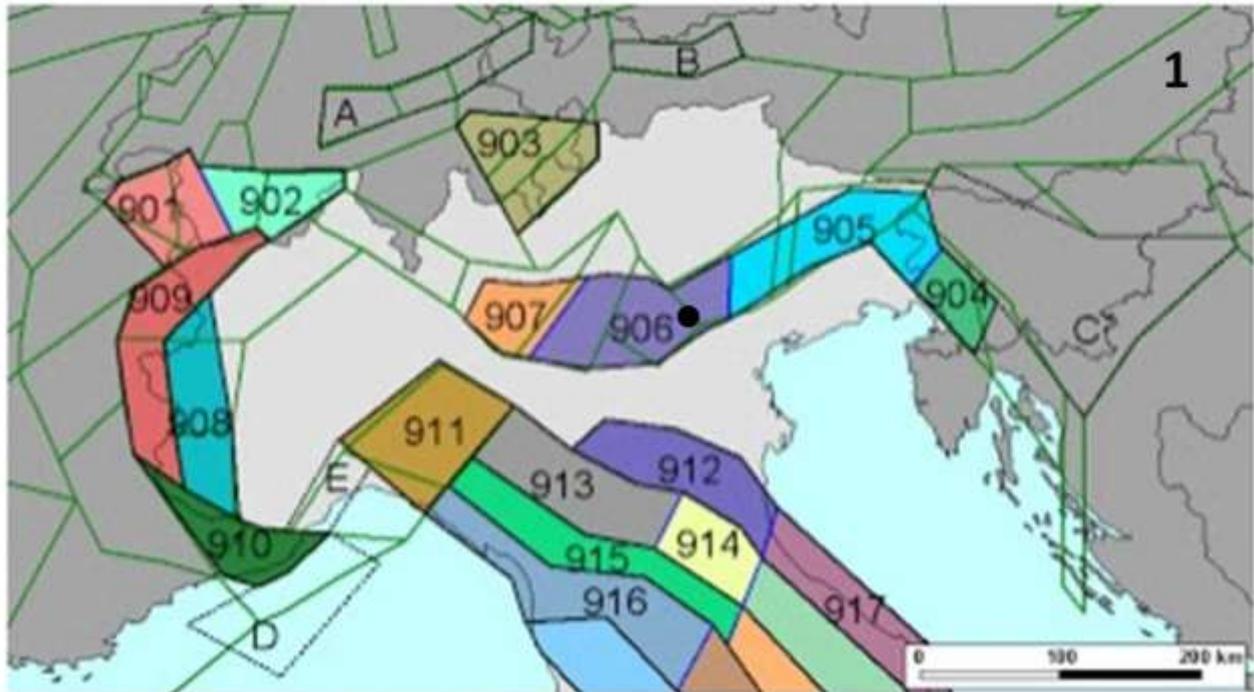


Fig. 2. Zonazione sismogenetica ZS9 (1, 1-a, 1-b) da Meletti et al.,(2004). L'area di interesse ricade nella zona 906 (ZS9) relativa alla zona sorgente “Arco Alpino” (1), profondità efficace da 8-12 km (1-a) e meccanismo di fagliazione prevalente con faglie inverse (1-b).

In base alla consultazione della Zonazione sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004) ed in aggiornamento alla precedente zonazione ZS4, l'area di interesse ricade all'interno della zona 906 (Fig. 2).

L'area esplorativa si localizza all'interno della zona-sorgente “Arco Alpino” 906 che si colloca, assieme ad altre 2 zone (904 e 905), nel settore in cui è osservata la massima convergenza tra le placche adriatica e quella europea, caratterizzato da strutture a pieghe sud-vergenti del Sudalpino orientale e faglie inverse associate (Zanferrari et al., 2002; Slejko et al., 1989; Valensise e Pantosti, 2001; Peruzza et al., 2002 e Galandini et al., 2002) e, nelle aree ad est del confine friuliano, da faglie trascorrenti destre con direzione NW-SE (Bernardis et al., 2000; Baje et al., 2001; Vrabec, 2001). Nel dettaglio, la zona 906 interessa l'area che va dal Bassano del Grappa a Verona e presenta caratteristiche sismiche nettamente diverse dall'adiacente zona 905.

La zona sismogenetica Z906 ricade (Meletti et al., 2000) in un'area a tettonica compressiva con media-bassa sismicità, che solo sporadicamente può raggiungere valori di magnitudo $ML > 4.5$.

La profondità efficace di questa sismicità è variabile tra 5 e 8 km e con meccanismo di faglia prevalente inverso.

I valori di profondità efficaci relativi alla zona 906 sono riassunti in Tab. 1

Zona	Numero di Eventi Md>2	Numero di Eventi Md>2.5	Numero di Eventi Md>3	Magnitudo massima (Md)	Classe di profondità (km)	Profondità efficace (km)
906	41	34	13	4,7	5-8	8

Tab. 1. Valori di profondità efficaci relativi alla zona 906 in cui ricade l'area del PDR di interesse (estratti da Meletti e Valensise, 2004).

A questa sismicità sono associati valori di accelerazione massima del suolo (Peak Ground Acceleration - PGA) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, riferita ai suoli rigidi compresi tra 0.152 e 0.150.

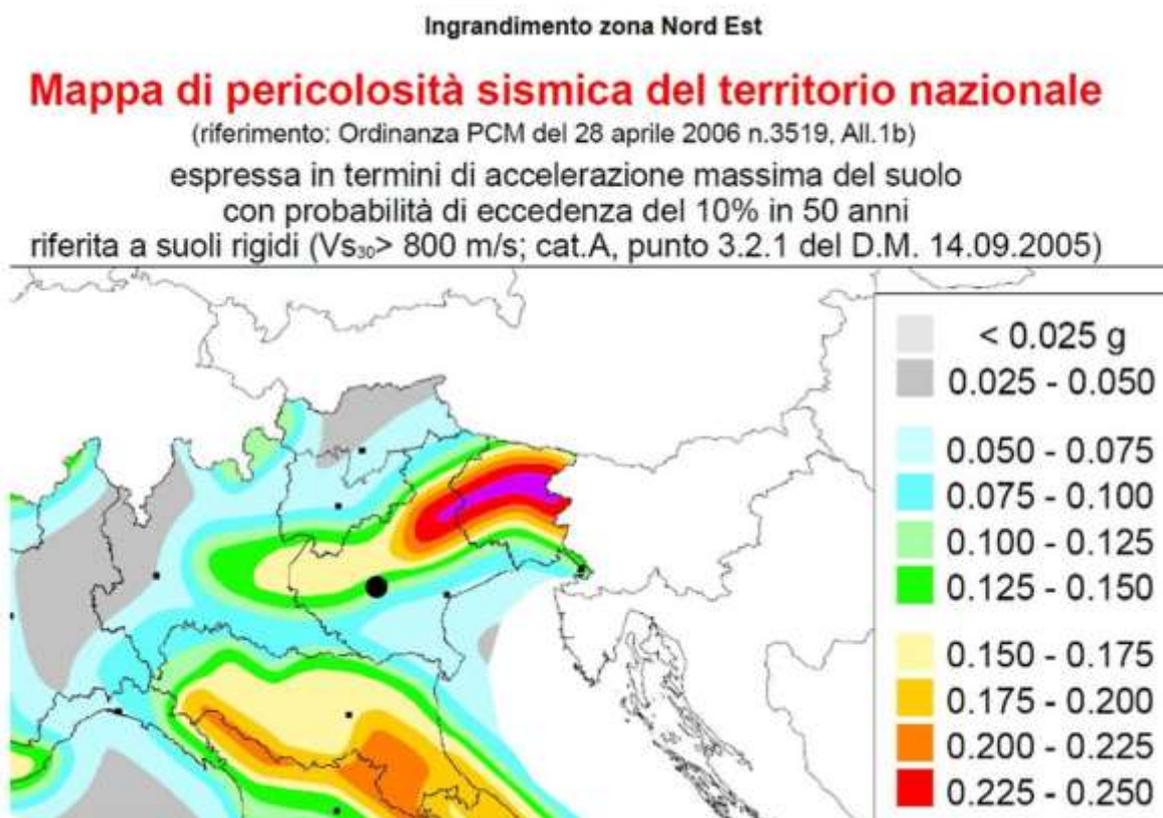


Fig. 3. Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale (Ordinanza PCM del 28 aprile 2006 n.3519, All.1b) con il cerchio nero è evidenziata l'area di interesse.

La PGA è la misura della massima accelerazione del suolo (corrispondente al 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni) indotta dal terremoto e viene misurata in accelerazione di gravità (g). In base al valore massimo del PGA misurato o prevedibile, il territorio veneto risulta suddiviso in zone sismiche secondo gli intervalli in legenda di

Fig. 3.

Il raggruppamento dei valori di PGA secondo i limiti previsti dall'ordinanza 3274 della PCM per l'inserimento dei comuni in una delle quattro fasce sismiche corrispondenti:

- zona 1: $PGA > 0.25g$
- zona 2: $0.15 \leq PGA < 0.25g$
- zona 3: $0.05 \leq PGA < 0.15g$
- zona 4: $PGA < 0.05g$

L’area esplorativa in oggetto presenta accelerazioni PGA fino ad un massimo di 0.150 g che caratterizzano le zone di pericolosità Zona 3. Questi valori di accelerazione (compresi tra 0.100 e 0.150) rappresentano zona con pericolosità sismica medio-bassa, che può essere soggetta a scuotimenti forti (Tab. 2).

Acceleration (g)	Velocity (cm/s)	Perceived Shaking
< 0.0017	< 0.1	Not felt
0.0017 - 0.014	0.1 - 1.1	Weak
0.014 - 0.039	1.1 - 3.4	Light
0.039 - 0.092	3.4 - 8.1	Moderate
0.092 - 0.18	8.1 - 16	Strong
0.18 - 0.34	16 - 31	Very strong
0.34 - 0.65	31 - 60	Severe
0.65 - 1.24	60 - 116	Violent
> 1.24	> 116	Extreme

Tab. 2. Potenziali danni per eventi sismici con diverse classi di accelerazione al suolo indotta da terremoti.

2.3 Sismicità storica

L’analisi della sismicità storica dell’area si basa sui dati disponibili *online*. Nel dettaglio, sono stati consultati i database macrosismico italiano 2011 (DBMI11 – finestra temporale 1000 – 2006 – num. Osservazioni 86071 e num. Terremoti 1681) ed il catalogo parametrico del territorio italiano (CPTI11 – finestra temporale 1000 – 2006 e num. terremoti 3182).

In sintesi, sono stati individuati i sismi documentati per i comuni di appartenenza al permesso di ricerca: Montecchio Precalcino, Villaverla, Sarcedo e Breganze. I dati ottenuti dalla consultazione della banca dati sono sintetizzati in Tab.4. (Fig.10). Non sono disponibili in questo database *online*, i dati di sismicità storica relativi ai comuni di Dueville e Sandrigo ricadenti sempre all’interno del permesso di ricerca.

Storia sismica di Montecchio

Precalcino

[45.665, 11.564]

Effetti

I [MCS]	Data	Ax	Np	Io
5	1891	Valle d’Illasi	403	8-9
4	1895	Slovenia	296	8
4	1989	Pasubio	779	6-7

Storia sismica di Sarcedo

[45.707, 11.528]

Effetti

I [MCS]	Data	Ax	Np	Io
4-5	1989	Pasubio	779	6-7
3	1998	Appennino umbro-marchigiano	408	6
3-4	2001	Merano	663	6
NF	2002	Franciacorta	770	5-6

Storia sismica di Breganze

[45.707, 11.565]

Effetti

I [MCS]	Data	Ax	Np	Io
5	1891	Valle d’Illasi	403	8-9
F	1892	Valle d’Alpone	160	6-7
NF	1894	Valle d’Illasi	116	6
4	1989	Pasubio	779	6-7
3-4	1998	Slovenia	227	-
3	2001	Merano	663	6

Storia sismica di Villaverla

[45.652, 11.492]

I [MCS]	Data	Ax	Np	Io
NF	1898	Romagna settentrionale	73	6-7
3-4	1987	Reggiano	802	6
4-5	1989	Pasubio	779	6-7
2-3	1998	Slovenia	227	-
3-4	2001	Merano	663	6

Tab. 3. Eventi sismici registrati dalla banca dati DBMI11 dell’INGV nel comune di Montecchio Precalcino che interessa il P.R. “Montecchio Precalcino” e nei comuni limitrofi di Sarcedo, Breganze e Villaverla (<http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11/>). I campi delle tabelle descrivono: I[MCS] intensità del terremoto avvertito nel comune di interesse; Data – anno di accadimento dell’evento; Ax - Area dei maggiori effetti (dal catalogo strumentale, dallo studio macrosismico o dal catalogo macrosismico); Np - Numero di osservazioni macrosismiche (da banca dati DBMI10beta); Io - Intensità epicentrale (determinata con il metodo Boxer (Gasperini et al., 1999), oppure adottata dal catalogo macrosismico di origine).

Come rilevabile da Tab. 3 gli eventi sismici più significativi a Montecchio Precalcino sono quelli del 1891 (I [MSC] 5) localizzato in Valle d’Illasi, del 1895 (I [MSC] 4) localizzato in Slovenia e del 1989 (I [MSC] 4) localizzato in Pasubio.

Le coordinate della localizzazione degli eventi storici risentiti nei comuni d’interesse non sono disponibili se non nelle descrizioni espresse da Tab. 3.

2.4 Sismicità strumentale

Relativamente alla sismicità strumentale, sono state consultate le banche dati dell’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e della Rete Sismometrica di OGS, che hanno consentito di analizzare l’evoluzione recente della sismicità nell’area di interesse.

La banca dati ISIDe (Italian Seismological Instrumental and parametric Data-basE) è stata utilizzata nel periodo tra il 1985 ed il 2014, in un intorno di 50 km dal paese di Montecchio Precalcino, il capoluogo situato in prossimità del cantiere di perforazione.

La rete integrata dell’Italia Nord-Orientale gestita dall’OGS, che documenta la sismicità dell’area solo nell’ultimo decennio (Sugan e Peruzza, 2011), è stata utilizzata per individuare gli eventi sismici più recenti verificatesi in un intorno di 30 km dalla località di Levà, località situata sempre nei pressi del cantiere di perforazione.

Nelle banche dati consultate non sono presenti informazioni sismiche precedenti al 1985.

2.4.1 Banca dati ISIDe

La Banca dati ISIDe fornisce tutti i parametri fondamentali degli eventi sismici integrati giornalmente con i dati in tempo quasi-reale del Bollettino Sismico Italiano (*Italian Seismic Bulletin*).

Gli eventi estratti sono 443 con magnitudo variabile tra 0.1 a 4.3 ML ed ipocentri variabili tra 0.8 e 23 km. Solo 19 eventi su 443 hanno una magnitudo ML > 3, con ipocentro variabile tra 2 e 23 km. Questi 19 eventi sono localizzati ad una distanza minima di circa 17 km dall’area di ricerca (Fig. 4).

L’andamento della cumulata del momento sismico (Fig. 5) mostra trend lineari, che evidenziano un rate di rilascio dell’energia sismica costante nel tempo, interrotti da bruschi salti rappresentativi del verificarsi di eventi sismici. Se si considera che il rate di sismicità è indice dello scorrimento lungo piani di faglia, la sua diminuzione indica una altrettanta diminuzione degli scorrimenti ed il conseguente aumento degli accumuli di stress nell’area. Coerentemente lo stress accumulato viene rilasciato attraverso scorrimenti “più veloci” e quindi con una sismicità più intensa nella quale sono evidenziati gli eventi sismici con magnitudo superiore a 3 (Fig. 5). Le ragioni di queste variazioni nel rate sismico non sono note. Variazioni simili sono spesso riconosciute in molte zone sismiche del mondo e sono riconducibili a meccanismi del tutto naturali. Per ragioni non del tutto chiare lo scorrimento lungo i piani delle faglia

sismogenetiche si blocca sia a causa di una diminuzione dello stress regionale nell’area che per la creazione di zone di attrito (asperità) lungo i piani di faglia. Non si conoscono attualmente possibili attività estrattive e/o di perforazione profonda svolte sul territorio che possano aver in qualche maniera determinato e/o possano giustificare tali variazioni di sismicità.

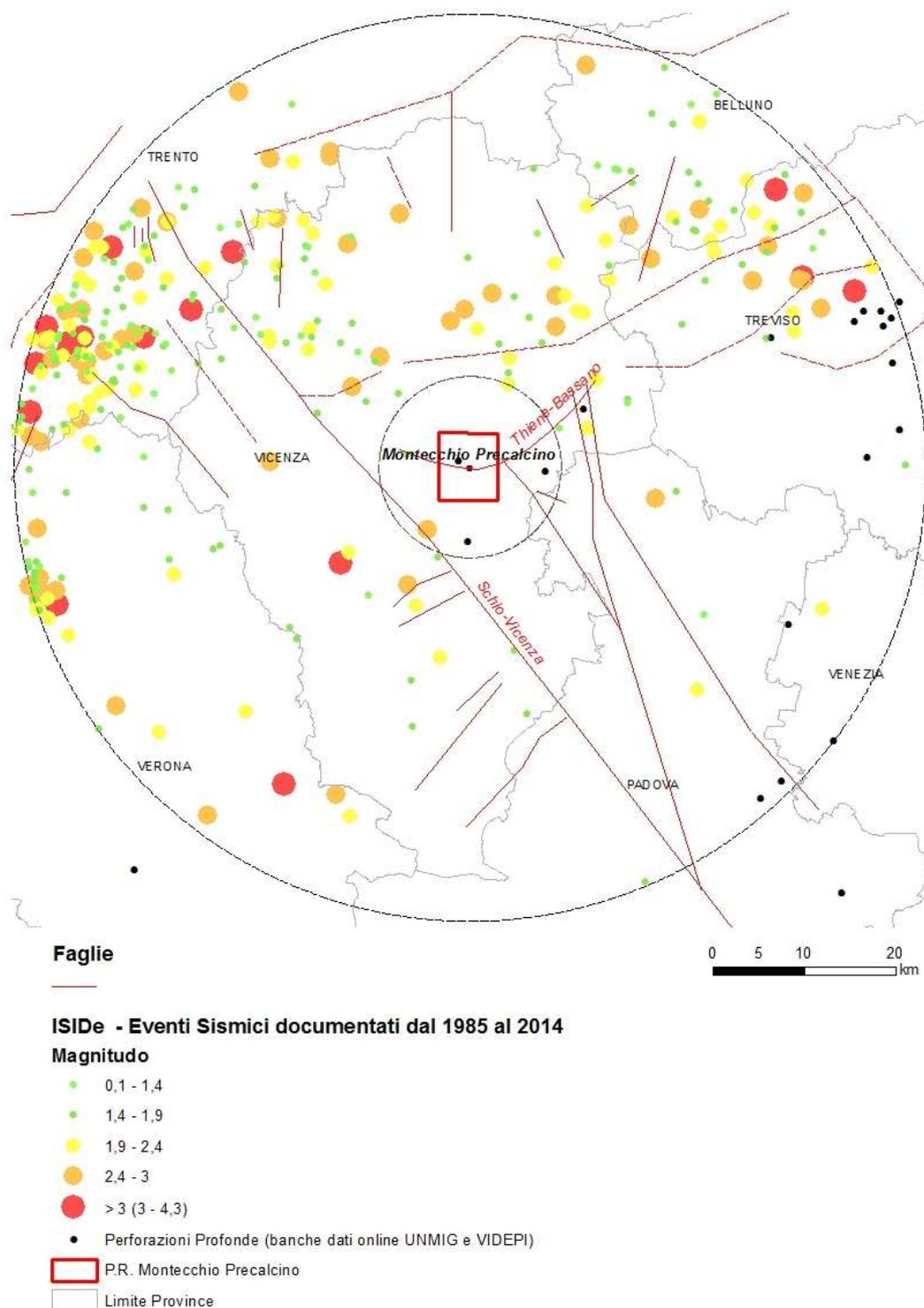


Fig. 4 - Eventi sismici estratti dalla banca dati ISIDE dell'INGV all'interno di un raggio di 50 km da Montecchio Precalcino. Gli eventi con $M > 3$ sono localizzati ad una distanza minima di 17 km.

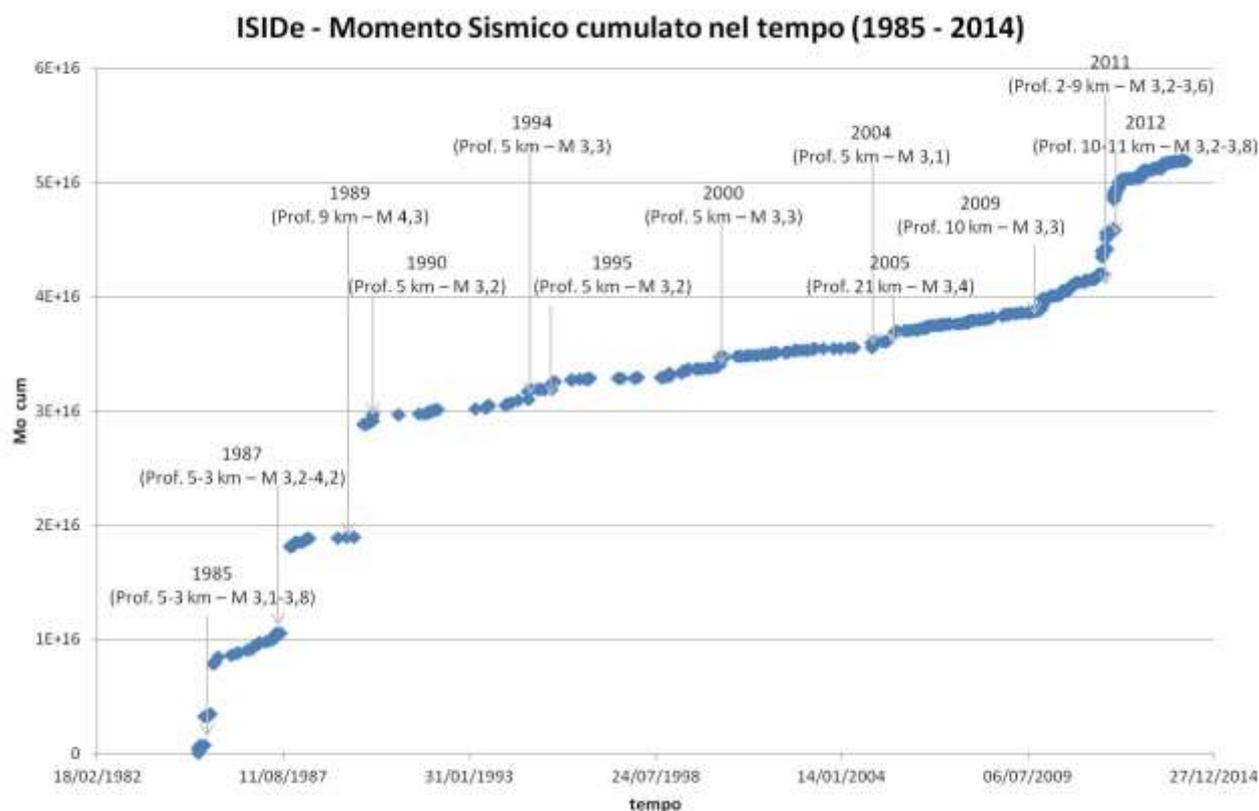


Fig. 5 – Cumulata del Momento Sismico nel tempo espressa a partire dal primo evento registrato nel 1985. Le frecce mettono in evidenza gli eventi con $M > 3$ registrati dal 1985 al 2014.

2.4.2 Rete sismometrica di OGS

La sismicità strumentale rilevata dalla rete integrata dell'Italia Nord-Orientale gestita dall'OGS ha permesso di estrapolare le informazioni relative agli ultimi 100 eventi entro 30 km dalla località nei pressi di Levà, e gli eventuali eventi maggiori ($M > 3.8$) dal 1977 (Fig. 6).

Come indicato dalla Fig. 6, la sismicità strumentale non evidenzia una significativa attività sismica recente, dato che gli eventi più prossimi sono localizzati ad una ventina di chilometri a Nord-Est, a ridosso del corso del Brenta. L'elaborazione è stata eseguita dal sito web *Real Time Seismology* rts.crs.inogs.it.

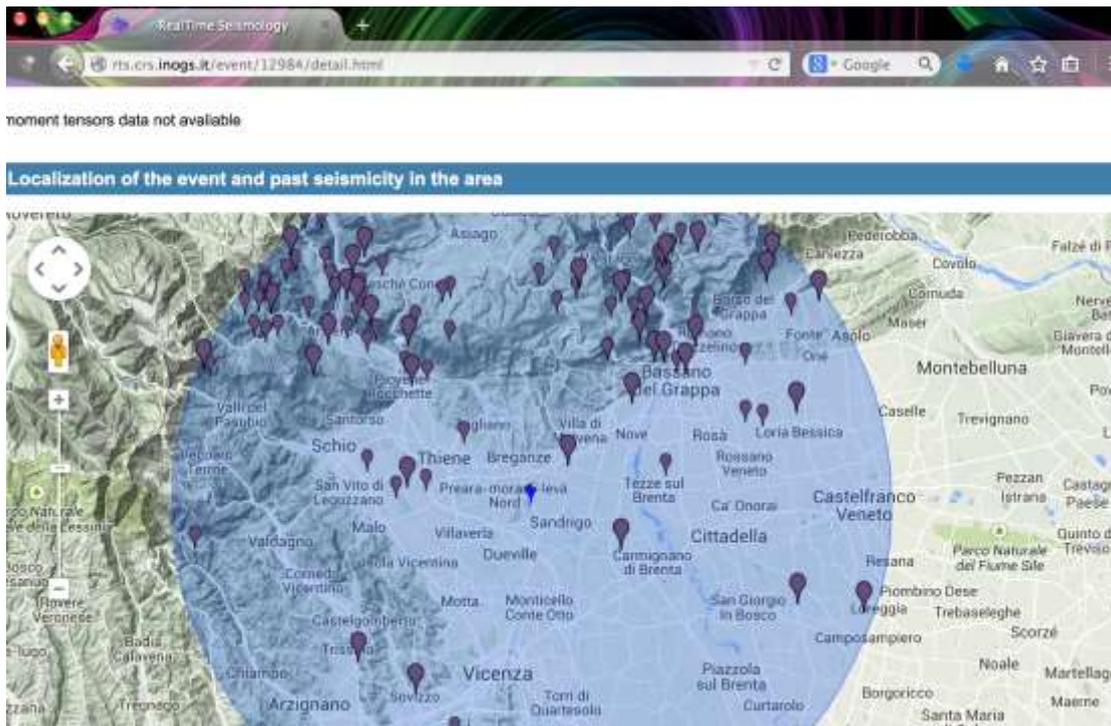


Fig. 6 – Sismicità strumentale rilevata dalla rete integrata dell’Italia Nord-Orientale gestita dall’OGS. Si riportano in mappa i 100 eventi più recenti selezionati in un intorno di 30 km dall’evento marcato in blu (dati estratti dal sito web Real Time Seismology rts.crs.inogs.it)

Analisi del Potenziale sismico dell’area

Il grado di sismicità di un’area è definibile attraverso l’analisi della relazione Gutenberg-Richter sulla distribuzione di frequenza della Magnitudo.

$$\log N = a - bM$$

Questa relazione esprime la magnitudo in funzione del logaritmo in base 10 del numero totale di terremoti in una determinata classe di magnitudo, dove N è il numero di eventi di una data magnitudo M, a & b sono costanti.

Questa è una legge di Potenza che ha come carattere distintivo il fatto che tutte le aree sismiche hanno una relazione Gutenberg-Richter con pendenza b costante e molto vicina ad 1. La Gutenberg-Richter per l’area interessata dal permesso esplorativo mostra un andamento che si discosta da quello teorico solo per Magnitudo inferiori a 2. Questo è tipico dell’incompletezza della banca dati e coincide con il limite di risoluzione della rete utilizzata di misurare in modo affidabile i terremoti $ML < 2$. Il massimo evento registrato nell’area di analisi ha magnitudo 4.3.

Una volta esclusi i dati relativi alla sismicità con magnitudo $ML < 2$ si ottiene un chiaro andamento rettilineo di Fig. 7 con valore della costante $b=0.99$ molto vicino a quello previsto ($b=1$).

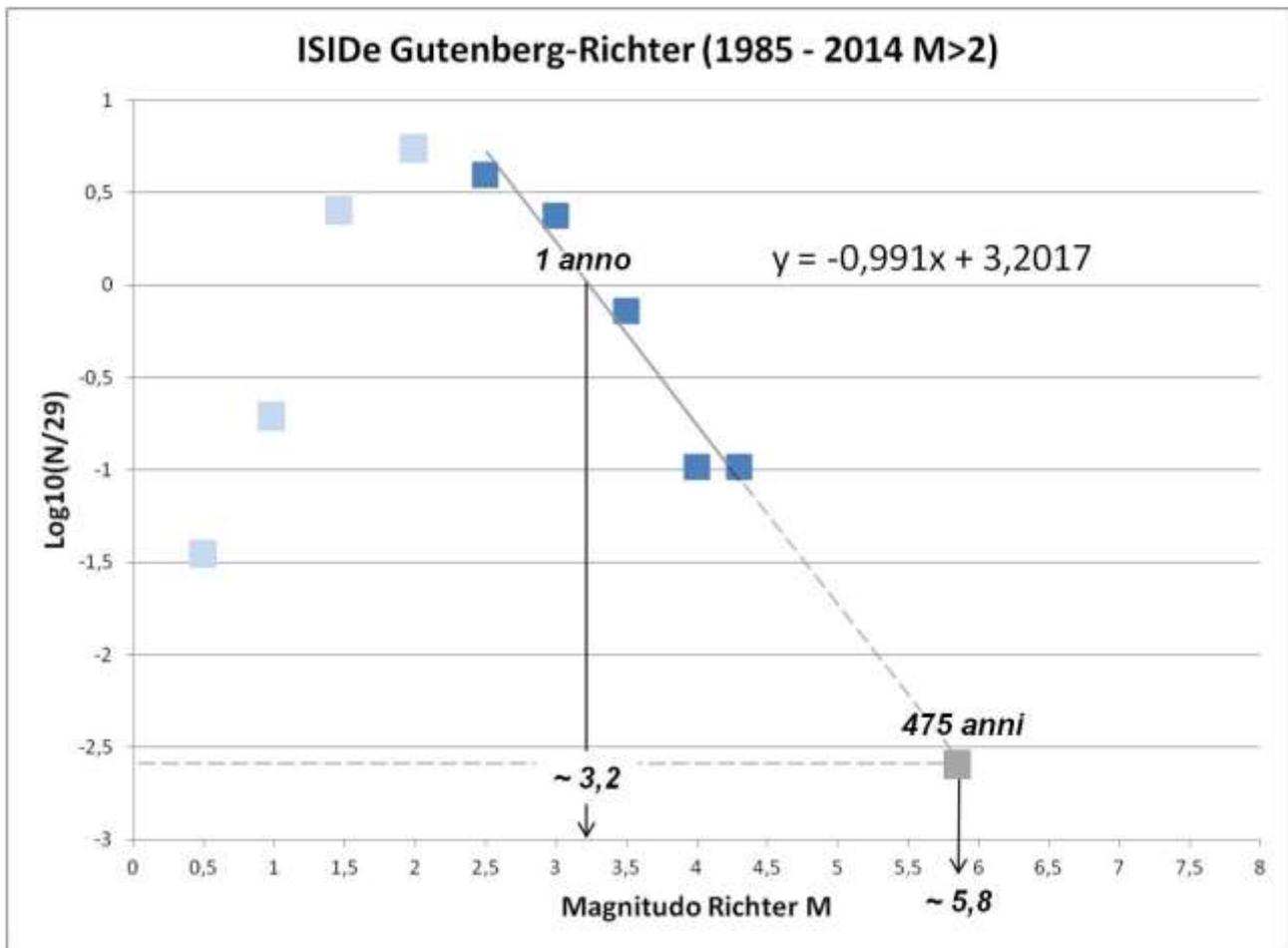


Fig. 7 – Curva Gutenberg-Richter ottenuta con i dati ricavati dalla banca dati ISIDe. La banca dati consultata risulta incompleta per registrazioni strumentali di eventi con magnitudo basse (< 2). La linea di tendenza indica un andamento lineare con coefficiente $b=0.99$ molto vicino a quello previsto.

Valori del parametro b (pendenza della retta) diversi da 1 indicano condizioni anomale del rilascio sismico di un'area ed in genere si riscontrano in aree vulcaniche dove la sismicità non è totalmente legata al campo di stress regionale oppure in aree in cui è presente un "deficit" di rilascio energetico e quindi ad alto rischio sismico. La presenza quindi di un parametro $b=0.99$ calcolato per l'area in oggetto indica condizioni totalmente "normali" e stabili nella liberazione dello stress regionale.

La relazione Gutenberg-Richter (GR) consente anche di stimare le potenzialità sismiche di un'area tettonica ed effettuare delle previsioni sul grado di sismicità atteso. Ad esempio, nel nostro caso, attraverso l'analisi della GR è possibile prevedere che l'area sarà mediamente interessata da 1 terremoto $ML=3$ ogni anno il che equivale ad 1 terremoto $ML=4.3$ ogni 10 anni ($\log(N/29)=-1$). Calcoliamo quindi per l'area intorno a Montecchio Precalcino un terremoto atteso con un periodo di ritorno di 475 anni pari a $ML=5.8$. Del tutto coerente con la Magnitudo massima media definito dalla Zonazione sismica per la zona Z906.

2.5 Faglie capaci e perforazioni esistenti

Per capire se le azioni esplorative possano in qualche maniera aumentare il potenziale sismico già naturalmente presente nell'area, abbiamo cercato di correlare la sismicità con la possibile presenza di faglie attive. A questo scopo sono state consultate le banche dati delle faglie capaci (ITHACA), disponibile dal sito di ISPRA, la banca dati DISS version 3 (Database of Individual Seismogenic Sources) dell'istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, la banca dati delle perforazioni profonde eseguite sul territorio italiano (UNMIG, VIDEPI) e sono state inoltre consultate numerose pubblicazioni scientifiche (Sugan & Peruzza, 2011; Galadini et al., 2005; Poli et al. 2008; Scardia et al., 2014).

Lineamenti tettonici dell'area

Secondo quanto riportato da Sugan e Peruzza (2011) i lineamenti tettonici principali che caratterizzano l'area di interesse sono il sistema Schio-Vicenza e Thiene-Bassano.

Gli stessi autori sottolineano come ad est del sistema di faglie Schio-Vicenza sarebbe collocato un ipotetico limite tra il distretto sismico dei Lessini, interessato prevalentemente da strutture trascorrenti orientate NW-SE, e la fascia deformativa con sovrascorrimenti ad andamento ENE-WSW della Flessura Pedemontana, caratterizzata in quest'area del sistema di faglie Thiene-Bassano (Fig. 4).

Nel dettaglio, l'area si colloca in prossimità di strutture tettoniche e faglie capaci segnalate dalla banca dati ITHACA (<http://sgi.isprambiente.it/geoportal/catalog/content/project/ithaca.page>) pubblicato da ISPRA. In base a tale database, le faglie sono definite come lineamenti “capaci”, che possono potenzialmente creare deformazione in superficie. In base a tale consultazione, l'area di cantiere risulta localizzata ad una distanza di circa 5 km a NE dalla nota e più volte citata nella relazione, faglia di Schio-Vicenza con orientazione NW-SE.

La consultazione della banca dati DISS e delle pubblicazioni scientifiche hanno invece consentito di localizzare il sistema Thiene- Bassano con orientamento ENE – WSW. La faglia attraversa l'intero permesso di ricerca e si colloca ad una distanza di oltre un chilometro dall'area di cantiere.

Nonostante l'analisi della sismicità dell'area non attribuisca specifico carattere sismogenico né alla Schio-Vicenza né alla Thiene-Bassano, le cui attività recenti sono peraltro documentate in letteratura, è stata comunque prevista la progettazione di una rete sismica di monitoraggio dedicata agli elementi strutturali più significativi descritta più dettagliatamente nei paragrafi successivi.

Perforazioni esistenti

Allo scopo di verificare possibili correlazioni tra la sismicità attuale e le operazioni estrattive seguito abbiamo confrontato la distribuzione degli eventi sismici analizzati rispetto alla localizzazione delle perforazioni profonde (> 2000) effettuate sempre nella stessa area di raggio 50 km che ha per centro il comune di Montecchio Precalcino. La posizione dei pozzi e la loro profondità sono state ricavate dalle banche dati UNMIG e VIDEPI (Fig. 4) valide per tutto il territorio nazionale.

Osservando la distribuzione areale degli eventi documentati da ISIDE rispetto alla localizzazione delle numerose perforazioni profonde (> 2000) effettuate in tutto il territorio nazionale e consultabili dalle banche dati UNMIG e VIDEPI, si nota come il cluster più denso (cluster 1) di eventi sismici, in direzione NW a circa 40 km fuori dal PR, si manifesti in aree prive di perforazioni profonde (Fig. 4). Un secondo cluster (cluster 2) di concentrazione di eventi sismici è individuato, a circa 50 km fuori dal P.R., in direzione NE. In questo caso, si nota la relativa vicinanza tra perforazioni profonde ed eventi sismici (Fig. 8).

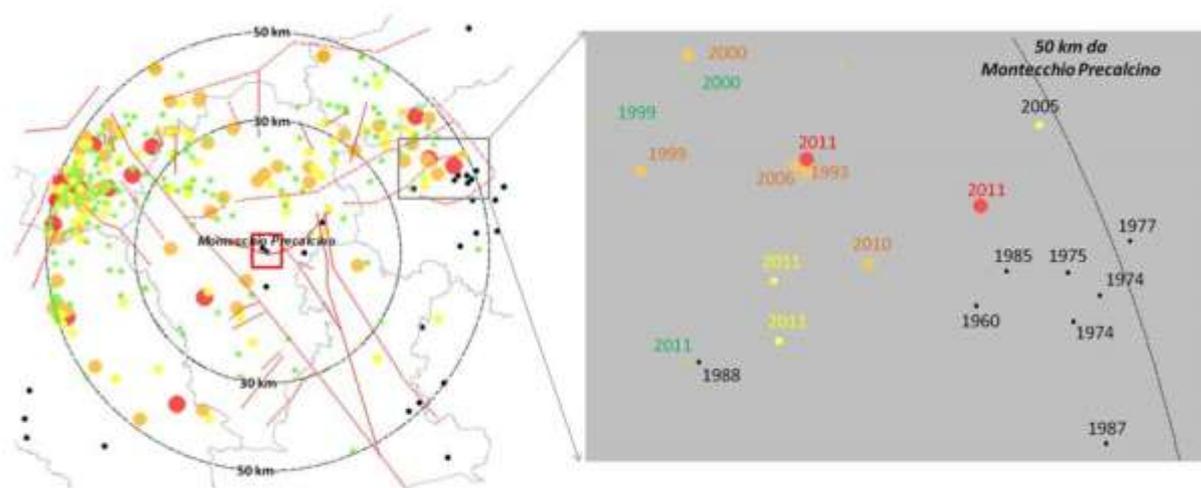


Fig. 8 - Eventi sismici e perforazioni con corrispettive datazioni (per la legenda vedere Fig. 4)

Concentrandosi più strettamente all’area del P.R. è nota ad esempio, la realizzazione del pozzo Villaverla 1 condotta per conto di Agip nel 1978 che ha raggiunto la profondità di 4235 m dal p.c. ed è altrettanto nota l’assenza di eventi sismici di forte magnitudo documentati in quello stesso periodo. Lo stesso dicasi per gli altri numerosi pozzi profondi documentati in Fig. 8 di cui rappresenta un caso eclatante la perforazione condotta nel 1988 localizzata nelle strette vicinanze di un evento sismico, comunque di magnitudo inferiore a 2, registrato nel 2011. Altri casi sono rappresentati da perforazioni del 1960, 1975 e 1985 localizzati in prossimità di eventi sismici registrati nel 2010 e 2011. Dai dati ad oggi disponibili non si evidenziano quindi,

correlazioni tra le attività di perforazioni profonde (fino anche a 4-5000 m) ed eventi sismici significativi.

2.6 Sismicità indotta

Secondo quanto riportato dal recente Rapporto della commissione “ICHESE” (International Commission on Hydrocarbon Exploration and seismicity in the Emilia Region, 2014) chiamata a valutare la possibile interferenza tra le attività antropiche ed i terremoti del Maggio 2012, gli eventi sismici sono definiti come “antropogenici”, se l’attività umana ha avuto un qualche ruolo nel portare il sisma al punto di rottura. Oppure sono definiti come “indotti” (*induced seismicity*), se sforzi esterni prodotti dalle attività antropiche risultano sufficienti a produrre un evento sismico in una regione che non era necessariamente sottoposta a campi di sforzi. Cadono in questa categoria i terremoti prodotti da procedimenti di stimolazione termica o idraulica di una roccia come la fratturazione idraulica (*fracking*), attualmente vietati per legge in Italia.

Si parla inoltre di sismicità “innescata” (*triggered seismicity*) nel caso in cui le attività umane siano responsabili solo di una minima frazione delle variazioni del campo di stress che genera sismicità (diminuzione dello stress normale ed aumento della pressione dei pori), mentre il ruolo principale è svolto dal campo di stress tettonico (McGarr et al., 2002).

Lo sfruttamento di un giacimento minerario, ad esempio di idrocarburi, prevede l’estrazione della risorsa mineraria (petrolio o metano) e la re-iniezione di fluidi nel sottosuolo allo scopo di sostenere le pressioni del reservoir ed aumentare i fattori di recupero della risorsa. Il mantenimento del sistema in equilibrio dovrebbe pertanto prevedere la conservazione delle pressioni al di sotto dei valori originali del giacimento.

Sono noti in letteratura diversi casi di innesco di eventi sismici a seguito di attività antropiche (Nicholson et al., 1992, McGarr et al., 2002, Gomberg and Wolf 1999, McGarr 2013, Keranen et al., 2013) le cui cause possono essere sintetizzate sostanzialmente nei seguenti effetti: iniezione di fluidi, effetti poro-elastici e disequilibri isostatici (che presentano le stesse caratteristiche degli effetti poro-elastici ma che interessano giacimenti molto estesi per i quali le conseguenze possono manifestarsi in modo amplificato).

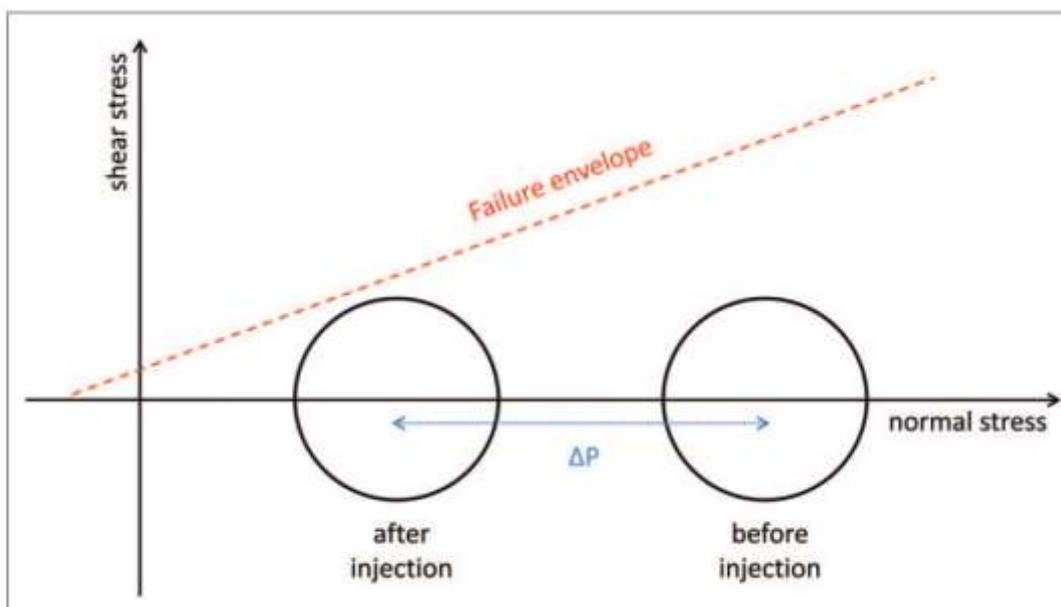


Fig. 9 - Diagramma di Mohr-Coulomb che illustra come l'iniezione di fluidi diminuisca il campo di stress (estratto da Suckale, 2010)

L'iniezione di fluidi nel sottosuolo determina un aumento della pressione di poro e, conseguentemente, una riduzione dello sforzo normale effettivo sui piani di faglia che potrebbero quindi venire a trovarsi in uno stato critico (Fig. 9). Una corretta modulazione dei volumi iniettati e delle pressioni di iniezione è indispensabile per un controllo sull'evoluzione dei fenomeni sismici.

Nel caso del campo petrolifero di Denver (Rocky Mountain Arsenal, USA; Nicholson & Wesson, 1992) a seguito dell'iniezione di elevate quantità di fluidi nelle rocce impermeabili del basamento cristallino (a 3.700 m di profondità circa) innescato sono stati indotti nel 1967, 3 eventi con Magnitudo $M=5$ e $M=5.5$. Questi eventi sismici sono stati preceduti da una serie di fenomeni di piccola magnitudo immediatamente dopo l'avvio delle attività di iniezione fluidi. Nel 1966, quando le attività di pompaggio vengono interrotte, l'attività sismica in prossimità del pozzo cessa, e l'attività sismica inizia a propagarsi verso zone via via sempre più distanti (fino a circa 6 km) e con magnitudo sempre più elevate fino a $ML=5.5$.

L'interruzione dell'iniezione di fluidi è stata quindi immediatamente seguita dalla interruzione degli eventi sismici di piccola entità, ML tra 2 e 3, associabili alla "risposta rapida" del sistema di fratture, ma non ha evitato la diffusione in profondità della propagazione della fratturazione innescando addirittura lo scivolamento lungo faglie pre-esistenti e potenzialmente sismogeniche. Questo secondo, ma più devastante effetto, indica una "risposta lenta" del sistema, con la conseguente induzione di terremoti con Magnitudo fino a ML 5-5.5.

Altri casi di sismicità indotta sono quelli di Ashtabula (Ohio), dove a seguito di iniezione di fluidi a circa 100 bar è stato generato nel 1987 un evento sismico di $ML=3.6$, un anno dopo l'inizio delle attività di reiniezione di fluidi. Oppure il caso del campo petrolifero di El Dorado

(Arkansas) attivo dal 1920, dove a seguito di iniezione di grandi volumi ad elevate pressioni di fluidi (Cox, 1991) iniziati nel 1970, si è verificato un evento sismico di $ML=3$. In genere si calcola in sismologia che i terremoti naturali siano legati a cadute dello stress tra 10 e 100 bar, per cui la reiniezione di fluidi ad alte pressioni è fisicamente sufficiente ad innescare la rottura di faglie favorevolmente orientate.

Altro caso spesso citato è quello dei terremoti in Oklahoma (USA), il più grave dei quali di $ML=5.7$, e potenzialmente attribuibili all'aumento della pressione fluida nel campo petrolifero di Wilzetta. Dopo 18 anni di iniezioni continue, si sono verificati tre eventi di magnitudo 5, 5.7 e 5. Fino al 2001 circa, le pressioni a testa pozzo sono documentate dell'ordine degli 0.2 MPa (2 bar), per poi subire step di incremento di pressione fino a raggiungere valori massimi di circa 36 bar (Karanen et al., 2013). Lo stato critico del sistema che porta all'innescio di fenomeni sismici, è legato all'accumulo di idrocarburi in pressione confinato all'interno di blocchi fagliati che agiscono da sigillo impedendo la migrazione dei fluidi stessi. Il volume di fluido iniettato e l'aumento della pressione a testa pozzo, potrebbero così trasferire lo stress ai lineamenti tettonici, favorendo il raggiungimento del loro stato critico (trigger slip). Il tempo necessario per portare il sistema a rottura sembra quindi essere funzione del flusso iniettato, del volume del reservoir e della permeabilità del mezzo.

Si evince quindi l'importanza di una corretta modulazione dei volumi iniettati e delle pressioni generate in funzione dell'assetto geologico dell'area interessata dalle operazioni estrattive. In generale i fenomeni di triggering possono essere suddivisi in: “eventi superficiali”, all'interno o in prossimità della formazione in produzione (legati a fenomeni rapidi), tipicamente connessi con strutture prevalentemente normali, in relazione a grandi volumi di materiali estratti con conseguente rapida subsidenza ed effetti poroelastici (Kovach, 1974; Yerkes and Castle, 1976; Wetmiller, 1986; Segall, 1989; Doser et al., 1991); ed “eventi profondi” localizzati in prossimità della base della zona sismogenetica, connessi a strutture di thrust e che si manifestano con magnitudo più elevate (“effetto lento”). Le caratteristiche di questi ultimi eventi li rende perciò più difficilmente distinguibili da quelli legati alla sismicità naturale.

Gli effetti poroelastici prodotti dall'estrazione di fluidi sono legati a diminuzione della pressione di poro con successiva contrazione (subsidenza) del reservoir. Il serbatoio è accoppiato elasticamente con le rocce circostanti, sulle quali viene trasferito parte dello stress elastico con possibile induzione di eventi sismici (Segall, 1989). La deformazione così generata può essere correlata alle misure di subsidenza ed ai meccanismi focali degli eventi (Segall, 1989).

I casi più conosciuti di fenomeni di subsidenza sono quelli legati all'estrazione del gas ad Alberta (Canada), nel Pau basin (Lacq, France) e nel Texas (McGarr et al., 2002). Il campo di produzione di gas di Pau (Francia), ha un'estensione di circa 10 km ed una profondità di produzione di 4 km. L'estrazione del gas ha generato un evento sismico di magnitudo $ML=4.2$ in

seguito alla compattazione subita dal reservoir (Grasso e Wittlinger, 1990). Nel caso del campo estrattivo di Fashing, Texas, l'estensione del giacimento è di circa 7 km e la depressurizzazione del reservoir (Pennington et al., 1986) ha dato origine ad eventi sismici dell'ordine di magnitudo $ML = 3.5$.

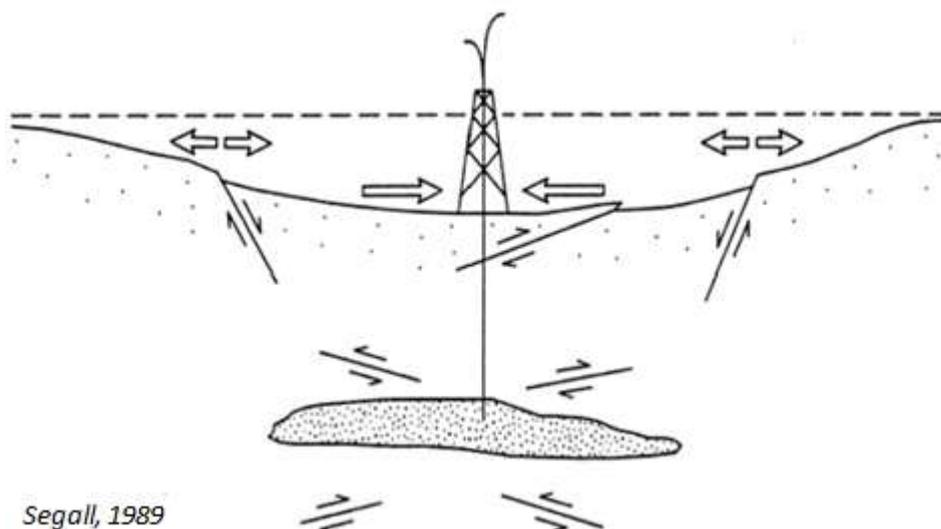


Fig. 10 – Effetti poroelastici e subsidenza del reservoir (Segall, 1989)

Da un punto di vista statistico, però i casi comprovati di interazione tra perforazione e sismicità sono solo 70 (Fig. 22), solo una piccola parte quindi rispetto agli innumerevoli campi di olio e gas in sfruttamento (McGarr et al., 2002). Il basso numero di casi però non deve fare pensare ad una bassa probabilità di accadimento del fenomeno perché ci sono buoni motivi per pensare che il database sia incompleto sia perché la sismicità naturale può “nascondere” la sismicità indotta, sia perché le compagnie estrattive hanno tutto l'interesse di non divulgare i dati relativi alla loro attività (Suckale, 2009).

In Italia il solo caso riportato in letteratura di sismicità indotta da attività estrattive di gas è quello di Caviaga, nella Valle del Po', registrato nel 1951 con magnitudo $ML=5.4$ (Caloi et al. 1956) e riportato successivamente da altri autori quali Grasso (1992) e Guha (2000). Il giacimento di Caviaga è stato la prima grande scoperta di gas in Europa (1944) e viene definito come deposito “giant”. Secondo quanto riportato dai rapporti di AGIP (1957) si tratta di un giacimento a condensati in arenarie del Pliocene inferiore, con top del reservoir a -1200 m s.s.l. Il giacimento attualmente è in esaurimento ma dati di UNMIG (Ministero dello Sviluppo Economico) documentano una produzione complessiva di oltre 12 GSm³.

Ad oggi, alcuni autori ancora dibattono (Scrocca, 2014) sulla possibilità che l'evento non sia stato connesso all'attività estrattiva ma abbia avuto un'origine tettonica. Tale supposizione è avvalorata dalla notevole profondità ipocentrale di circa 5 km, ben al di sotto della profondità dell'accumulo di gas (circa 1,5 km) ed in relazione al fatto che, al momento dell'evento sismico,

lo sfruttamento del giacimento ammontasse solamente al 4% del volume di idrocarburi estratti stimati a fine 2012. Se dunque si ritiene che i piccoli volumi estratti negli anni '50 possano aver innescato un evento di tale magnitudo, non si capisce perchè non si siano manifestati nell'area altri eventi sismici con l'aumento progressivo dei volumi estratti.



Fig. 11 – Distribuzione di 70 casi di sismicità indotta citati da Suckale (2009)

Il fatto che dopo oltre 50 anni dall'accadimento dell'evento, il dibattito sulle cause di innesco di un sisma sia ancora aperto, dimostra la complessità dell'argomento dal punto di vista scientifico. Sono solamente tre gli articoli sulla sismicità indotta pubblicati in Italia dal 1964 al 2012, molto pochi se confrontati con i numerosi lavori presentati nelle ultime conferenze europee di sismologia e al fatto che l'Associazione Sismologica Internazionale abbia un gruppo di lavoro dedicato solo a questo tema (Mucciarelli, 2012). Sicuramente uno dei motivi è che i giacimenti di idrocarburi in Italia (es. Val d'Agri, Basilicata, riserva stimata dell'ordine dei 480 Mbo), sono di vari ordini di grandezza inferiori rispetto ai grandi giacimenti mondiali per i quali sono stimate riserve di decine di migliaia di Mbo (ad esempio, giacimenti in Arabia Saudita). Di recente l'attenzione si è concentrata sulla sismicità naturale ed indotta della Val d'Agri (Improta e Valoroso, 2013), che presenta un elevato potenziale sismogenetico dell'area con possibile terremoto atteso di Magnitudo ML=7. Lo studio di dettaglio della sismicità dell'area negli anni 2005-2006 ha messo in luce un'intensa microsismicità (1994 eventi in un anno con magnitudo variabile da -0.2 a 2.7 ed ipocentri a profondità di 2-6 km) legata alle oscillazioni stagionali dell'invaso del Pertusillo.

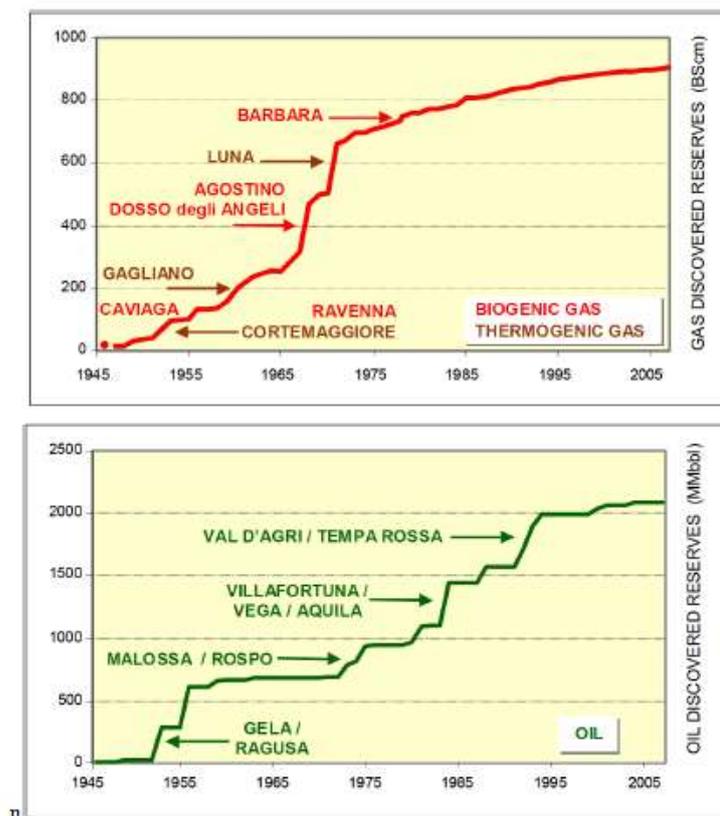


Fig. 12 – Curva cumulativa relativa alla scoperta dei giacimenti di olio e gas nel territorio nazionale (Cazzola et al., 2011)

Un secondo cluster di terremoti, con magnitudo incluse tra 0.3 e 1.7, è stato invece ricollegato, per localizzazione e profondità ipocentrali, alle attività del pozzo di re-iniezione (di acqua petrolifera di produzione) “Costamolina 2”.

A questi casi va ad aggiungersi, il caso del terremoto Emiliano del 2012 (eventi sismici manifestatisi dal 20 al 29 maggio con magnitudo superiore a 5), per il quale i dibattiti sono attualmente in corso, soprattutto a seguito del rapporto ICHESE, secondo cui *“l’attuale stato delle conoscenze e l’interpretazione di tutte le informazioni raccolte ed elaborate non permettono di escludere, ma neanche di provare, la possibilità che le azioni inerenti lo sfruttamento del giacimento di idrocarburi (concessione Mirandola) possa aver contribuito ad innescare l’attività sismica del 2012”*.

Oltre ai campi petroliferi, anche le attività legate allo sfruttamento dei campi geotermici può generare sismicità indotta. In Italia i casi più eclatanti sono quelli legati allo sfruttamento delle aree geotermiche di Larderello-Travale e di Piancastagnaio e Bagnore sul Monte Amiata.

Già a partire dagli anni '80, la rete sismica installata da Enel registrava attività sismica di bassa magnitudo (raramente con magnitudo superiore a ML 3) legata alla re-iniezione dei fluidi in pozzo nell’area geotermica di Larderello-Travale (Batini et al.,1985). Ad un incremento della quantità di fluido iniettato non corrispondeva però, dall’analisi dei dati disponibili, un aumento dei valori di magnitudo.

Più recentemente lo sfruttamento dei campi geotermici tra Abbadia S.S., Piancastagnaio e Casa del Corto, è indicato come la causa del forte terremoto del 1° aprile 2000 sul Monte Amiata, che ha provocato ingenti danni alle abitazioni (Mucciarelli et al., 2001). L'evento sismico registrato dalla rete sismica dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) di Roma, ha avuto una magnitudo pari a 4,5 della scala Richter, con una profondità di 2 Km e con danni stimati pari al V°-VI° della scala MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg) (<http://www.ltpaobserverproject.com/terremoti-indotti.html>).

I casi di sismicità indotta noti a livello internazionale e nazionale sono numerosi e spesso la possibile correlazione tra attività antropica e sismicità non è completamente chiara data la complessità di fattori geologici, sismogenetici, ad essa connessa. Si tende perciò sempre di più a migliorare le tecniche di monitoraggio in grado di misurare tempestivamente la pur minima sismicità indotta e tutti quegli effetti di superficie ad essa legata. Il monitoraggio risulta relativamente più semplice in aree dove la sismicità naturale è molto bassa (ad esempio i casi studiati in Olanda, Van Eck et al, 2006) e dove perciò, la correlazione tra attività antropica e sismicità è pressoché diretta. In generale, il monitoraggio dovrebbe iniziare prima dell'avvio delle attività antropiche e continuare anche dopo il termine delle stesse. La rete di monitoraggio dovrebbe essere realizzata in modo che, la densità delle stazioni di registrazione e la risoluzione della rete di monitoraggio siano in grado di registrare e localizzare eventi anche di bassissima magnitudo (<-1), così come descritto nei paragrafi seguenti.

<i>Hydrocarbon field</i>	<i>Country</i>	<i>Potential cause</i>
Snipe Lake	Alberta, Canada	
Strachan	Alberta, Canada	extraction
Gobles	Appalachian, Canada	injection
Eagle&Eagle West	British Columbia, Canada	extraction
Shengli	Shandong Province, China	injection
Dan	North Sea, France	extraction
Lacq	Aquitaine, France	extraction
Meillon	Aquitaine, France	extraction?
Sohlinger/Rosenburg	Rotliegendes, Germany	
Caviaga	Po Valley, Italy	
Umm Gudair	Kuwait	burning
Burgan	Kuwait	burning
Groningen	Rotliegendes, Neth-earlands	extraction/fault reactivation
Roswinkel	Rotliegendes, Neth-earlands	extraction/fault reactivation
Bergermeer	Rotliegendes, Neth-earlands	extraction/fault reactivation
Eleveld	Rotliegendes, Neth-earlands	extraction/fault reactivation
Bergen	Rotliegendes, Neth-earlands	extraction/fault reactivation
Annerveen	Rotliegendes, Neth-earlands	extraction/fault reactivation
Appelscha	Rotliegendes, Neth-earlands	extraction/fault reactivation
Emmen	Rotliegendes, Neth-earlands	extraction/fault reactivation

Dalen	Rotliegendes, Neth-earlands	extraction/fault reactivation
Roden	Rotliegendes, Neth-earlands	extraction/fault reactivation
VriesNoord	Rotliegendes, Neth-earlands	extraction/fault reactivation
Ureterp	Rotliegendes, Neth-earlands	extraction/fault reactivation
Emmen-Nw.A'Dam	Rotliegendes, Neth-earlands	extraction/fault reactivation
Schoonebeek	Rotliegendes, Neth-earlands	extraction/fault reactivation
VriesCentraal	Rotliegendes, Neth-earlands	extraction/fault reactivation
Coevorden	Rotliegendes, Neth-earlands	extraction/fault reactivation
Ekofisk	North Sea, Norway	extraction
Valhall	North Sea, Norway	extraction
Visund	North Sea, Norway	various
Shuaiba	Oman	
Romashkino	Volga-Ural, Russia	injection
Novo-Elkhovskoye	Volga-Ural, Russia	
Starogroznenskoye	Russia	
Barsa-Gelmes-Vishka	Russia	
Gudermes	North Caucasus, Russia	
Grozny	Tchetchny	
Big Escambia Creek	Alabama, USA	extraction ?
Little Rock	Alabama, USA	extraction ?
Sizemore Creek	Alabama, USA	extraction ?
Coalinga	California, USA	extraction/fault reactivation
Kettleman	California, USA	extraction/fault reactivation
Montebello	California, USA	extraction/fault reactivation
Orcutt	California, USA	injection
Wilmington	California, USA	extraction
Rangely	Colorado, USA	injection
South Eugene Island	Louisiana, USA	injection
Hunt	Mississippi, USA	injection ?
Sleepy Hollow	Nebraska, USA	injection ?
Catoosa District	Oklahoma, USA	injection ?
Love County	Oklahoma, USA	injection ?
East Durant	Oklahoma, USA	injection ?
Gobles	Ontario, USA	injection
Apollo-Hendrick	Texas, USA	injection ?
Blue Ridge	Texas, USA	extraction/subsidence
Clinton	Texas, USA	extraction/subsidence
Cogdell Canyon Reef	Texas, USA	injection ?
Fashioning	Texas, USA	extraction/fault reactivation
Goose Creek	Texas, USA	extraction/subsidence
Imogene	Texas, USA	extraction/fault reactivation
Kermit	Texas, USA	Injection
Keystone	Texas, USA	
Mykawa	Texas, USA	extraction/subsidence
South-Houston	Texas, USA	extraction/subsidence

War-Wing	Texas, USA	extraction ?
Webster	Texas, USA	extraction/subsidence
Dollarhide	Texas/New Mexico, USA	injection ?
Gazli	Uzbekistan	erratic production/fault reactivation ?
Costa Oriental	Lake Maracaibo, Venezuela	extraction/subsidence

Tab. 5– 70 casi di sismicità indotta (Suckale, 2009)

2.7 Subsidenza

La subsidenza è un termine che indica un abbassamento della superficie del suolo che può essere determinato sia da cause naturali (compattazione dei sedimenti più recenti – normalconsolidati quaternari- movimenti tettonici profondi, ecc.) che antropiche. Tra le cause antropiche l'estrazione di minerali o di fluidi sotterranei (acqua, olio, gas) produce la depressurizzazione del sistema con conseguente perdita di spinta litostatica e subsidenza dei terreni. Pertanto, la sostenibilità di un progetto dipende fortemente dalla realtà territoriale e dai vincoli normativi di gestione del territorio in atto. Le linee guida internazionali dello Seventh International Symposium on Land Subsidence, Shanghai, (Gambolati et al., 2005b) riguardano principalmente:

1. una dettagliata analisi dei dati disponibili sull'area di interesse;
2. la realizzazione di un modello analitico preliminare;
3. la corretta pianificazione di un sistema di monitoraggio.

In merito ai punti 1) e 2) si sottolinea l'importanza nel ricostruire la geologia dell'area di interesse grazie anche alla consultazione ed interpretazione di indagini sismiche e log di pozzo, nonché alla raccolta di dati geomeccanici derivati da prove di laboratorio eseguite su campioni affini ai terreni di interesse.

Considerando le caratteristiche geotecniche dei terreni attraversati che, a livello attuale d'indagine, escludono livelli compressibili nel serbatoio sollecitato (Calcari di Monte Spitz), ma anche nei terreni soprastanti, si escludono allo stato attuale fenomeni di rilassamento e consolidazione dei terreni e delle aree limitrofe indotti dalle fasi di perforazione esplorativa e di prove di produzione per la ricerca (che prevedono solo piccoli abbassamenti di pressione per la sola durata delle prove di portata di pochi giorni). Una volta eseguite le perforazioni esplorative e raccolte dagli scriventi ulteriori valutazioni di dettaglio sulle caratteristiche geotecniche e di fratturazione del serbatoio geotermico nonché sulle caratteristiche idrodinamiche, sarà possibile, prima della richiesta di concessione allo sfruttamento, applicare un modello previsionale sull'eventuale subsidenza del sistema in fase di coltivazione. Tale modello dovrà essere verificato attraverso il sistema di monitoraggio che partirà già dalla presente fase esplorativa.

2.8 Monitoraggio della Subsidenza

2.8.1 Stazione permanente GNSS (OGS-CRS)

E' prevista la realizzazione di una stazione GNSS (*Global Navigation Satellite System*) permanente di precisione in posizione prossima al sito della stazione IG01 (Fig. 14 e Fig. 15). La stazione campionerà il segnale con elevato campionamento (preferibilmente 10 Hz, eventualmente campionamento minimo di 1 s). I dati saranno tele-trasmessi in tempo reale al sistema di acquisizione, elaborazione e geo-referenziazione del CRS-OGS di Udine chiamato FreDNet (frednet.crs.inogs.it). La rete FreDNet fornisce una accurata geo-referenziazione dei siti inseriti al suo interno, distribuisce liberamente i dati registrati e le soluzioni per geo-referenziazioni di precisione di stazioni mobili in tempo reale o in post-processing.

La stazione sarà realizzata con due possibili tipi di monumentazione, scelta sulla base della geologia locale del sito: in caso di suolo roccioso o competente l'antenna sarà posta in superficie alla cima di un pilastro di cemento solidale con la roccia, eventualmente sotterrato per alcuni metri di profondità. Se invece il suolo sarà di natura scadente si adotterà il progetto di monumento sviluppato dal prof. Bevis dell'Ohio State University (USA), e presidente della 3° commissione (Earth Rotation and Geodynamics) del International Agency of Geodesy. Questa monumentazione è già stata adottata in un centinaio di installazioni nel mondo tra le quali la stazione PAZO (Palazzolo dello Stella (UD)) della rete FreDNet. Il monumento portante di tale struttura è costituito da tre barre in acciaio di diametro di 32mm e di lunghezza 4m. Tali barre sono infisse nel terreno con magli realizzati all'uopo. Ogni palo è inclinato di 60° rispetto al terreno ed è conficcato fino a 3 m circa di profondità. I tre pali spuntano dal terreno per circa 1m e sono saldati in cima fra di loro su di un disco anch'esso in acciaio di circa 30 cm di diametro. Sullo stesso disco è poi saldata una barra centrale (in acciaio di diametro 32 mm) su cui è fissato il palo in INOX (da 1/4") su cui andrà avvitata l'antenna GPS. Il supporto è infine irrobustito con ulteriori barre in acciaio (diametro 32 mm) che collegano alla base i tre pali che escono dal terreno e la barra centrale (Fig. 13).

Per la stazione GNSS si prevedono tempi di realizzazione di circa 4-6 mesi.

L'attività di esercizio prevede l'inserimento dei dati e l'aggiornamento delle informazioni correlate nel sistema FreDNet, l'elaborazione dei dati per il calcolo delle serie temporali e delle velocità nel sistema ITRF00, per il periodo analogo a quello di gestione della rete sismica.



Fig. 13 - Monumento per l'antenna GNSS proposto in questo progetto nel caso di terreni poco consolidati. L'immagine raffigura il monumento della stazione PAZO della rete FreDNet.

2.8.2 Infrastruttura di monitoraggio con tecniche satellitari (CNR-IREA)

Si propone la generazione di mappe e serie storiche della deformazione superficiale con tecniche satellitari mediante:

- Studio storico delle deformazioni del suolo di lungo periodo, ottenute a partire da immagini acquisite tra il 2002 ed il 2010 dal sensore ENVISAT dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA). Il processamento interesserà sia le immagini acquisite su orbita ascendente sia su orbita discendente.
- Monitoraggio della dinamica presente: verranno utilizzati dati in banda C della costellazione SENTINEL (ESA) per realizzare il monitoraggio dell'area in esame sia su orbita ascendente sia su orbita discendente.

Tale infrastruttura di analisi e monitoraggio verrà realizzata mediante tecniche avanzate di Radar ad Apertura Sintetica Interferometrica (InSAR) che consentono di misurare le deformazioni del suolo e l'evoluzione temporale degli spostamenti misurati nell'area di studio.

Tale tecnica permette di generare, con precisione centimetrica e in alcuni casi millimetrica, mappe di deformazione di una zona d'interesse a partire dalla differenza di fase (interferogramma) calcolata tra due immagini SAR relative alla stessa scena a terra e acquisite in tempi diversi.

Per il monitoraggio delle deformazioni verrà utilizzato l'algoritmo SBAS (acronimo di Small BAseline Subset) sviluppato presso l'IREA-CNR di Napoli; tale algoritmo ha l'obiettivo di massimizzare la densità dei punti di misura nella zona analizzata. Tale metodologia si basa sulla generazione di interferogrammi ottenuti a partire da dati acquisiti da orbite sufficientemente vicine (piccole baseline spaziali) e con tempi di rivisitazione non elevati (piccole baseline temporali). Queste caratteristiche consentono di minimizzare gli effetti di rumore incrementando, pertanto, il numero di punti per unità di area per i quali si riesce a fornire una misura affidabile della deformazione.

La tecnica SBAS è oramai consolidata ed è stata sperimentata con successo utilizzando i dati acquisiti dai satelliti ERS-1/2 ed ENVISAT dell'Agenzia Spaziale Europea, per l'analisi delle deformazioni degli edifici vulcanici dell'Etna e del Vesuvio, delle caldere dei Campi Flegrei e di Long Valley (California, USA), di varie aree urbane (Napoli, Roma, Los Angeles, etc.) oltre che di zone soggette a fenomeni di frana (Maratea, Assisi, Fango, etc.). Tali esperimenti hanno consentito di individuare eventi deformativi, parte dei quali precedentemente sconosciuti, con risoluzioni spaziali di circa 100m x 100m e con velocità di spostamento comprese tra 1 mm/anno e qualche cm/anno, il tutto con accuratezze dell'ordine dei 5 mm sulla singola misura di deformazione (Casu et al., 2006).

La tecnica SBAS è stata ulteriormente sviluppata anche per operare a due scale spaziali in modo da utilizzare i dati a piena risoluzione spaziale (circa 5/20 metri nel caso dei satelliti ESA) per rilevare fenomeni deformativi, anche molto localizzati spazialmente, che mostrano uno spostamento relativo rispetto a quello medio del terreno e per individuare precisamente le singole strutture, tipicamente antropiche, affette da tale movimento.

Le misure di deformazione ottenute grazie all'analisi InSAR verranno opportunamente integrate/complementate con quelle fornite dalle stazioni GPS permanenti del Veneto già presenti nell'area e dalla stazione di nuova realizzazione. Ciò permetterà di rendere le misure InSAR indipendenti dalla “zona di riferimento” scelta per la loro analisi e rappresentazione e di rilevare (e correggere) eventuali artefatti che possono essere presenti nelle misure InSAR.

La possibilità di combinare risultati SBAS-DInSAR ottenuti da orbite ascendenti e discendenti permette di individuare due delle tre componenti del vettore deformazione: quella verticale e quella Est- Ovest. In particolare, si sfrutta la diversa geometria di illuminazione che permette di avere la proiezione del vettore spostamento tridimensionale su due linee di vista differenti. Successivamente, combinando queste ultime, tramite semplici considerazioni di carattere trigonometrico, è possibile ottenere una stima della componente di deformazione lungo la

direzione Est-Ovest e lungo quella verticale. Al contrario, l'individuazione dello spostamento lungo la direzione nord-sud non è possibile per via dell'orbita polare dei satelliti. Infatti, la traccia a terra dell'orbita si discosta dalla direzione Nord-Sud per un angolo di circa 10 gradi, ne risulta che la proiezione della componente Nord-Sud del vettore spostamento lungo la linea di vista è molto piccola, e comunque trascurabile rispetto alle altre componenti, rendendo di fatto il radar praticamente “cieco” lungo questa direzione.

Il monitoraggio dei fenomeni deformativi del suolo con misure InSAR potrà avvenire solo dopo aver acquisito un numero adeguato di immagini Sentinel-1 pari ad un intervallo temporale di almeno un anno. Tale configurazione sarà raggiunta orientativamente a partire dalla fine dell'estate 2015. Successivamente sarà possibile fornire un aggiornamento delle misure satellitari con cadenza trimestrale. Il monitoraggio avrà durata di un anno, in riferimento alla fase della sola perforazione esplorativa e prove di produzione di cui alla presente procedura di VIA. Tale rete, in caso di esito favorevole della ricerca, proseguirà anche nella successiva fase di sfruttamento della risorsa geotermica (concessione mineraria).

I dati provenienti dalle reti di monitoraggio essere verranno resi pubblici su un apposito sito ed eventuali fenomeni di subsidenza prontamente commentati da esperti e spiegati alla popolazione.

Qualora le perforazioni fornissero esiti positivi verrà redatto un modello geotecnico numerico, sulla base dei risultati delle perforazioni esplorative, nonché un piano di monitoraggio che consenta di stimare e controllare in modo opportuno le pressioni del giacimento nonché di agire prontamente nel caso di eventuali abbassamenti del suolo. Si consiglia, anche, il prelievo di un numero significativo di campioni indisturbati di terreno per la valutazione delle proprietà geotecniche e la stima dei cedimenti del terreno. Il tutto ovviamente solo dopo la conclusione delle due perforazioni esplorative, solo in caso di esito favorevole.

2.9 Monitoraggio Sismico

Tenendo fermo quanto sopra, avendo comunque presente il principio di cautela, si è ritenuto opportuno eseguire un controllo della sismicità eventualmente indotta durante la fase di perforazione e prova di produzione utilizzando sia le stazioni esistenti che mettendo in opera ulteriori stazioni di misura.

Per quanto riguarda la progettazione della rete sismica, sono stati considerati gli elementi strutturali più importanti: i due sistemi di faglie Schio-Vicenza in direzione Sud-Est e Thiene-Bassano a Nord-Est, caratterizzati rispettivamente da cinematica prevalentemente trascorrente e compressiva. Considerando che il sistema Thiene-Bassano si immerge verso Nord, quindi allontanando progressivamente il piano di faglia dall'area della concessione all'aumentare della

profondità, maggiore attenzione sarà rivolta al sistema Schio-Vicenza, almeno durante la fase di ricerca della risorsa geotermica.

Lo scopo della rete sismica e dell'attività di monitoraggio qui proposta è di:

- rilevare la sismicità nell'intorno della concessione (orientativamente entro un raggio di circa 5-10 km);
- rilevare la micro-sismicità con elevata sensibilità e dettaglio entro un raggio di circa 3-5 km dall'area corrispondente alla risorsa. Orientativamente si intende arrivare a una magnitudo di completezza M_c delle rilevazioni compresa tra 0 e 1.

La rete proposta prevede la realizzazione di cinque stazioni equipaggiate con strumentazione sismologica di elevata qualità e apparecchiature di tele-trasmissione del dato continuo verso il centro di acquisizione ed elaborazione. Tutte le stazioni saranno dotate di sismometro in pozzo e accelerometro in superficie. L'installazione dei sismometri in pozzo è necessaria per mitigare gli effetti del rumore antropico e del rumore sismico superficiale, soprattutto in presenza di suoli scadenti. Le profondità dei pozzi potranno indicativamente variare tra 30 e 150 m, a seconda del tipo di suolo locale e del rumore antropico misurato. La presenza di accelerometri in superficie è indispensabile per fornire un segnale utile (non saturato) in caso di terremoti più forti e per misurare l'effettivo moto del suolo registrato in superficie anche in caso di eventi indotti.

La geometria proposta (Fig. 14 e Fig. 15) prevede una stazione prossima ai pozzi, due stazioni a distanza di circa 4-5 km rispettivamente in direzione Nord-Ovest e Est, e due stazioni a circa 8 km in direzione Sud-Ovest oltre la linea di faglia Schio-Vicenza. I siti saranno reperiti presso privati, con i quali saranno stipulati opportuni contratti di affitto.

La rete si avvarrà poi dei dati di altre stazioni che l'OGS acquisisce nell'ambito dell'attività di monitoraggio sismico dell'Italia Nord-Orientale e che appartengono alle reti del Veneto e del Trentino. Le più vicine tra queste (MARN, CGRP, DOSS, TEOL, BALD) sono mostrate in Fig. 15 e si trovano a distanze mediamente comprese tra 20 e 30 km.

Le stazioni saranno composte dai seguenti elementi principali:

- Acquisitore a 24 bit a 6 canali con trasmissione e controllo bi-direzionale via internet;
- Sensore velocimetrico (sismometro) a 3 componenti e a larga banda (indicativamente $T > 5$ s, $f_{max} = 100$ Hz) collocato a fondo pozzo e sensore accelerometrico in superficie. Tutta la strumentazione soddisferà standard sismologici di elevata qualità;
- Apparato di alimentazione con pannello fotovoltaico o collegato alla rete elettrica;

- Apparato di tele-trasmissione dalle stazioni verso un centro locale di raccolta e reindirizzamento verso il sistema di acquisizione dell'OGS via Internet.

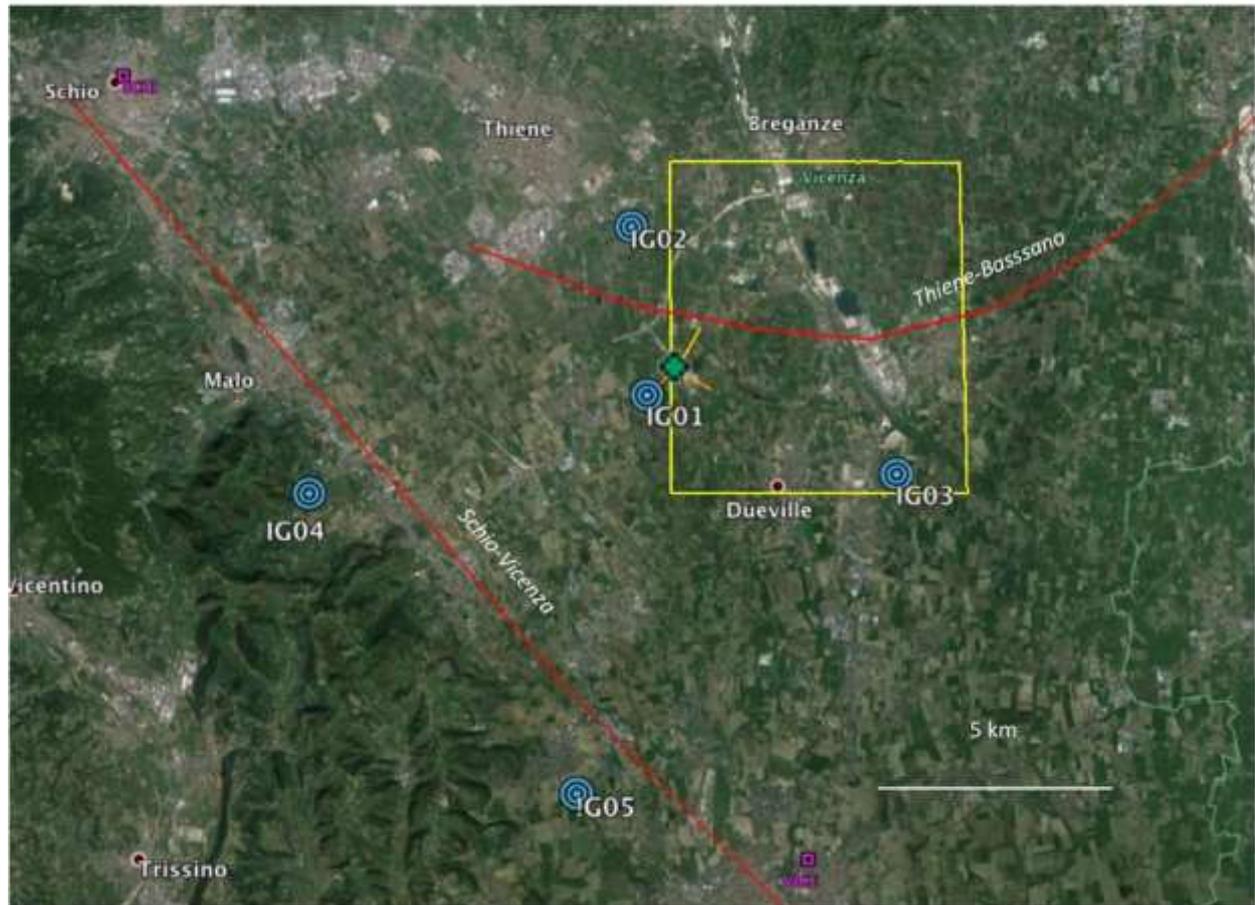


Fig. 14 - Disposizione delle stazioni prevista per la Rete Sismica di Montecchio Precalcino, a scala locale. I simboli rappresentano: quelli rotondi azzurri le stazioni della rete proposta (sigla IG), il rombo verde la posizione dei pozzi con le due deviazioni orizzontali in profondità (segmenti arancio), il rettangolo giallo i limiti della concessione, la linea bianca in basso la distanza di 5 km. Le due linee rosse rappresentano il sistema Schio-Vicenza (a Sud-Ovest) ed il sistema Thiene-Bassano (a Nord-Est), come da consultazione della banca dati dell'INGV e pubblicazioni scientifiche. I simboli piccoli colore magenta, rappresentano le posizioni delle stazioni GPS permanenti del Veneto già presenti nell'area.

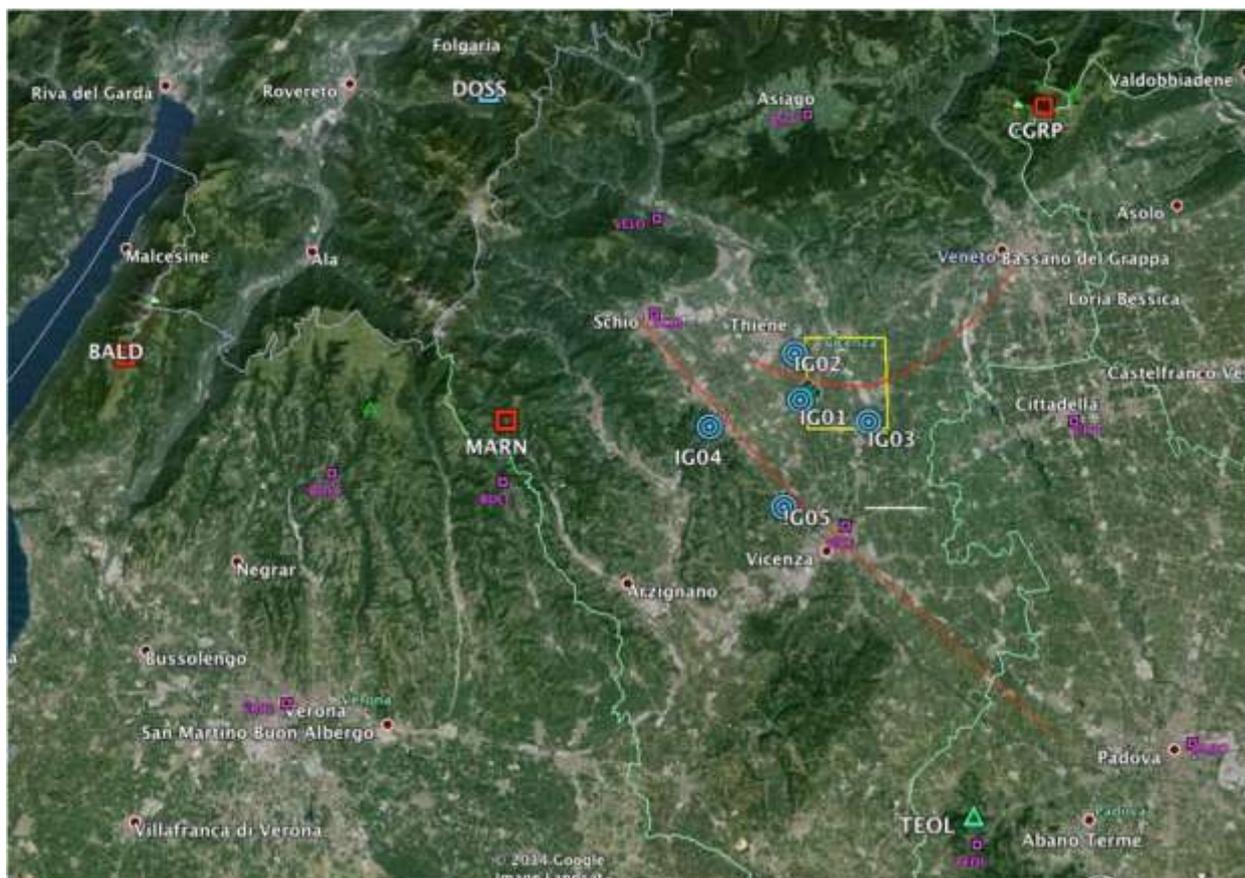


Fig. 15 - Come Fig. 14 ma a scala regionale. Si riconoscono con i quadrati rossi e azzurri le stazioni broad-band gestite dall'OGS e con il triangolo verde la stazione a corto periodo di Teolo sempre gestita dall'OGS. I simboli piccoli colore magenta, rappresentano le posizioni delle stazioni GPS permanenti del Veneto già presenti nell'area.

Per gli apparati di tele-trasmissione vi sono alcune opzioni tecniche da valutare. Si propenderà per l'uso di radio a micro-onde (tecnologia spread-spectrum) che prevede la comunicazione punto-punto tramite antenne direzionali collocati ad altezza di alcuni metri da terra. In alternativa, si opterà per un sistema a telefonia cellulare con tecnologia GPRS.

E' inoltre prevista la realizzazione di alcune strutture leggere di appoggio alla trasmissione dei dati, che potranno consistere di una base di sostegno elevata per alcune antenne (in alternativa un palo), l'alloggiamento per alcuni router (eventualmente un armadietto dedicato), alimentazione di corrente elettrica e accesso a Internet.

Il progetto prevede anche la realizzazione del sistema di acquisizione ed elaborazione dei dati. Il dato in continuo sarà trasmesso all'OGS, nella sede della Sezione CRS di Trieste, organo incaricato di progettare, realizzare e gestire la rete di monitoraggio, dove risiederanno i computer destinati all'archiviazione sicura e all'elaborazione dei dati. Il sistema prevede anche la costruzione di un sito web dedicato attraverso cui saranno pubblicamente distribuiti i dati originali registrati e le informazioni.

Si prevedono tempi di realizzazione della rete di circa 9 mesi.

La rete descritta resterà in esercizio per il tempo di circa 3 mesi successivi al completamento delle prove previste durante la fase di ricerca. Si stimano circa 12-18 mesi di esercizio, comprendendo in questo periodo: almeno 180 giorni di registrazione pre-attività; circa 260 giorni di scavo dei pozzi, 30 giorni di prove di iniezione ed emungimento; almeno 90 giorni di registrazione dopo le prove.

Ulteriori accorgimenti potranno essere introdotti a seguito di un futuro sfruttamento del giacimento geotermico, in accordo con quelle che saranno le prescrizioni stabilite e di competenza dagli enti locali e nazionali.

3 Risultati

A seguito di quanto esposto nei paragrafi precedenti si evince che:

- La normativa nazionale classifica l'area di ricerca Montecchio Precalcino all'interno della classe di pericolosità sismica 3 e della zona sismogenetica Z906. Pertanto i valori attesi di accelerazione al suolo PGA sono compresi tra 0.125 e 0.150 ed il terremoto di progetto è di $ML=5.8$;
- L'analisi della sismicità storica indica che i principali terremoti avvertiti a sono quelli del 1981, 1895, 1989 risentiti a Montecchio Precalcino con una intensità media MCS dell'ordine di 5;
- L'analisi della sismicità strumentale attraverso la banca dati ISIDe in un intorno di circa 50 km da Montecchio Precalcino rivela una Gutenberg-Richter (curva GR) con coefficiente $b \sim 1$;
- L'analisi della sismicità strumentale attraverso la consultazione della rete integrata dell'Italia Nord-Orientale gestita da OGS, in un intorno di circa 30 km dall'area di cantiere, non ha evidenziato una significativa attività sismica recente;
- Secondo la banca dati ITHACA l'area di cantiere risulta localizzata ad una distanza di circa 5 km a NE dalla nota e più volte citata nella relazione, faglia di Schio-Vicenza con orientazione NNW-SSE e secondo la consultazione delle numerose pubblicazioni scientifiche (Sugan & Peruzza, 2011; Galadini et al., 2005; Poli et al. 2008; Scardia et al., 2014). a una distanza di oltre un chilometro dal sistema Thiene-Bassano con orientazione NW-SE;
- L'interpretazione complessiva non attribuisce uno specifico carattere sismogenico né alla Schio-Vicenza né alla Thiene-Bassano;

- Non risultano fenomeni di sismicità indotta legata alle perforazioni profonde (UNMIG & VIDEPI) analoghe a quelle proposte, limitatamente ad un intorno di 50 km dall’abitato di Montecchio Precalcino;
- Considerando le caratteristiche geotecniche dei terreni attraversati che escludono livelli compressibili nel serbatoio sollecitato (Calcari di Monte Spitz), ma anche nei terreni soprastanti, si escludono fenomeni di rilassamento e consolidazione dei terreni e delle aree limitrofe.

4 Discussioni e Conclusioni

In seguito ai dati raccolti e alle analisi eseguite la sismicità dell’area è medio-bassa ed il territorio del progetto di ricerca Montecchio Precalcino rientra all’interno della classe di pericolosità sismica 3. Negli ultimi 1000 anni sono stati risentiti nel comune di Montecchio Precalcino, in cui ricade l’area di cantiere, 3 terremoti (quelli datati 1895, 1981, 1989) con valori di intensità MCS dell’ordine di circa 6. La sismicità strumentale è diffusa in un intorno di circa 50 km da Montecchio Precalcino, ed è coerente con la moderata sismicità storica compatibile con un evento atteso di $ML = 5.8$ su tempi di ritorno di 475 anni.

Secondo la consultazione della banca dati ITHACA, l’area di cantiere risulta localizzata ad una distanza di circa 5 km a NE dalla faglia di Schio-Vicenza con orientazione NNW-SSE e secondo la consultazione di numerose pubblicazioni scientifiche (Sugan & Peruzza, 2011; Galadini et al., 2005; Poli et al. 2008; Scardia et al., 2014). a una distanza di oltre un chilometro dal sistema Thiene-Bassano con orientazione NW-SE (Fig. 4).

La ricerca geotermica è attiva sul territorio nazionale da oltre 60 anni. L’esperienza maturata nel settore e lo studio accurato della bibliografia nazionale e internazionale (paragrafo 2.6) rendono chiare le problematiche che possono essere connesse allo sfruttamento di un giacimento. Ad ulteriore chiarimento si ribadisce in questa sede che per le perforazioni esplorative dei pozzi non saranno adoperati nel presente progetto processi di fratturazione di masse litoidi con sovrappressioni (fracking) molto spesso imputabili a casi di sismicità indotta.

Dallo studio eseguito non si rilevano allo stato attuale rischi di sismicità indotta o triggerata in riferimento alle perforazioni esplorative e alle prove di produzione.

In merito al rischio di subsidenza indotto dalle operazioni di perforazione esplorativa, non operando una decompressione, se non di entità leggera e temporanea con rapidi recuperi di pressione attesi durante le prove di produzione, e considerando le caratteristiche geotecniche dei terreni attraversati che escludono livelli compressibili nel serbatoio sollecitato (Calcari di

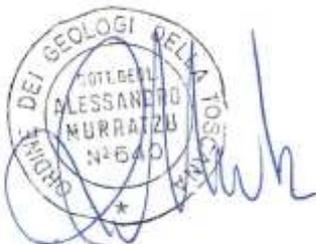
Monte Spitz), ma anche nei terreni soprastanti, si escludono fenomeni di rilassamento e consolidazione dei terreni e delle aree limitrofe.

Vogliamo ricordare che comunque l'intero territorio italiano è, per sua natura, un terreno sismico. Le problematiche che potrebbero scaturire da un eventuale e futura attività di estrazione di un giacimento (prevista solo in caso di esito favorevole delle perforazioni esplorative e a seguito di ulteriore procedura di VIA, con modelli di serbatoio e modelli sulla subsidenza), non sono da sottovalutare nonostante non siano attesi fenomeni di sismicità e subsidenza. Si propone pertanto, fin dalla presente fase di perforazione esplorativa, di attenersi alla pianificazione del progettato, accurato sistema di monitoraggio sismico e di subsidenza che permetta l'analisi in tempo reale dei segnali. Per motivi di trasparenza e vista l'elevata antropizzazione dell'area di ricerca, tutti i dati del monitoraggio dovranno essere resi pubblici e visibili su un sito web congiuntamente con i dati relativi alle fasi di perforazione e prove temporanee di produzione.

Gennaio 2015

Proponente:

Lifenergy Srl
Il Procuratore Speciale
Francesca PIAZZINI



Progettazione:

Earth Engineering and Consulting

I Progettisti
Dott. Geol. Alessandro MURRATZU

Dott. Geol. Simone FIASCHI

Dott. Ing. Luca MENINI

Dott. Ing. Gianfranco Morelli

Collaboratori Tecnici

Dott. Geol. Alice CIULLI

Dott. Geol. Laila TADDEI

Bibliografia

- Aki, K. (1964). A note on the use of microseisms in determining the shallow structures of the earth's crust. *Geophysics*, 30, 665-666.
- Bard, P.Y. (1999). Microtremor measurements: a tool for site effect estimation?. *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, eds. K. Irikura, K. Kudo, H. Okada and T. Sasatani (Balkema, Rotterdam), 1251-1279.
- Batini, F., Console, R., Luongo, G. Seismological study of Larderello – Travale geothermal area. *Geothermics*. Volume 14, Issues 2-3, 1985, pages 255-272.
- Benvenuti, M., Del Conte, S., Scarselli, N., Dominici, S. (2013). *Hinterland basin development and infill through tectonic and eustatic processes: latest Messinian-Gelasian Valdesa Basin, Northern Apennines, Italy*. Basin Research, DOI: 10.1111/bre.1203.
- Casu F., manzo M., and Ianari R. (2006). A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data. *Remote Sensing of Environment*, 102, 3-4, pp. 195-210, doi: 10.1016/j.rse.2006.01.023.
- Cazzola, A., Fantoni, R., Franciosi, R., Gatti, V., Ghielmi, M., Pugliese, A.. Search and Discovery Article #10374 (2011). Posted November 28, 2011.
- Cox, R.T. (1991). Possible Triggering of Earthquakes by Underground Waste Disposal in the El Dorado, Arkansas Area, *Seismol. Res. Lett.* 62, 113-122.
- Doser, D. I., Baker, M.R., and Mason, D. B. (1991). Seismicity in the War-Wink Gas Field, Delaware Basin, West Texas, and its Relationship to Petroleum. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 81, 971-986.
- Foti, S. (2000). Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves. PhD Thesis Politecnico di Torino, Italy.
- Galadini F., Poli M. E. e Zanferrari A. (2002). Sorgenti sismo geniche responsabili di terremoti distruttivi nell'Italia nord-orientale. 21° Convegno Nazionale del Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida, Roma (Italy), 19-21 Novembre 2002, volume degli abstract, 27-30.
- Gambolati G., Teatini P., Ferronato M., (2005b). Basic conceptual guidelines for a sustainable gas/oil field development. In: *Land Subsidence (Proc. Seventh Int. Symp. Land Subsidence, Shanghai, PR China, October 2005)*, Zhang A. et al. (eds.), Shanghai Scient. & Tech. Publ., Vol.II, 919-924.
- Gambolati G., Teatini P., Ferronato M., (2007). Linee guida per lo studio dei fenomeni di subsidenza nell'ambito dei progetti di sviluppo sostenibile e di campi ad olio e gas. Rapporto tecnico 1/2007. Università di Padova.
- Grasso, J.R. and G. Wittlinger (1990). *Bull. Seismol. Soc. Am.* 80, 450-473.
- Idriss, I. M 1990, Seismic response of horizontal soil layer: American Society of Civil Engineers Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 94, no. 4, 1003–1031.

International Conference on Seismic Zonation. Nice, France.

- Improta, L. & Valoroso, L., 2013. Analisi della sismicità naturale ed indotta della Val d’Agri registrata da una rete sismica temporanea ad alta densità. Osservatorio Ambientale “Val d’Agri” – Convegno Scientifico “Sismicità Indotta” Marsico Nuovo, 15 Marzo 2013.
- Keranen K.M., Savage H.M., Abers G.A. and Cochran E.S. (2013). Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: links between wastewater injection and the 2011 Mw 5.7 earthquake sequence. *Geology* published online 26 march 2013; doi:10.1130/G34045.1.
- Kovach, R.L. (1974). Source Mechanisms for Wilmington Oil Field, California, Subsidence Earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 64, 699-711.
- Li Guoyu (2011). *World Atlas of Oil and Gas Basins*. Published March 14th 2011 by Wiley-Blackwell.[more details...](#)
- McGarr A., (2014). Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection. *Journal of Geophysical Research: solid earth*, 119, 1008-1019, doi:10.1002/2013JB010597.
- McGarr A., Simpson D., Seeber L. (2002). Case histories of induced and triggered seismicity. *International handbook of earthquake and engineering seismology*, vol.81A, ISBN: 0-12-440652-1.
- Meletti C., Patacca E. e Scandone P. (2000). Construction of a seismotectonic model: the case of Italy. *Pageoph*, 157, 11-35.
- Meletti C. e Valensise G., (2004). Zonazione sismo genetica ZS9 – App.2 al Rapporto Conclusivo.
- Mongelli F. e Zito G. (1991). Flusso di calore nella regione Toscana. In: Piali G., Barchi M., Menichetti M. (a cura di) *Studi preliminari all’acquisizione dati del profilo CROP03 Punta Ala – Gabicce*. *Studi Geol. Cam.*, vol. spec. 1991/1, 91-98.
- Mucciarelli, M., Gallipoli, M., Fiaschi, A., Pratesi, G. (2001). Osservazioni sul danneggiamento nella zona del Monte Amiata a seguito dell’evento del 1° aprile 2000. X Congresso nazionale “Ingegneria Sismica in Italia”, Potenza-Matera 9-13 settembre 2001.
- Mucciarelli, M., 2012. Sismicità indotta, Sismicità naturale: buone pratiche e cose da non fare. Capriano del Colle, 12 aprile 2012.
- Nicholson C. and Wesson R.L., (1992). Triggered Earthquakes and deep well activities. *Pageoph*, Vol.139, No.3/4 0033-4553/92/040561.
- Otori, M., Nobata, A., and Wakamatsu, K., 2002. A comparison of ESAC and FK methods of estimating phase velocity using arbitrarily shaped microtremor analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 2323-2332
- Pennington, W.D., et al. (1986). *Bull. Seismol. Soc. Am.* 76, 939-948.
- Pileggi D. · Rossi D · Lunedei E. · Albarello D. 2010. Seismic characterization of rigid sites in the ITACA database by ambient vibration monitoring and geological surveys. *Bull Earthquake Eng* (2011) 9:1839–1854.

- Poli M. E., Burrato P., Galadini F. and Zanferrari A. (2008). Seismogenic sources responsible for destructive earthquakes in north-eastern Italy. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 49, 301-313. (http://www2.ogs.trieste.it/bgta/provapage.php?id_articolo=433)
- Scardia G., Festa A., Monegato G., Pini R., Rogledi S., Tremolada F., Galadini F., 2014. Evidence for late Alpine Tectonics in the Lake Garda area (northern Italy) and seismogenic implications. *Geological Society of America Bulletin*, published online on 30 July 2014 as doi: 10.1130/B30990.1.
- Scrocca, D., 2013. Giacimenti di idrocarburi e sismicità indotta. Convegno Scientifico dell’Osservatorio Ambientale della Val d’Agri I Edizione – Tema: Sismicità indotta. 15 marzo 2013 [presentazione].
- Scrocca, D., 2014. Giacimenti di idrocarburi e sismicità stimolata in Appennino centro-settentrionale. Giornata di Studio: Ricerca di idrocarburi e gestione del gas metano in Pianura Padana: aspetti di rischio sismico e criticità energetiche ed amministrative. Brescia, 7 maggio 2014 [presentazione].
- Segall, P. (1985). *J. Geophys. Res.* 90, 6801-6816.
- Segall, P. (1989), *Earthquakes Triggered by Fluid Extraction*, *Geology* 17, 942-946.
- Style P., Gasparini P., Huenges E., Scandone P., Lasocki S., Terlizzese F., 2014 – Report on the Hydrocarbon Exploration and Seismicity in Emilia Region – International commission on hydrocarbon exploration and seismicity in the Emilia Region.
- Suckale, J., 2010. Moderate-to-large seismicity induced by hydrocarbon production. *Special Section Microseismic, the leading Edge*, pp. 310-319.
- Sukan M. and L. Peruzza (2011). Distretti sismici del Veneto. *Boll. Geofis. Teor. Appl.*, Supplement Dec 2011, s3-s90, ISSN 006-6729 (http://www2.ogs.trieste.it/bgta/pdf/bgta0057_SUGAN.pdf)
- Van Eck, T., Goutbeek, F., Haak, H., Dost, B. (2006). Seismic hazard due to small-magnitude, shallow-source, induced earthquakes in the Netherlands. *Engineering Geology*, Vol. 87, Issues 1-2, 19 September 2006, Pages 105-121.
- Vannucci G. e Gasperini P. (2003). A database of revised fault plane solutions for Italy and surrounding regions. *Computer Geosciences*, 29 (7), 903-909.
- Wetmiller, R.J. (1986). Earthquakes near Rocky Mountain House, Alberta, and their Relationship to Gas Production Facilities, *Canadian J. Earth Science* 23, 172-181.

Siti internet

- http://www.uniurb.it/geoappl/gislab/progetti/seismic_hazard/pga_classificazione.htm
- <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11/>
- <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI11/>

- <http://sgi.isprambiente.it/geoportal/catalog/content/project/ithaca.page>)
- http://193.206.192.231/carta_geologica_italia/default.htm
- <http://diss.rm.ingv.it/diss/>
- www.emsc-csem.org
- <http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/videpi/>
- <http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/>
- <http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/cartoteca.html>
- http://www.pcn.minambiente.it/GN/progetto_psi.php?lan=it