



**IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO
"CASA DEL CORTO"**

**[ID: 3212 - 3214] Risposte alle
Richieste di Integrazioni**

Allegato 7: Sismicità Indotta/Innescata

Preparato per:
Svolta Geotermica Srl

Dicembre 2016

Codice Progetto:
P16_CAE_021

Revisione: 0

STEAM
Sistemi Energetici Ambientali
Via Ponte a Piglieri, 8
I – 56122 Pisa
Telefono +39 050 9711664
Fax +39 050 3136505
Email : info@steam-group.net



STEAM

Svolta Geotermica Srl

**IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO
“CASE DEL CORTO”**

**[ID: 3212 - 3214] Risposte alle
Richieste di Integrazioni**

Allegato 7: Sismicità Indotta/Innescata



Ing. Riccardo Corsi
Project Director

Progetto	Rev.	Preparato da	Rivisto da	Approvato da	Data
P16_CAE_021	0	AF, PB, GB, LF	GB, PB, SD	RC	30/11/2016

INDICE

1	<i>INTRODUZIONE</i>	1
2	<i>ESPERIENZE IN ITALIA E NEL MONDO</i>	2
2.1	<i>ITALIA</i>	2
2.2	<i>RESTO DEL MONDO</i>	9
	<i>BIBLIOGRAFIA</i>	11

INTRODUZIONE

In merito alla richiesta del MATTM di presentare un'analisi statistica sulla sismicità indotta/innescata dagli impianti geotermici funzionanti in Italia e nel Mondo si fa presente che tale analisi è possibile solo se fossero disponibili i data base della sismicità rilevata da reti di monitoraggio locale.

Sulla base della letteratura esistente, è possibile solo riportare gli elementi salienti dei risultati pubblicati, come già riportato nell'Allegato 5 del documento "Progetto Definitivo e Programma Lavori" del Permesso di Ricerca per Impianto Pilota Geotermico "Casa del Corto", specificamente al paragrafo 3.2, per quanto concerne i campi geotermici italiani, e al paragrafo 3.3 relativamente ai campi geotermici nel mondo.

2

ESPERIENZE IN ITALIA E NEL MONDO

Di seguito si sintetizzano le principali caratterizzazioni sismicità/esercizio di impianti geotermici riportate nella bibliografia disponibile, relativamente ai campi geotermici italiani e ad esperienze a livello mondiale.

2.1

ITALIALarderello-Travale

Da Batini et al. (1980a):

“E’ stato tentato un confronto tra la sismicità e l’attività connessa allo sfruttamento del campo geotermico (estrazione e iniezione di fluidi in profondità, perforazione di pozzi profondi in perdita totale di circolazione, stimolazione di pozzi sterili, etc.) allo scopo di stabilire se e come queste attività modifichino i meccanismi di rilascio dello stress della regione Larderello - Travale”.

“I dati relativi alla quantità di fluidi estratta e iniettata nel sottosuolo sono stati confrontati con l’energia sismica che è rilasciata ogni mese. Dagli istogrammi ricostruiti per la regione geotermica Larderello - Travale, l’energia sismica è stata rilasciata come una funzione lineare nel tempo fino a Maggio 1979, quando è avvenuto un brusco aumento di sismicità. Questo aumento non può essere correlato né con la quantità di fluidi iniettati, né con la produzione di fluido né con le precipitazioni medie mensili di pioggia (pag.38). Comunque non è possibile con le nostre attuali conoscenze, generalizzare una relazione causa - effetto tra iniezione di acqua e terremoti indotti in quell’area”.

Da Batini et al. (1985):

“La correlazione tra sismicità e acqua iniettata nei pozzi ubicati nell’area geotermica suggerisce che parte degli eventi microsismici di bassa magnitudo sono indotti. Comunque, i dati analizzati indicano che un aumento nella quantità di acqua iniettata non produce un aumento nel valore massimo della magnitudo”.

Da Evans et al. (2012):

“L’area ha una lunga storia di sismicità, e perciò molti, se non la maggior parte degli eventi sono probabilmente naturali. I 5 anni di dati mostrano grandi variazioni spaziali e temporali nel tasso di eventi e nel valore b. Gli eventi sono più superficiali di 8 km, con il 75% localizzato a profondità tra 3,0 e 5,5 km. Il massimo evento ha una magnitudo di circa 3.2. Si vede una chiara correlazione tra volume di acqua iniettata e numero degli eventi, sebbene il maggior numero degli eventi indotti risulta essere di piccola magnitudo. Non è evidente alcun cambiamento nella frequenza degli eventi con $M \geq 2,0$ (Batini et al., 1985) (pagg.43 - 44).”



Da Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Toscana (2013)

"La reiniezione dei condensati a Larderello-Valle del Secolo iniziò nella prima metà degli anni '70 allo scopo di evitare di entrare in conflitto con la normativa per il rilascio di sostanze potenzialmente pericolose nei corpi idrici di superficie. Si temeva, che l'arrivo di acqua fredda potesse danneggiare il campo di vapore in produzione".

"Così i primi pozzi di reiniezione vennero collocati lontano dalle aree di sfruttamento, verso le zone marginali dove era nota la presenza di acque meteoriche. Solo in un secondo tempo venne accertato come la reiniezione potesse rappresentare una efficace via per recuperare con maggiore efficienza l'energia termica contenuta nelle rocce del serbatoio, specie in quelle zone ad elevata permeabilità e con alto grado di sovrariscaldamento del vapore".

"Sin dal 1976 ENEL ha avviato un monitoraggio in continuo sulla microsismicità dei luoghi di sfruttamento, dopo aver portato a termine una ricostruzione della sismicità storica, sulla base dei dati riportati nel Catalogo Nazionale dei Terremoti per la Toscana meridionale. Questo copre il periodo dall'anno 1000 sino al 1990, seppur con diverso grado di accuratezza: gli eventi di intensità minore, III-IV grado della scala Mercalli - Cancani - Sieberg (MCS) sono riportati dal 1900, mentre dal 1790 solo quelli dal V-VI in su, dal 1700 quelli dal VII-VIII e dal 1000 solo gli eventi più disastrosi (>VIII grado della scala MCS). I dati mostrano come i sistemi geotermici toscani si trovano su una cintura sismicamente attiva".

"Dagli studi condotti nell'area di Travale/Radicondoli ed a Larderello, risultavano delle relazioni tra l'attività sismica e le operazioni di reiniezione dei fluidi impiegati nella produzione di energia elettrica. Tuttavia, la sismicità indotta era sempre di bassa intensità e non aumentava all'aumentare della quantità di fluidi reiniettati".

Da Associazione Ambientalista Amici della Terra (2008).

"La procedura di reiniezione dei condensati è considerata responsabile nel determinare fenomeni microsismici nelle zone interessate dalla presenza di coltivazioni geotermiche. Alcune ricerche in campo internazionale hanno accertato una possibile correlazione tra la reiniezione dei condensati e il verificarsi di eventi sismici d'intensità relativamente bassa, tuttavia la combinazione reiniezione - terremoto non è un principio generale applicabile a tutti i campi geotermici."

"Nella prima metà degli anni '70 la tecnica di reiniezione dei fluidi è stata introdotta nella zona di Larderello, con il duplice obiettivo di arrestare il decadimento produttivo di alcune zone del campo geotermico, e adeguare l'attività geotermoelettrica alla nuova normativa circa lo smaltimento dei reflui industriali nei corpi idrici di superficie (Legge n. 319 del 10 maggio 1976)."

"Insieme con essa ha inizio, nel 1976, un programma dell'Enel di monitoraggio sismico della zona, utilizzando come parametri di riferimento i dati sulla sismicità storica dell'area riportati nel catalogo Nazionale Terremoti. La rete di monitoraggio sismico che copre un'area di circa 800 km², nel periodo 1977-1993,

ha registrato più di 3000 eventi sismici con magnitudo inferiore a 2 e un solo evento di magnitudo 3.3. La maggior parte dei microsismi registrati sono stati localizzati ad una profondità tra 1 ed 8 km dalla superficie".

"Altri studi condotti negli anni '80 nella zona di Larderello (Batini et al. 1980), hanno confermato una correlazione positiva tra la tecnica di reiniezione e la sismicità di alcune zone del campo. Per gli autori le attività di reiniezione possono stimolare episodi di bassa sismicità in quei bacini geotermici a prevalente comportamento liquido, come per la zona di Travale, a causa delle variazioni di pressione nelle fratture, che alterano l'equilibrio idrodinamico del bacino geotermico stimolando l'attività sismica. Un effetto che non è stato registrato in quei bacini come Larderello-Castelnuovo, a prevalente comportamento gassoso, dove la procedura di reiniezione non ha prodotto nessun effetto sismico indotto."

Monte Amiata

Da Evans et al. (2012) che sintetizza i risultati di varie pubblicazioni.

"Il livello della sismicità di fondo è considerevole (Batini et al., 1980b, 1990), e tende a mascherare potenziali eventi indotti. Studi della sismicità storica dall'anno 1000 AD indicano che nell'area è avvenuto un evento relativamente grande con intensità IX MCS (Batini et al., 1990)"

"La sismicità ha in genere profondità inferiore a 8 km e tende ad avvenire in sciami con molti piccoli eventi (Moia, 2008). Un evento con magnitudo ML 3,5 è avvenuto nella zona del serbatoio nel 1983 (Moia et al., 1993). Comunque, potrebbe essere stato un evento naturale che sarebbe avvenuto anche in assenza di attività di iniezione (Batini et al., 1990; Moia et al., 1993). L'esame del catalogo dell'INGV mostra che un altro evento con magnitudo durata MD 3,5 è avvenuto nel 2000 a 10 km di distanza da Piancastagnaio ad una profondità di 5 km".

Da Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Toscana (2013)

"La rete di rilevamento installata nel 1982 ha segnalato ben 2000 sismi, con ipocentro a profondità inferiori ai 10 km ed intensità, in genere, inferiore a magnitudo 2. L'intensità massima è stata di magnitudo 3.5, che corrisponde al IV-V grado della scala MCS. Le esperienze sino ad oggi condotte indicano come la sismicità prodotta dallo sfruttamento delle risorse geotermiche e dalla reiniezione dei condensati sia rilevabile solo a livello strumentale".

Da Associazione Ambientalista Amici della Terra (2008).

"Anche per l'area del Monte Amiata i dati disponibili rilevati attraverso la rete di rilevamento locale presente dal 1977, hanno offerto indicazioni simili. I fenomeni sismici registrati in quest'area sono stati generalmente di intensità inferiori a magnitudo 2, e caratterizzati da bassi ipocentri a profondità comprese tra 1 e 5 km. ... Tra il 1997 e il 2000 l'area del Monte Amiata è stata interessata da alcuni episodi sismici di modesta entità, magnitudo 3.8, che hanno provocato danni ad abitazioni e suscitato preoccupazione e timori circa una possibile connessione tra

questi episodi e lo sfruttamento dei campi geotermici. Nel 2001 è stata siglata una convenzione triennale tra Regione Toscana e Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), per implementare il sistema di monitoraggio della zona. Il programma realizzato dall'INGV ha preso in esame i dati storici sulla sismicità dell'area, analizzando gli eventi ricadenti in un raggio di 20 km dal comune di Piancastagnaio. I dati storici oltre a segnalare la naturale tendenza sismica dell'area dell'Amiata, hanno permesso di rilevare come la maggior parte dei sismi avvenuti nella zona, posseggano caratteristiche di durata e intensità simili agli eventi del 1997 e del 2000."

La suddetta pubblicazione degli Amici della Terra (2008) riporta anche che, per un ulteriore approfondimento sulle possibili correlazioni tra gli eventi sismici e coltivazione dei campi geotermici, l'Enel ha fornito all'INGV i dati di produzione e reiniezione di fluido nel periodo gennaio 1995 - luglio 2000 e il catalogo degli eventi sismici localizzati dalla propria rete sismografica nella zona di Piancastagnaio. Dall'analisi di tali dati INGV conclude:

"In letteratura le condizioni necessarie per evidenziare una possibile relazione di causa-effetto tra attività di reiniezione ed eventi sismici sono due: la prima, è che l'evento sismico avvenga in zone non interessate prima da attività sismica; la seconda, che l'attività si manifesti dopo un breve intervallo dal momento della reiniezione"

"La sismicità correlata all'iniezione mostra, infatti, sia una dipendenza temporale da quest'ultima sia una concentrazione iniziale nei pressi del punto di reiniezione che tende a distribuirsi su un raggio più ampio con il procedere delle operazioni d'iniezione".

"La comparazione dei dati di reiniezione ricevuti da Enel con quelli riguardanti gli eventi sismici accaduti nello stesso periodo, non ha indicato nessun tipo di relazione. Durante il periodo, infatti, le operazioni di reiniezione sono state costanti, e quindi non indicative di un possibile rapporto causa-effetto, facendo propendere per una spiegazione casuale dei fenomeni sismici con andamenti nel tempo del tutto imprevedibili."

Nello stesso periodo su commissione della comunità Montana zona I-2, allo scopo di raccogliere maggiori informazioni sulla sismicità della zona, è stato assegnato alla società Edra il compito di realizzare un monitoraggio sismico, il cui studio si è focalizzato in particolare sull'analisi delle forme d'onda sismica, interpretate come possibili indicatori del legame tra attività di reiniezione e sismicità.

Le osservazioni offerte nello studio in esame secondo l'INGV *"non hanno rilevato una correlazione tra l'attività microsismica e la coltivazione del campo geotermico; le caratteristiche delle onde sismiche analizzate sono coerenti con quelle naturalmente presenti in altre aree vulcaniche, e determinate dalla fratturazione idraulica probabilmente connessa a variazioni di pressione dei fluidi all'interno delle fratture. Il tema della possibile relazione tra l'utilizzazione dei fluidi, e il manifestarsi di eventi sismici di bassa intensità rimane quindi aperto e suscettibile di ulteriori indagini."*

Aree geotermiche Laziali di Torre Alfina, Latera e Cesano

Una buona documentazione sulla sismicità indotta è disponibile per le aree geotermiche Laziali e fa riferimento a quattro pubblicazioni (Batini et al., 1980b; Carabelli et al.; 1984, Moia 2008; Evans et al., 2012).

Nel rapporto di Batini et al. (1980b) viene inizialmente descritta la sismicità storica delle tre aree nel periodo 1900-1975, mostrando che mentre Torre Alfina e Latera hanno un certo grado di sismicità crostale (ipocentri fino a 25 km e Magnitudo max 4.7), a Cesano non si è registrata alcuna attività sismica in quel periodo (pag. 50-53). Il rapporto descrive poi la sismicità delle aree di Torre Alfina e Latera registrata dalle reti sismiche installate dall'Enel e operative dal 1977.

In particolare per Torre Alfina vengono riportati i risultati del controllo microsismico eseguito alla fine degli anni '70, durante test di reiniezione nei pozzi RA1, e durante un loop produzione - reiniezione tra i pozzi A4 e A14.

Nel pozzo RA1, profondo 2710 m, è stata eseguita una serie di prove di iniezione durante le quali sono stati registrati 177 eventi nelle vicinanze del pozzo con $M_{max}=3.0$. Nel rapporto si afferma che *"un aumento dell'attività sismica è correlato chiaramente ai due periodi delle prove di reiniezione. In entrambi i casi la densità maggiore degli eventi sismici avviene in corrispondenza dei valori più alti di pressione registrati a testa pozzo (10 atm) con un flusso di acqua iniettato intorno a 110-150 m³/ora gli eventi sono cessati subito dopo la cessazione dell'iniezione. Per una dozzina di eventi ubicati in prossimità del pozzo RA-1 è stato possibile stimare la profondità (tra 1,1 e 3,0 km)"*.

Viceversa, nelle conclusioni del rapporto viene evidenziato che *"non c'è stato evidenza di intensificazione dell'attività sismica durante le prove di produzione e iniezione ai pozzi A14 e A4"*.

Per quanto riguarda il campo di Latera e le prove di iniezione del 1980 nel pozzo L2 si riporta che è stato osservato *"un aumento dell'attività sismica connesso con aumenti dei volumi d'acqua iniettati (fino a circa 30.000 m³ con portate di 100 m³/ora). I valori di magnitudo variano tra 1.5 e 2; la profondità focale degli eventi è ≤ 1 Km nelle vicinanze del pozzo e si approfondisce fino a 2 km allontanandosi da esso"*.

Il diverso comportamento osservato tra le prove di iniezione nei pozzi RA1 e L2 (con sismicità indotta) e quelle di estrazione - reiniezione nei pozzi A4 e A14 (nessuna sismicità indotta) viene spiegato come probabilmente dovuto alle diverse condizioni bariche dei test: nel primo caso le iniezioni erano avvenute a pressione, mentre nel secondo caso il fluido era stato iniettato in modalità "free-flowing".

Sempre relativamente al campo di Latera, il rapporto di Moia (2008), citato in alcune richieste di integrazioni/chiarimenti, riproduce sostanzialmente i dati e le considerazioni di Batini et al. (1980b) e di Carabelli et al. (1984), riportando alcuni

nuovi dati di test di reiniezione successivi al rapporto di Batini et al. (1980b). Poiché gli stessi dati sono stati di recente analizzati da Evans et al. (2012), si ritiene utile fornire una sintesi di quanto descritto in merito a specifici test con evidenza di sismicità indotta.

"Un evento con Magnitudo di 2.9, verificatosi il 9 dicembre 1984 vicino al pozzo L2, è avvenuto quando si stava iniettando il fluido prodotto dal pozzo L3D distante 2 km. Sfortunatamente i parametri di circolazione sono sconosciuti. Questo è il più grande evento che si pensa sia stato indotto da operazioni geotermiche a Latera".

"Una più completa analisi della risposta sismica del serbatoio all'iniezione è stata condotta nel pozzo L1 profondo 2.8 km tra giugno 1981 e maggio 1982 ... Sono avvenute tre iniezioni di fluido separate, con durate comprese tra 17 e 102 ore, a mesi di distanza, aumentando progressivamente le portate di 15, 25 e 83 l/s. Le pressioni corrispondenti a testa pozzo erano 5.5, 5.0 e 9.0 MPa. La pressione a testa pozzo ha raggiunto i 7.0 MPa all'inizio del primo test ma dopo è scesa a 5.0 MPa per le altre 61 ore di prova. La microsismicità intorno al pozzo è iniziata dopo poche ore e si è fermata dopo 35 ore. Sono stati registrati 223 eventi sismici con $M < 0.5$. La seconda iniezione di fluido è stata condotta con tassi più alti ma comparabile con la pressione alla testa del pozzo del maggio 1982 con durata di 102 ore. La microsismicità è iniziata soltanto 55 ore dopo l'iniezione, al termine della quale era stato iniettato 1,5 volte il volume netto del primo test. È persistita una attività sismica sporadica fino alla chiusura, registrando 148 eventi con una M_{max} di 0.4. Il terzo test con il più alto tasso di iniezione, è stato condotto nel maggio 1982 con una durata di 17 ore. Un alto tasso di microsismicità è cominciato quasi immediatamente ma è crollato dopo 6 ore. Sono stati registrati 370 eventi con $M_{max} = 0.5$. Gli ipocentri, durante tutti e tre i test di iniezione, sono stati localizzati tra 150 e 1.500 m dal pozzo, e ad una profondità compresa tra 1,5 e 2,0 km, che è vicina alla profondità alla quale il pozzo intercetta una faglia. E' chiaro che la sismicità è stata indotta e ha possibilmente riattivato la faglia".

"Il pozzo è stato trattato con acido poco dopo la terza iniezione che ha migliorato l'iniettività. Una iniezione successiva con una portata di 111 l/s e pressione alla testa del pozzo di 6.0 MPa non ha prodotto eventi sismici".

"Sono stati condotti ulteriori studi sulla relazione tra iniezione e sismicità locale a Latera nel pozzo L6 nel dicembre 1981. Il primo test è stato eseguito in rocce vulcaniche, alla profondità di 1,4 km con l'iniezione di un liquido di formazione con portata di 66 l/s e una pressione a testa pozzo di 7,5 MPa. Sono stati osservati circa 20 eventi, tutti di $M < 0$. La seconda serie di iniezioni è stata condotta il 18-19 dicembre in rocce carbonatiche, alla profondità di 1,7 km. La sequenza è iniziata con tre brevi iniezioni di durata di circa 2 ore, con portata di 8 l/s ed una pressione a testa pozzo di 13-14 MPa finendo poi con un trattamento con acido che ha incrementato la portata fino a 28 l/s e con pressioni alla testa del pozzo pari a 14.5 MPa per un'ora. La microsismicità inizia non appena aumenta la portata e finisce con la chiusura. È stata poi eseguita una iniezione di 24 ore a 28 l/s. L'attività microsismica è cominciata dopo 10 ore, anche se le

pressioni di testa pozzo erano sotto 13 MPa, ed è terminata con la chiusura. Dopo 2 giorni si ha l'ultima iniezione di fluidi per 20 ore, con una portata di 40 l/s ed una pressione media alla testa del pozzo pari a 14,5 MPa. La microsismicità è iniziata dopo 11 ore, raggiungendo un picco appena prima della chiusura ed è continuata per alcune ore in seguito. Circa 196 eventi sono stati intercettati, 28 di questi dopo la chiusura. Molti hanno magnitudo negativa, la Mmax è stata di 0.8. La localizzazione degli eventi si estende a S-E del pozzo ad una distanza compresa tra 200-1.500m".

In definitiva, la stragrande maggioranza della sismicità indotta rilevata a Latera risulta caratterizzata da bassi valori di magnitudo (da negative a ≤ 1.8), essendo connessa a fenomeni di "hydrofracturing" che cessano, contestualmente alla sismicità, quando con procedure di acidificazione si migliora la permeabilità dei pozzi. L'evento più grosso, con $M=2.9$, avvenuto nel 1984 nel pozzo L2, si è verificato comunque in un sito, il paese di Latera, già noto come sito sismico storico (evento del 1882 con Intensità MCS = VIII grado).

A tale riguardo è interessante riportare la seguente affermazione del rapporto Moia (2008): *"La sismicità indotta risulta strettamente legata al rilascio di parte dell'energia accumulata in seguito all'evolversi dei processi geodinamici in atto nella litosfera. Da ciò discende che l'intervento umano va considerato come un fattore capace di attivare un processo già in atto ed in parte "congelato" nella litosfera ma non già come fattore determinante il processo stesso".*

Infine nel campo di Cesano i test di reiniezione sono stati pochi e di limitata durata e, come riportato da Batini et al. (1980b), la verifica di una sismicità indotta è risultata molto controversa. Solo durante i test nel pozzo RC1, dove l'iniezione avveniva con sovrappressione a testa-pozzo, è stata osservata una sismicità indotta, molto modesta per numero di eventi e magnitudo, mentre non è stato osservato alcuno incremento di sismicità durante i test nel pozzo C5, dove la reiniezione è stata eseguita in modalità "free-flowing".

Più recentemente, nel 2014, è stato redatto da ISPRA un documento ("Rapporto sullo stato delle conoscenze riguardo alle possibili relazioni tra attività antropiche e sismicità indotta/innescata in Italia" nel quale sono citate anche tutte le esperienze fatte in ambito geotermico e sintetizzate nella tabella di seguito riportata.

Per quanto concerne la sismicità rilevata nei campi di produzione toscani di Larderello-Travale e del Monte Amiata si sottolinea che *"i dati disponibili mostrano l'occorrenza di eventi indotti di bassa magnitudo correlati ai processi di reiniezione dei fluidi, mentre il livello della sismicità naturale di fondo rende ancora dibattuta l'interpretazione degli eventi maggiori, considerati in alcune analisi naturali e in altre indotti/innescati".*

Pertanto viene indicato solo come "ipotizzato" lo stato di conoscenza sulle possibili relazioni tra attività di coltivazione e sismicità indotta.

Tabella 2.1a *Quadro Riassuntivo degli Episodi di Sismicità Indotta/Innescata documentati o Ipotizzati (da ISPRA, 2014)*

Tipologia Attività	Località	Prov.	Stato conoscenza	Periodo monitoraggio locale	M _{max} (anno)	I _{max}	Bibliografia
Campo Geotermico	Larderello-Travale	PI	I POTIZZATO	1978-1982	3,2 (1978)		Batini et al. (1980a, 1985) Evans et al. (2012)
	Amiata	GR/SI	I POTIZZATO	1982-1992	4,5 (2000)	VI	Mucciarelli et al. (2001)
			I POTIZZATO		3,5 (1983)		Batini et al. (1990), Moia et al. (1993), Evans et al. (2012)
	Latera	VT	DOCUMENTATO	1978-1982	2,9 (1980)		Batini et al. (1980b, 1990), Carabelli et al. (1984), Moia et al. (1993), Evans et al. (2012)
	Torre Alfina	VT	DOCUMENTATO	1978-1983	3,0 (1977)	III-IV	Batini et al. (1980b); Moia et al. (1993); Evans et al. (2012)
	Cesano	RM	DOCUMENTATO	1978-1984	2,0 (1978)		Batini et al. (1980b); Evans et al. (2012)

La sismicità nelle aree geotermiche laziali è invece dichiarata con stato di conoscenza “documentato” in quanto rilevata in concomitanza con specifici test di iniezione (di breve periodo e in condizioni fluido-dinamiche limite) e con specifiche reti di rilevamento appositamente allestite. Si evidenzia infatti che “I dati disponibili in concomitanza con specifici esperimenti di iniezione di fluidi documentano chiari esempi di eventi indotti, generalmente organizzati in sequenze di magnitudo da negativa a circa 2, con singoli eventi che raggiungono magnitudo massime di 2.9 a Latera e 3.0 a Torre Alfina”.

Si fa presente che la redazione di tale rapporto, richiesto dal Ministro dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (Prot. 0042579/GAB dell’8 agosto 2013) vede coinvolti, oltre all’Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale ISPRA, anche l’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia INGV, il Consiglio Nazionale delle Ricerche CNR, l’Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale OGS, il Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri e il Ministero dello sviluppo economico – Direzione Generale per le risorse minerarie ed energetiche.

2.2

RESTO DEL MONDO

Per quanto riguarda studi di sismicità eventualmente indotta dalla coltivazione di campi geotermici nel mondo, si ritiene esaustiva la recente rassegna presentata da Bromley (2012) che riassume le principali esperienze fatte a livello internazionale.

“Molti campi geotermici convenzionali sono in produzione da più di 25 anni e nella maggioranza di essi non è stata riportata alcuna sismicità indotta avvertita. Nei pochi casi in cui questo è avvenuto, la sismicità indotta è consistita di terremoti piccoli o microterremoti. La massima magnitudo è stata di 4.6 a The Geyser in California”.

“I livelli della sismicità indotta (numero di eventi e magnitudo) dipendono dalle condizioni naturali: lo stress e l’attrito locali, l’orientazione e l’ubicazione delle

faglie. In ambienti tettonici attivi, sono comuni livelli elevati di sismicità naturale, le faglie possono essere in condizioni di pre-stress e la sismicità può essere indotta da cambiamenti di stress”.

“I fattori che interessano la sismicità sono: a) stress per spostamento da contrazione volumetrica causata dall'estrazione di fluido; b) stress termici creati dall'iniezione di fluidi freddi in rocce calde; c) stress chimici associati con iniezione di salamoia o fluidi acidi, che causano indebolimento delle rocce”.

“I fattori controllabili sono: la pressione e la temperatura della reiniezione, il volume, la durata e il tasso di aumento della sismicità”.

“Delle centinaia di serbatoi geotermici convenzionali sviluppati a scala mondiale, solo pochi hanno prodotto eventi sismici indotti con una magnitudo risentita dalle persone, durante le normali operazioni di estrazione e reiniezione di fluidi. Questi eventi non hanno ridotto le operazioni nel serbatoio”.

“L'esperienza mostra che gli eventi sismici indotti nei progetti geotermici sono generalmente di piccola magnitudo. Comunque a causa della loro origine poco profonda, gli eventi più grandi vengono talvolta risentiti alla superficie. In alcuni casi, gli eventi sismici indotti generano una preoccupazione pubblica. ... Questa può scaturire dall'idea che eventi più grandi, potenzialmente causa di danno, potrebbero essere prodotti dalle attività geotermiche future. Comunque non ci sono stati esempi di danni significativi causati da eventi sismici indotti, cosicché la possibilità di un aumento nello scuotimento del terreno non rappresenta generalmente una preoccupazione pubblica, almeno che questa non venga alimentata da una montatura giornalistica”.

Sempre a livello mondiale, sono state fatte varie esperienze di "hydrofracturing" in ambito EGS (in Europa e negli USA in particolare), ma trattandosi di reiniezioni eseguite in condizioni estreme di assenza di permeabilità, con una fratturazione e relativa microsismicità volutamente indotta, non possono essere prese come casi rappresentativi della sismicità eventualmente indotta da una tradizionale coltivazione di campi geotermici, dove la reiniezione non viene generalmente eseguita in condizioni di idrofratturazione.

Comunque, anche tutte le esperienze fatte in questo settore hanno evidenziato il livello assolutamente microsismico della sismicità rilevata, con stragrande prevalenza di eventi con Magnitudo negativa. A titolo di esempio si segnala che nell'esperienza fatta nel Newberry EGS field in USA (Ghazal & Derek 2014) gli eventi sismici indotti hanno evidenziato un range di Magnitudo compresa tra -2.0 e +1.9. Inoltre, in esperienze europee è stata evidenziata la correlazione tra tempo e spazio nello sviluppo della microsismicità indotta, con eventi più distanti dal punto di iniezione man mano che aumentava il tempo della reiniezione stessa. Questa specificità ha consentito studi di correlazione tra diffusione della pressione e la fratturazione idraulica (Shapiro & Dinske.2009).

BIBLIOGRAFIA

Abercrombie, R. E. (1995), Earthquake source scaling relationships from 1 to 5ML using seismograms recorded at 2.5-km depth, J. Geophys. Res., 100, 24,015–24,036.

Amici della Terra, Firenze – Onlus (2008). “La risorsa geotermica per usi elettrici in Italia: Energia, Ambiente e Accettabilità sociale”.

ARPAT, Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale sito web: www.arpat.toscana.it

Batini F., C. Bufe, G.M. Cameli, R. Console, A. Fiordelisi (1980a). “Seismic monitoring in Italian geothermal areas 1. Seismic activity in the Larderello - Travale region”. Proceedings of Second DOE - ENEL Workshop for Cooperative Research in Geothermal Energy, 20–23 October, Berkeley, California USA. pp. 20–47.

Batini, F., Cameli, G.M., Carabelli, E., Fiordelisi, A. (1980b). “Seismic monitoring in Italian geothermal areas II: seismic activity in the geothermal fields during exploitation”. Proceedings of Second DOE-ENEL Workshop for Cooperative Research in Geothermal Energy, 20–23 October, Berkeley, California USA. pp. 48–85.

Batini, F., R. Console, and G. Luongo (1985). “Seismological study of the Larderello-Travale geothermal area”. Geothermics, 14, 255.

Batini F., Fiordelisi A., Moia F. (1990). “Main features of the seismicity in the Monte Amiata and LATERA geothermal areas (Italy)”. Proc. XXII Gen. Assoc. of the European Seismological Commission, Barcelona, pp. 649–654

Bommer J.J., Oates S., Cepedac J.M., Lindholmd C., Birda J., Torrese R., Marroquínf G., Rivase J. (2006). “Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project”. Eng. Geol. 83, 287-306. ISSN:0013-7952.

Bromley C. (2012). “Geothermal Induced Seismicity: Summary of International Experience”. IEA-GIA Enviromental Mitigation Workshop Taupo, 15-16 June 2012.

Bufe C., and Shearer M. (1980). “Geothermal induced seismicity - Bane or Blessing?” In: Proceedings of Second DOE-ENEL Workshop on Cooperative Research in Geothermal Energy, Report LBL-11555, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA, USA, October 20–22, pp. 86–97.



Cappetti G., Romagnoli P. and Sabatelli F. (2010). "Geothermal Power Generation in Italy 2005–2009 Update Report". Proceedings World Geothermal Congress Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.

Carabelli E., Fiordelisi A., Moia F. (1984). "Seismic monitoring during geothermal wells stimulation as contribution to the individuation of prevailing fracturation trends". Seminar on utilization of Geothermal Energy for electric power production and space heating, Florence (Italy) 14-17 May 1984.

Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C. e A. Amato (2006). "CSI Catalogo della Sismicità Italiana 1981-2002". Versione 1.1, INGV-CNT, <http://www.ingv.it/CSI/>.

Cladouhos T., Petty S., Foulger G., Julian B. and Fehler M. (2010). "Injection Induced Seismicity and Geothermal Energy". GRC Transactions, Vol. 34.

Combs J., and Hadley D. (1977). "Microearthquake investigation of the Mesa geothermal anomaly, Imperial Valley (California)". Geophysics, vol. 42, n.1.

Committee on Energy and Natural Resource United States Senate. June 19, 2012;

De Panfilis M. (1959). "Attività sismica in Italia dal 1953 al 1957". Annali di Geofisica, 12, 1.

DISS Working Group (2010). "Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.1.1". A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, © INGV. DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.1.1.

Edwards, A. L. (1972). Trump: A Computer Program for Transient and Steady State Temperature Distributions in Multidimensional Systems, National Technical Information Service, National Bureau of Standards, Springfield, Va.

Evans K.F., Zappone A., Kraft T., Deichmann N., Moia F. (2012). "A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO₂ reservoirs in Europe". Geothermics 41, 30– 54.

Ghazal Izadi and Derek Elsworth (2014). "Reservoir stimulation and induced seismicity: Roles of fluid pressure and thermal transients on reactivated fractured networks". Geothermics 51 (2014) pag. 368-379

GEISER (2012). Grant Agreement n° 241321-2, D3.1 – Evaluation of systematic relation between the seismic response to fluid injection and depth, injection pressure, crustal stress state and local structural geology. Seven Framework Programme.

Glassley E. (2010). Geothermal Energy, CRC Press, pp. 276.



Gruppo di lavoro CPTI (2004). "Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004"(CPTI04)". INGV, Bologna. DOI: 10.6092/INGV.IT-CPTI04.

Guglielmini T., Cappa F., Avouac J.P., Henry P., Elsworth D. (2015). Seismicity triggered by fluid injection-induced aseismic slip. Science Report, vol 348, issue 6240.

Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G. and Valensise G. (2007). "CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and Mediterranean Area (760 B.C.-1500)". INGV-SGA. <http://storing.ingv.it/cfti4med/>.

Gupta H.K., Chadha R.K. (1995). Induced seismicity. Birkhauser Verlag.

ISPRA (2014). Rapporto sullo stato delle conoscenze riguardo alle possibili relazioni tra attività antropiche e sismicità indotta/innescata in Italia.

Lay T, Wallace TC. (1995) Modern global seismology. Academic Press.

Mayer E.L. and Mc Evilly T.V. (1979). "Seismological investigations at the Geysers geothermal field". Geophysics, Vol. 44, N. 2 February 1979

McGarr, A. (2014). Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection. J. Geoph. Res., doi 10.1002/2013JB010597.

Moia F. (2008). "Individuazione ed applicazione di metodologie di monitoraggio di possibili fughe di CO₂ dai serbatoi di stoccaggio". Rapporto CESI, Area Produzione e Fonti Energetiche.

Peterson J., Rutqvist J., Kennedy M., Majer E. (2004). Integrated high resolution microearthquake analysis and monitoring for optimizing steam production at the Geysers Geothermal Field, California. California Energy Commission, Geothermal Resources development account Final Report for Grant, GEO-00-003.

Pondrelli S., Salimbeni S., Morelli A., Ekström G., Postpischl L., Vannucci G. and Boschi E. 2008. European-Mediterranean Regional Centroid Moment Tensor Catalog: solutions for 2005-2008, Phys. Earth Planet. Int., in press, 2011.

Rapporto Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) (2001). "Valutazione della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle emanazioni gassose nell'area amiatina in relazione all'utilizzazione dei campi geotermici da parte dell'Erga".

Romagnoli P., Arias A., Barelli A., Cei M., Casini M. (2010). "An updated numerical model of the Larderello-Travale geothermal system, Italy". Geothermics 39, Issue 4, 292–313.



Shapiro S., Dinske C. and Kummerow J. (2007). "Probability of a given-magnitude earthquake induced by a fluid injection". Geophys. Res.Lett. 34, 2007;

Shapiro S. A. and C. Dinske (2009). "Scaling of seismicity induced by nonlinear fluid-rock interaction". J. Geophys. Res. 114.

Shapiro S.A. and Dinske C. (2009)."Fluid-induced seismicity: Pressure diffusion and hydraulic fracturing". Geophysical Prospecting, 2009, 57, pag. 301-310.

Studio d'Impatto Ambientale – Impianto Pilota Geotermico di Castel Giorgio (2013). Allegato E – Sismicità Indotta. Documentazione da Sito Internet del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare: http://www.va.minambiente.it/Ricerca/SchedaProgetto.aspx?ID_Progetto=1373.

Zoback M.D. (2007). Reservoir geomechanics. Cambridge Univ. Press.