



## **Impianto Pilota Geotermico “Montenero”**

### **[ID:2777] Risposte alle Richieste di Integrazioni**

*Allegato 2: Sismicità indotta, subsidenza e relativi  
sistemi di monitoraggio*

*Preparato per:*  
**Gesto Italia S.r.l.**

Agosto 2015

*Codice Progetto:*  
P15\_GES\_015

Revisione: 0

**STEAM**  
**Sistemi Energetici Ambientali**  
Lungarno Mediceo, 40  
I – 56127 Pisa  
Telefono +39 050 9711664  
Fax +39 050 3136505  
Email : info@steam-group.net



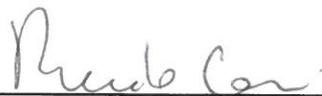
**STEAM**

GESTO Italia S.r.l.

## Impianto Pilota Geotermico “Montenero”

### [ID:2777] Risposte alle Richieste di Integrazioni

*Allegato 2: Sismicità indotta, subsidenza e relativi  
sistemi di monitoraggio*



Ing. Riccardo Corsi  
*Project Director*



Dott. Riccardo Caranova  
*Coordinatore Generale  
del Progetto*

Progetto	Rev.	Preparato da	Rivisto da	Approvato da	Data
P15_GES_015	0	PB, GB, AF	GB	RC, RC	21/08/2015

## **INDICE**

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>SISMICITÀ ASSOCIATA ALL'ESERCIZIO DI IMPIANTI GEOTERMICI A REIMMISSIONE TOTALE DEL FLUIDO</b>	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>RECENTI SVILUPPI DELLE RICERCHE SULLA SISMICITÀ ASSOCIABILE ALLA COLTIVAZIONE DELLE RISORSE ENERGETICHE DEL SOTTOSUOLO</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>VALUTAZIONE DEL MASSIMO TERREMOTO ATTESO CORRELATO ALLA COLTIVAZIONE DEL SERBATOIO GEOTERMICO DI MONTENERO</b>	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>SOGLIA MINIMA DI PRESSIONE PER L'INNESCO DI SISMICITÀ CON INIEZIONE DI FLUIDI</b>	<b>10</b>
<b>3.2</b>	<b>CORRELAZIONE MAGNITUDO-SUPERFICIE DI FAGLIA</b>	<b>12</b>
<b>3.3</b>	<b>POSSIBILE SISMICITÀ STIMOLATA DALL'IMPIANTO PILOTA DI MONTENERO: DETERMINAZIONE DELLA MAGNITUDO MASSIMA ATTESA</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>INTEGRAZIONI RELATIVE AL MONITORAGGIO MICROSISMICO</b>	<b>15</b>
<b>4.1</b>	<b>SISTEMA A SEMAFORO</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>SUBSIDENZA</b>	<b>18</b>
<b>5.1</b>	<b>DEFORMAZIONI E SUBSIDENZA A SEGUITO DELLA COLTIVAZIONE GEOTERMICA NELL'AREA DI MONTENERO</b>	<b>19</b>
<b>6</b>	<b>INTEGRAZIONI RELATIVE AL MONITORAGGIO DELLE VARIAZIONI VERTICALI DEL SUOLO (SUBSIDENZA)</b>	<b>21</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>22</b>

## 1

### **INTRODUZIONE**

Il presente documento costituisce un rapporto descrittivo degli effetti, stimati per mezzo di adeguati codici di calcolo, dovuti della coltivazione prevista nel Permesso di Ricerca per risorse geotermiche finalizzato alla sperimentazione di impianto pilota denominato "Montenero".

Nel caso specifico vengono di seguito illustrate una rassegna dei lavori e delle valutazioni effettuate in merito alla correlazione tra sismicità e reiniezione di fluidi nel sottosuolo, le stime relative agli effetti sulla microsismicità indotta e sui movimenti verticali del suolo.

Sono, inoltre, fornite le integrazioni richieste riguardanti i sistemi di monitoraggio della microsismicità e delle variazioni verticali del suolo (subsidenza) all'interno e nelle vicinanze dell'area di progetto.



PROGETTO

P15\_GES\_015

TITOLO

GESTO ITALIA SRL:  
IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO MONTENERO (GR):  
[ID:2777] RISPOSTE ALLE RICHIESTE DI INTEGRAZIONI  
ALLEGATO 2: SISMICITÀ INDOTTA, SUBSIDENZA E RELATIVI  
SISTEMI DI MONITORAGGIO

REV.

0

Pagina

1

2

## **SISMICITÀ ASSOCIATA ALL'ESERCIZIO DI IMPIANTI GEOTERMICI A REIMMISSIONE TOTALE DEL FLUIDO**

E' noto che le attività minerarie di estrazione e di reiniezione dei fluidi possono essere associate ad un incremento della microsismicità naturale, che tuttavia va valutata caso per caso, per definire l'effettivo contributo che la rimozione o la movimentazione dei fluidi profondi può determinare sulla perturbazione del campo di stress locale. Dalla letteratura fino ad oggi prodotta si evince che soltanto una piccola percentuale di queste attività ha generato terremoti al di sopra della soglia di avvertibilità umana e nessuno di questi ha determinato conseguenze o danni significativi sui beni immobili o sulla popolazione.

Si sottolinea che nella documentazione SIA inoltrata al MATTM il 20/06/2014 sono stati già ampiamente illustrati i lavori e le pubblicazioni tecnico-scientifiche inerenti la correlazione tra sismicità e iniezione di fluido in ambito geotermico.

In particolare, nell'*Allegato E* dello SIA (Caratterizzazione Sismica e Monitoraggio Microsismico) sono riportate le principali esperienze documentate in campi geotermici italiani (*paragrafo 3.2 a pag. 15*) e nel mondo (*paragrafo 3.3 a pag. 22*), con i relativi riferimenti bibliografici.

Per comodità del lettore, comunque, se ne sintetizzano di seguito gli elementi più rilevanti e significativi.

Come riconosciuto a livello scientifico internazionale, sussistono notevoli difficoltà nel discriminare in modo certo ed assoluto la sismicità indotta da quella naturale in aree geotermiche che, in quanto tali, sono caratterizzate da sempre da attività sismica di origine naturale, anche di medio e alta energia, connessa a fenomeni tettonici e vulcano-tettonici. Comunque, per quanto riguarda l'esperienza italiana, si può sintetizzare che la sismicità di origine probabilmente indotta è caratterizzata nella quasi totalità dei casi da eventi microsismici con Magnitudo locale  $\leq 2$ .

I valori di Magnitudo massima, relativi peraltro a eventi di dubbia origine indotta, sono stati di 3.2 per l'area di Larderello, di 3.5-3.8 per l'area del Monte Amiata, di 2.9 per l'area di Latera e di 3.0 nell'area di Torre Alfina (unico evento significativo indubbiamente correlabile alla iniezione di fluidi). Gli elementi di dubbio sull'origine di molti di questi eventi a maggior magnitudo scaturiscono dalla constatazione che, sebbene rilevati in concomitanza con attività di coltivazione geotermica, i siti ipocentrali coincidono con quelli storicamente noti nelle rispettive aree. Per tale motivo non è scientificamente corretto escludere a priori e categoricamente che possa trattarsi di eventi di origine naturale.



PROGETTO

P15\_GES\_015

TITOLO

GESTO ITALIA SRL:

IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO MONTENERO (GR):

 [ID:2777] RISPOSTE ALLE RICHIESTE DI INTEGRAZIONI  
 ALLEGATO 2: SISMICITÀ INDOTTA, SUBSIDENZA E RELATIVI  
 SISTEMI DI MONITORAGGIO

REV.

0

Pagina

2

Ciò non esclude, ovviamente, la doverosa attenzione tecnica e scientifica che deve comunque essere posta nel rilevare e analizzare tali fenomeni.

Analoghe esperienze sono note a livello mondiale, dove sono stati eseguiti anche ripetuti esperimenti di "hydrofracturing" (fratturazione idraulica artificiale) nell'ambito di progetti EGS e, per completezza di informazione, si riportano alcuni contributi estratti dagli atti del 112° Congresso del "COMMITTEE ON ENERGY AND NATURAL RESOURCES" svoltosi a Washington il 19 Giugno 2012.

Tema del Congresso era "INDUCED SEISMICITY FROM ENERGY TECHNOLOGIES INCLUDING CARBON CAPTURE AND STORAGE, ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEM, PRODUCTION FROM GAS SHALES AND ENHANCED OIL RECOVERY " e, qui di seguito sono citati alcuni interventi conclusivi più significativi relativamente all'energia geotermica, dai quali traspare tutta la problematicità e le incertezze scientifiche sulla correlazione tra attività di coltivazione e la sismicità eventualmente indotta.

*STATEMENT OF MURRAY W. HITZMAN (PROFESSOR OF ECONOMIC GEOLOGY, DEPARTMENT OF GEOLOGY AND GEOLOGICAL ENGINEERING, COLORADO SCHOOL OF MINES)*

- *Since the 1920s we have recognized that pumping fluids into or out of the Earth has the potential to cause seismic imbalance that can be felt. Only a very small fraction of injection and extraction activities at hundreds of thousands of energy development sites in the U.S. have induced seismicity at levels that are noticeable to the public.*
- *The committee concluded that while the general mechanisms that create induced seismic events are well understood, we are currently unable to accurately predict the magnitude or occurrence of such events due to the lack of a comprehensive data on complex natural rocks or systems in the subsurface and the lack of validated predictive models.*
- *The three different types of geothermal energy resources are:*
  - *"vapor-dominated", where primarily steam is contained in the pores or fractures of hot rock*
  - *"liquid-dominated", where primarily hot water is contained in the rock*
  - *"Enhanced Geothermal Systems" (EGS), where the resource is hot, dry rock that requires engineered stimulation to allow fluid movement for commercial development.*

*Although felt induced seismicity has been documented with all three types of geothermal resources, geothermal development usually attempts to keep a mass balance between fluid volumes produced and fluids replaced by injection to extend the longevity of the energy resource.*

*This fluid balance helps to maintain fairly constant reservoir pressure-close to the initial, pre-production value-and aids in reducing the potential for induced seismicity. Seismic monitoring at liquid-dominated geothermal fields in the western United States has demonstrated relatively few occurrences of felt induced seismicity. However, in vapor or steam dominated geothermal system at The Geysers in northern California, the large temperature difference*



*between the injected fluid and the geothermal reservoir results in significant cooling of the hot subsurface reservoir rocks. This has resulted in a significant amount of observed induced seismicity. EGS technology is in the early stages of development. Many countries including the United States have pilot projects to test the potential for commercial production. In each case of active EGS development, at least some, generally minor levels of felt induced seismicity have been recorded.*

- *Tens of thousands of waste water disposal wells are currently active throughout the country. Although only a few induced seismic events have been linked to these disposal wells, the occurrence of these events has generated considerable public concern. Examination of these cases suggests causal links between the injection zones and previously unrecognized faults in the subsurface.*

**STATEMENT OF WILLIAM LEITH (SENIOR SCIENCE ADVISOR FOR EARTHQUAKE AND GEOLOGIC HAZARDS, U.S. GEOLOGICAL SURVEY, DEPARTMENT OF THE INTERIOR)**

- *Industry has been working to expand the development of unconventional geothermal resources known as Enhanced Geothermal Systems (EGS), because of their significant potential to contribute to the U.S. domestic energy mix. These geothermal resources are widespread throughout the United States and are areas of high heat flow but low permeability. To make EGS projects viable, the permeability of geologic formations must be enhanced by injecting fluid at high pressure into the low-permeability formations and inducing shear slip on pre-existing fractures. This process of permeability enhancement generally induces a large number of very small earthquakes with magnitudes less than 2 (microearthquakes). The microearthquakes provide critical information on the spatial extent and effectiveness of reservoir creation.*

**STATEMENT OF MARK D. ZOBACK (PROFESSOR OF EARTH SCIENCES, DEPARTMENT OF GEOPHYSICS, STANFORD UNIVERSITY, STANFORD, CA)**

- *I believe that with proper planning, monitoring and response, the occurrence of small-to-moderate earthquakes associated with fluid injection can be reduced and the risks associated with such events effectively managed. No earthquake triggered by fluid injection has ever caused serious injury or significant damage.*

**RESPONSE OF MURRY W. HITZMAN TO THE FOLLOWING QUESTION FROM SENATOR BINGAMAN: "PLEASE PROVIDE WHAT PERCENTAGE OF WELLS DRILLED FOR EACH OF THE ENERGY TECHNOLOGIES IN U.S. HAVE BEEN PROVEN TO INDUCE SEISMICITY"**

- *Regarding geothermal energy, although some of the events in our report's database were clearly caused by injection to generate geothermal energy (for example at the Geysers and in the Coso geothermal field), geothermal wells*



PROGETTO

P15\_GES\_015

TITOLO

GESTO ITALIA SRL:

IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO MONTENERO (GR):

 [ID:2777] RISPOSTE ALLE RICHIESTE DI INTEGRAZIONI  
 ALLEGATO 2: SISMICITÀ INDOTTA, SUBSIDENZA E RELATIVI  
 SISTEMI DI MONITORAGGIO

REV.

0

Pagina

4

*tend to be drilled in areas that are often seismically active, making 'proof' of the tie to fluid injection difficult.*

## 2.1

## RECENTI SVILUPPI DELLE RICERCHE SULLA SISMICITÀ ASSOCIABILE ALLA COLTIVAZIONE DELLE RISORSE ENERGETICHE DEL SOTTOSUOLO

Dagli studi e dai risultati riportati negli atti del suddetto Congresso (Washington 19 Giugno 2012) si evince che la sismicità di maggiore energia prodotta nell'ambito delle suddette attività industriali è tipicamente associata alla iniezione di grandi volumi di fluidi all'interno dei reservoir produttivi. Ciò avviene in particolare per le attività estrattive di gas e petrolio. La fratturazione stimolata per incrementare la permeabilità delle rocce è invece tipicamente associata ad un incremento del numero di terremoti, ma di piccola magnitudo. Gli eventi sismici di maggiore energia sono correlabili alle attività industriali per le quali si produce, all'interno dei reservoir, uno squilibrio nel bilancio di massa dei fluidi contenuti, ovvero dove il bilancio idrogeologico del sottosuolo risulta in deficit o, più tipicamente, in eccesso di massa, per l'apporto di eccessive quantità di acqua con incremento della pressione di poro (McGarr, 2014).

Nonostante sia stata registrata un'attività sismica derivante dall'esercizio di impianti geotermici, essa è tipicamente di bassa magnitudo (<2.5). La mancata osservazione di sismicità, anche con magnitudo molto bassa, può imputarsi ad una effettiva assenza di terremoti, ma anche al fatto che questa sia contenuta entro magnitudo al disotto della soglia di avvertibilità da parte della popolazione, o che le reti di sorveglianza sismica non siano in grado di registrare piccoli eventi sismici (tipicamente sotto valori di magnitudo pari a 1.0).

Va sottolineato che oggi gran parte dei progetti geotermici italiani relativi ai nuovi Permessi di Ricerca (*Decreto Legislativo 11 febbraio 2010, n. 22*) prevedono l'estrazione e la contestuale re-iniezione dei fluidi nello stesso serbatoio, mantenendo così un bilancio di massa, all'interno di quest'ultimo, uguale nel tempo. Ciò consente di prolungare la durabilità della risorsa geotermica e mantenere su valori bassi lo sbilancio delle pressioni all'interno dei serbatoi, con condizioni via via più stazionarie, riducendo il rischio di possibile sismicità indotta.

Come osservato in precedenza, le attività geotermiche sono in genere associate a variazioni del campo di sforzi locali che agisce nella crosta superficiale (generalmente nello strato di interesse dei pozzi di produzione e re-iniezione, tra 1km e 4km di profondità), influenzando la possibile attività sismica nelle aree di coltivazione. Nella letteratura generale, un incremento di microsismicità delle aree soggette a coltivazione della risorsa geotermica viene associata a differenti effetti: reiniezione e/o estrazione dei fluidi, variazioni dello stato termico delle rocce, iniezione di fluidi ad alta pressione per incrementare la permeabilità (solo nel caso di impianti EGS).



PROGETTO

TITOLO

REV.

Pagina

P15\_GES\_015

GESTO ITALIA SRL:

IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO MONTENERO (GR):

[ID:2777] RISPOSTE ALLE RICHIESTE DI INTEGRAZIONI

ALLEGATO 2: SISMICITÀ INDOTTA, SUBSIDENZA E RELATIVI SISTEMI DI MONITORAGGIO

0

5

L'effetto principale, che verrà di seguito affrontato, riguarda la variazione dello stress nelle rocce intorno al reservoir (stress di Coulomb nel caso di un mezzo elastico ed isotropo) e la variazione di pressione di poro nelle rocce, in particolare a seguito dei processi di re-iniezione dei fluidi utilizzati per la produzione di energia. Le rocce soggette ad un campo di sforzi in regime elastico si fratturano seguendo il principio di rottura in cui lo sforzo di taglio è proporzionale allo sforzo normale per il coefficiente di frizione interno:

$$\tau = \sigma_n \mu \quad (1)$$

dove  $\tau$  = sforzo di taglio,  $\sigma_n$  = sforzo normale,  $\mu$  = coefficiente di frizione interno. L'aumento di pressione dei fluidi nei pori e nelle fratture preesistenti produce una diminuzione dello stress effettivo ( $\sigma_n$ ) secondo:

$$\tau = \sigma_{\text{effective}} = \sigma_n - P_p,$$

dove  $P_p$  è la pressione di poro.

In tal caso lo stress normale è ridotto di una quantità pari alla pressione idrostatica e l'equazione (1) in presenza di pressione di poro diviene:

$$\tau = (\sigma_n - P_p) \mu \quad (2)$$

Oltre alla reiniezione di fluidi anche l'estrazione di questi potrebbe essere associata a sismicità indotta.

La rimozione del fluido geotermico può determinare una variazione del campo di stress locale. In particolare, l'effetto di tale rimozione può riorientare la direzione dello stress principale. In tal caso, la rottura a taglio può avvenire in mezzi fratturati, quando la nuova orientazione dello stress principale risulta ottimale rispetto al piano di faglia e la variazione dello stress di poro viene propagata nel mezzo saturo.

Questo processo è più complesso da studiare, ed anche la sua modellazione risulta generalmente meno consistente da un punto di vista fisico, per la mancanza di robusti vincoli geologici, in particolare per quanto concerne l'orientazione dello stress e la sua magnitudo. Si tratta tuttavia di un effetto meno importante rispetto a quello prodotto dalla reiniezione dei fluidi.

Per definire con adeguato grado di attendibilità la correlazione tra attività di coltivazione e sismicità di una determinata area geotermica è necessario conoscere con sufficiente dettaglio la sismicità storica e recente dell'area e, in particolare, la distribuzione temporale degli eventi, la magnitudo e la distribuzione spaziale in superficie ed in profondità. Inoltre, deve essere assolutamente predisposta una opportuna rete di monitoraggio sismico nell'area dell'impianto produttivo, in modo da registrare possibili variazioni del pattern sismico e dell'energia degli eventi rispetto al background.

Le esperienze sino ad oggi condotte indicano come la sismicità prodotta dalla coltivazione delle risorse geotermiche e dalla re-iniezione dei fluidi sia rilevabile



quasi sempre solo a livello strumentale, fatta eccezione per gli *Enhanced Geothermal Systems* (EGS) dove l'immissione dei fluidi viene eseguita ad alta pressione (*Figura 2.1a*).

Oltre alle osservazioni derivanti dalla letteratura generale, sopra riportate, vanno certamente menzionati alcuni studi di settore più recenti sulla sismicità associata all'iniezione dei fluidi (triggered/induced seismicity) (*McGarr, 2014; Guglielmini et al., 2015*), dai quali emerge una più chiara correlazione tra il massimo terremoto (indotto) atteso ed il volume dei fluidi iniettati.

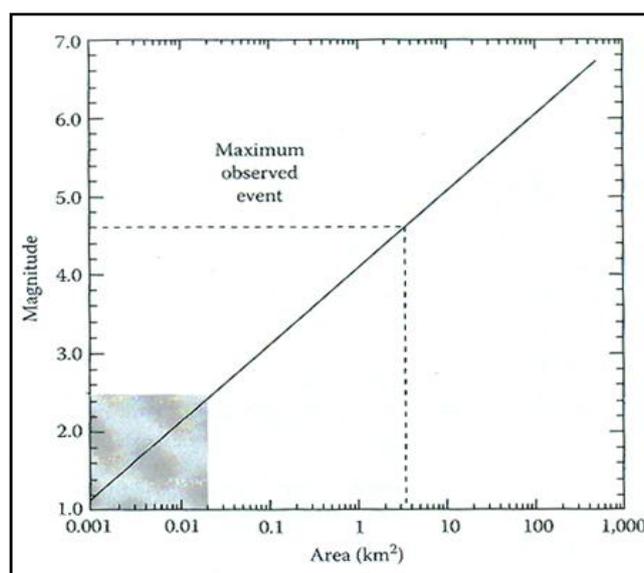
McGarr (2014) evidenzia che tra le attività che implicano l'iniezione dei fluidi e che possono generare sismicità rientrano 4 categorie rappresentative, ovvero: iniezione di fluidi per incremento di produttività dei serbatoi petroliferi e di gas (wastewater disposal) iniezione di fluidi in attività EGS, fratturazione idraulica (fracking) ed iniezione ad alta pressione per studi scientifici sulla sismicità.

Nei casi menzionati si evidenzia una correlazione tra volumi di acqua iniettata e incremento della sismicità, con eventi che solo in alcuni casi raggiungono magnitudo inusualmente elevate in relazione ai volumi utilizzati.

E' importante sottolineare che tra i casi per i quali *McGarr* trova una correlazione diretta tra iniezione di fluidi e terremoti non esistono quelli relativi agli impianti geotermici tradizionali. E' possibile che la mancanza di reti sismiche dense, nelle zone dove insistono tali impianti geotermici, non consenta di registrare un eventuale incremento della microsismicità, specie per valori di magnitudo <1.

**Figura 2.1a**

***Relazione tra magnitudo momento e area di rottura delle superfici di faglia, basata sulla relazione empirica di Well and Coppersmith (1994). L'area in grigio include la magnitudo della maggior parte dei terremoti e dell'attività microsismica osservata nelle zone di coltivazione geotermica. Come si evince dalla figura le superfici di faglie sismogenetiche nelle zone geotermiche sono sempre molto contenute. Il massimo evento osservato in aree geotermiche è da relazionarsi ad attività di immissione dei fluidi ad alta pressione (EGS) (da Glassley, 2010).***



Attività di questo genere (di sola iniezione) possono creare uno squilibrio nel bilancio totale di massa dei fluidi ospitati in un determinato volume di roccia (serbatoio), con variazioni consistenti del campo di stress locale. A tali variazioni possono essere associati terremoti tipicamente di bassa magnitudo, la cui probabilità di accadimento è correlata non solo ai volumi iniettati, ma anche alla tettonica locale, alla presenza e all'orientamento rispetto allo stress principale massimo delle faglie sismogenetiche, al livello di stress critico nelle rocce.

La relazione tra volume iniettato e magnitudo massima dei terremoti è indicativa del fatto che l'esistenza di fratture e faglie all'interno delle rocce determina un limite massimo oltre il quale lo stress non può essere più accumulato e viene liberato attraverso rotture fragili o fragile-duttile. Tale limite è dipendente dalla resistenza a frizione delle discontinuità planari (*Jaeger and Cook, 1979; Zoback, 2007*).

In ogni caso la bassa sismicità o la sua assenza può essere imputabile, alla luce di quanto sopra esposto e da un punto di vista della fisica del processo, ai volumi di fluido in gioco nel bilancio totale di massa, che per gli impianti come quello in progetto nella zona di Montenero non apportano volumi in eccesso (il bilancio totale nel serbatoio geotermico è in pari), determinando sul lungo termine l'instaurarsi di una nuova condizione fisica stazionaria per quanto concerne le variazioni di pressione e di temperatura nel serbatoio geotermico. La correlazione empirica, per la sola attività di iniezione, proposta da McGarr (2014) non può essere applicata ai casi in cui la variazione totale dei volumi di fluidi all'interno del serbatoio è nulla,  $\Delta V=0$ , come avviene per gli impianti geotermici con re-iniezione totale.

Per quanto concerne la situazione italiana, in relazione al rapporto tra coltivazione geotermica e sismicità, nell'ambito di una convenzione triennale tra Regione Toscana e Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (*INGV, 2006*), l'Enel ha fornito all'INGV, in tempi relativamente recenti, i dati sull'attività di estrazione e re-iniezione nell'area geotermica Toscana, nel periodo compreso tra gennaio 1995 e luglio 2000 e il catalogo degli eventi sismici localizzati dalla propria rete sismografica, che ricadevano in particolare nella zona di Piancastagnaio, area Monte Amiata.

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 re-iniezione ricevuti da Enel con quelli riguardanti gli eventi sismici accaduti nello stesso periodo, non ha indicato secondo il rapporto dell'INGV (*INGV, 2006*) nessun tipo di relazione. Durante il periodo, infatti, le operazioni di re-iniezione 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.

Secondo l'INGV, inoltre, uno studio eseguito da EDRA nell'area del Monte Amiata per l'analisi delle forme d'onda come possibili indicatori della correlazione tra reiniezione e sismicità, non ha rilevato tale correlazione.

Le caratteristiche delle onde sismiche analizzate, infatti, sono ritenute coerenti con quelle naturalmente presenti in altre aree vulcaniche non interessate da attività di coltivazione geotermica e, quindi, associabili alle naturali variazioni di pressione dei fluidi circolanti all'interno del sistema vulcanico.

Il tema della possibile relazione tra coltivazione geotermica e il manifestarsi di eventi sismici di bassa intensità rimane quindi aperto e suscettibile di ulteriori indagini.

Infatti, sempre per quanto concerne la Toscana, se da un lato l'area del Monte Amiata è naturalmente considerata zona sismica e quindi i terremoti non possono essere considerati eventi eccezionali per la zona, d'altra parte le conclusioni offerte nello studio non escludono che le attività geotermiche possono rappresentare condizioni in grado di stimolare eventi microsismici. Il potenziamento del sistema di sorveglianza geofisica del territorio, rappresenta in tale contesto uno strumento essenziale per ottenere maggiori informazioni circa la natura, spontanea o indotta degli eventi sismici.



PROGETTO

P15\_GES\_015

TITOLO

GESTO ITALIA SRL:  
IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO MONTENERO (GR):  
[ID:2777] RISPOSTE ALLE RICHIESTE DI INTEGRAZIONI  
ALLEGATO 2: SISMICITÀ INDOTTA, SUBSIDENZA E RELATIVI  
SISTEMI DI MONITORAGGIO

REV.

0

Pagina

9

## 3

**VALUTAZIONE DEL MASSIMO TERREMOTO ATTESO CORRELATO ALLA COLTIVAZIONE DEL SERBATOIO GEOTERMICO DI MONTENERO**

Dai dati bibliografici sulla sismicità storica e attuale dell'area di Montenero, riportati in Allegato E dello SIA, si evince che l'area del progetto pilota, almeno negli ultimi 1000 anni, non è stata interessata da terremoti significativi, sia per frequenza di accadimento che per energia.

Poco più di una decina di eventi sono segnalati all'interno o nelle immediate vicinanze dell'area, tutti rilevati in tempi più recenti dalle reti sismiche esistenti e, tra questi, solo due eventi hanno raggiunto una magnitudo massima pari a 2.1. Ciò fa ipotizzare l'assenza di strutture sismogenetiche di rilievo in grado di produrre terremoti di elevata magnitudo.

L'assenza di strutture sismogenetiche individuabili in epoca storica e recente attraverso l'accadimento di terremoti significativi, così come la mancanza di evidenze tettoniche di tali strutture, sia superficiali che profonde dedotte da rilievi geofisici, non consente di stimare le dimensioni di eventuali superfici di faglia presenti nell'area.

In tal caso è utile procedere secondo la metodologia di seguito descritta. Una valutazione generale del massimo terremoto potenziale associato all'iniezione di fluidi può essere ottenuta assumendo che la variazione di pressione di poro in un determinato volume di roccia possa attivare fenomeni di scorrimento lungo le faglie pre-esistenti che attraversano tale volume; in tal caso, è possibile calcolare la massima superficie di una potenziale faglia che attraversa il volume di roccia all'interno del quale si oltrepassa una data soglia di pressione (soglia minima).

La scelta della soglia di pressione minima da utilizzare non è semplice e, come osservato in precedenza, può fortemente dipendere dalle condizioni geologiche, e geodinamiche, locali. In tal caso è utile porsi nelle condizioni più conservative possibili, in modo da ottenere risultati cautelativi ai fini della valutazione della possibile sismicità indotta.

Di seguito viene riportato il metodo adottato per la stima della soglia minima di pressione per l'innescò della sismicità e per la successiva valutazione del massimo terremoto atteso.

## 3.1

**SOGLIA MINIMA DI PRESSIONE PER L'INNESCO DI SISMICITÀ CON INIEZIONE DI FLUIDI**

Come osservato in precedenza, il processo di re-iniezione dei fluidi riduce lo stress normale, incrementando così il rapporto effettivo tra *shear stress* (stress di



PROGETTO

P15\_GES\_015

TITOLO

GESTO ITALIA SRL:

IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO MONTENERO (GR):

[ID:2777] RISPOSTE ALLE RICHIESTE DI INTEGRAZIONI

ALLEGATO 2: SISMICITÀ INDOTTA, SUBSIDENZA E RELATIVI SISTEMI DI MONITORAGGIO

REV.

0

Pagina

10

taglio) e stress normale. A pressioni sufficientemente elevate può essere innescato il processo di scorrimento tra superfici di faglia, che produce sismicità.

Da un punto di vista empirico, tale processo può essere quantificato nel modello di rottura di Coulomb, per un mezzo omogeneo e isotropo:

$$\tau = S_0 + \mu[\sigma - P]$$

Dove,  $\tau$  è lo sforzo di taglio,  $S_0$  è la coesione delle rocce,  $\mu$  il coefficiente di attrito interno,  $\sigma$  è lo stress normale e  $P$  la pressione di poro.

Per fratture pre-esistenti l'espressione di Coulomb si reduce all'equazione:

$$\tau = \mu[\sigma - P] \text{ (Jaeger et al., 2007).}$$

La soglia minima di variazione di pressione nelle rocce necessaria per indurre sismicità è empiricamente associata a valori maggiori di 0,1 MPa (1 bar) (Gupta and Chadha, 1995). Si tratta tuttavia di un valore teorico, mai verificato sperimentalmente, poiché in molti casi (iniezione di fluidi, fracking, etc), i valori di sovra-pressione misurati, oltre i quali si genera sismicità indotta, sono tipicamente da uno a due ordini di grandezza superiore (minimo 20 bar).

D'altro canto, il valore di soglia dipende dalle condizioni geologiche locali, dal livello di stress pre-esistente nelle rocce (condizioni di stress critico), dall'orientazione dello stress locale rispetto ai piani di faglia, dal volume sismogenetico in grado di produrre terremoti (transizione fragile-duttile).

È evidente che l'insieme di queste variabili rende più complessa la scelta apriori di una soglia critica di pressione, oltre la quale può essere indotta attività sismica. Nei casi sperimentali l'idro-fratturazione e la sismicità associata si realizzano con iniezione di fluidi a pressione tra 20 e 200 bar (2-20MPa) all'interno del pozzo, mantenendo costanti questi valori per molte ore o per giorni (Gupta and Chadha, 1995).

E' possibile, tuttavia, calcolare analiticamente la variazione di pressione di poro ( $\Delta P$ ) necessaria per iniziare uno scorrimento sismico lungo una faglia, utilizzando il metodo proposto da McGarr (2014).

Partendo dall'equazione di rottura di Coulomb ( $\tau = S_0 + \mu[\sigma - P]$ ), si assume che lo stato di stress di una faglia ottimamente orientata, all'interno di un volume sismogenetico, è contenuto in valori limite pari allo stress drop ( $\Delta\tau$ ) tipico dell'area. In tal caso, più lungo è il tempo intercorso rispetto all'ultimo terremoto prodotto dalla faglia, più il valore di stress di carico sulla faglia stessa si avvicina a quello di  $\tau$  (dell'equazione di Coulomb).

Al contrario, se il terremoto è appena accaduto la faglia sarà caricata da uno stress effettivo pari a  $\tau - \Delta\tau$ . In tal caso, lo stress di taglio iniziale agente sulla faglia (ottimamente orientata per lo scorrimento sismico), sarà contenuto nel range  $S_0 + \mu[\sigma - P]$  e  $S_0 + \mu[\sigma - P] - \Delta\tau$ , e dunque l'incremento di pressione di poro ( $\Delta P$ ) necessario per causare lo scorrimento sismico (terremoto) sarà pari a:



$$\Delta P = \Delta \tau / 2\mu \quad (3)$$

L'equazione (3) può essere quindi utilizzata per il calcolo della pressione limite per l'innescò di un terremoto a seguito di un aumento di pressione di poro per iniezione di fluidi, assumendo una faglia ottimamente orientata rispetto allo stress principale massimo.

I valori di stress drop variano tipicamente da alcuni bar (per le aree vulcaniche attive) fino ad alcune centinaia di bar per le aree tettoniche (*Abercrombie, 1995*). Per le aree tettoniche dell'Italia centrale e per i terremoti di maggiore energia i valori di stress drop sono tipicamente superiori a 100bar, (*Cocco and Rovelli, 1989*).

Tuttavia, in considerazione della bassa magnitudo tipicamente associata ai terremoti indotti da re-iniezione, è cautelativo utilizzare valori di stress drop minori, pari a 30bar (*Abercrombie, 1995*). In tal caso, per un valore tipico del coefficiente di frizione  $\mu=0.6$  (*Jaeger et al., 2007*), l'equazione (3) fornisce un valore di  $\Delta P=25$ bar.

E' evidente che tale valore è molto al disopra dei valori massimi di  $\Delta P$  ottenuti dalla simulazione numerica dell'impianto geotermico pilota di Montenero (si veda *Allegato 1*), del ché implicherebbe che le variazioni di pressione generate dalla coltivazione dell'impianto sono insufficienti a produrre terremoti, secondo le assunzioni del modello adottato.

Tuttavia, per arrivare ad una valutazione più cautelativa possibile del massimo terremoto atteso, si è deciso di utilizzare comunque il valore di pressione massimo ottenuto dalle simulazioni numeriche, sebbene inferiore a quello teorico stimato, ovvero il valore di pressione contenuto all'interno di un volume che sia quantitativamente apprezzabile dalla simulazione numerica

### 3.2

#### CORRELAZIONE MAGNITUDO-SUPERFICIE DI FAGLIA

L'area di rottura associata a eventi di bassa magnitudo (generalmente osservati in aree geotermiche e attribuibili a iniezione di fluidi) è tipicamente dell'ordine di alcune centinaia di  $m^2$  fino ad alcune migliaia di  $m^2$  (*Peterson et al., 2004*), come già evidenziato anche dalla relazione empirica di Well and Coppersmith (1994) di *Figura 2.1a*.

In generale è possibile correlare empiricamente la magnitudo momento ( $M_w$ ) di un terremoto alla superficie di faglia mobilizzata, secondo la seguente equazione (assumendo una faglia circolare):

$$M_w = \frac{2}{3} \text{Log} \left( \frac{16}{7} \Delta \sigma r^3 \right) - 6 \quad (4) \quad [\text{Lay T, Wallace TC. (1995); Scholz (2008)}]$$

dove  $\Delta \sigma$  è lo stress drop,  $r$  il raggio equivalente per una faglia circolare.



Conoscendo i valori medi di stress drop, per i terremoti di una determinata area, è possibile ottenere le magnitudo momento dei terremoti generati da faglie con differenti superfici.

### 3.3 POSSIBILE SISMICITÀ STIMOLATA DALL'IMPIANTO PILOTA DI MONTENERO: DETERMINAZIONE DELLA MAGNITUDO MASSIMA ATTESA

Alla luce di quanto esposto in precedenza è possibile ora stimare il valore massimo di magnitudo attesa per un terremoto generato dall'esercizio dell'impianto pilota di Montenero, considerando la massima superficie di una potenziale faglia che attraversa il volume di roccia all'interno del quale si oltrepassa la soglia di pressione minima (soglia minima).

In questa analisi va evidenziato in primo luogo che i valori di variazione di pressione, in particolare gli incrementi nella zona di reiniezione, sono al disotto delle suddette soglie sperimentali osservate in molti processi industriali di reiniezione di fluidi e sono inferiori al valore teorico ottenuto dall'analisi dei precedenti paragrafi.

In generale è possibile quindi affermare che le variazioni teoriche del campo di stress locale sono tali da non produrre sismicità significativa, o potrebbero essere tali da generare microsismi la cui magnitudo è al disotto della soglia di registrazione delle reti di monitoraggio sismico nazionale.

Ad ogni modo, per un'analisi ed una valutazione più cautelativa della possibile sismicità associata all'iniezione dei fluidi, nel caso in esame, si è assunto il valore cautelativo per la soglia minima di pressione pari a 4bar.

Questo valore è quello per il quale è possibile valutare un volume quantitativamente apprezzabile in cui si verificano le massime variazioni di pressione. Per valori superiori (fino al massimo quasi puntuale di 5bar) i volumi coinvolti risultano troppo ridotti e poco significativi da un punto di vista fisico e numerico.

Le modellazioni numeriche del serbatoio geotermico di Montenero (Allegato 1) mostrano che nella zona di re-iniezione, l'incremento massimo di pressione di 4bar è contenuto all'interno di un volume pari a circa  $1.5 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ ; la corrispondente superficie massima di faglia che può attraversare tale volume è pari a  $7 \cdot 10^{-4} \text{ km}^2$  ed il raggio della faglia circolare equivalente è di alcune decine di metri.

Per quanto concerne i valori di stress drop, come esposto nel paragrafo 3.1, viene adottato un valore pari a 30bar. Utilizzando i suddetti parametri di stress drop e raggio equivalente della faglia circolare nell'equazione (4), si ottiene una magnitudo massima pari a 0.9. Tale valore è pari a circa 1.2 se si aumenta il valore di stress drop a 100bar.



Va infine evidenziato, come già osservato in precedenza, che la valutazione eseguita è estremamente cautelativa poiché:

- l'area in oggetto si caratterizza per una bassa sismicità;
- le eventuali strutture sismogenetiche attive dovrebbero avere dimensioni molto ridotte in ragione del massimo terremoto registrato nell'area che è pari a 2.1 e dell'assenza di eventi rilevanti avvenuti in epoca storica;
- la probabilità che una faglia sismogenetica attraversi interamente il volume in cui si verificano incrementi di pressione al disopra della soglia minima di riferimento (ipotesi da noi assunta) è quindi estremamente bassa se non del tutto improbabile;
- le variazioni di pressione più significative a seguito della coltivazione del campo geotermico di Montenero (simulazione numerica) sono contenute in volumi molto ridotti ed hanno valori tipicamente al disotto di quelli osservati sperimentalmente per l'innescio di terremoti indotti.



PROGETTO

P15\_GES\_015

TITOLO

GESTO ITALIA SRL:  
IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO MONTENERO (GR):  
[ID:2777] RISPOSTE ALLE RICHIESTE DI INTEGRAZIONI  
ALLEGATO 2: SISMICITÀ INDOTTA, SUBSIDENZA E RELATIVI  
SISTEMI DI MONITORAGGIO

REV.

0

Pagina

14

#### **INTEGRAZIONI RELATIVE AL MONITORAGGIO MICROSISMICO**

Le indicazioni riportate nella documentazione SIA inoltrata al MATTM il 20/06/2014, circa il progetto della rete di monitoraggio sismico locale, sono relative essenzialmente al numero delle prevedibili stazioni sismologiche di nuova installazione, almeno 7 e tutte con sensori a tre componenti, opportunamente integrate con almeno una stazione già esistente della rete nazionale di INGV (ARCI), per complessive 8 stazioni.

A seguito anche di incontri e discussioni con esperti INGV e dei suggerimenti ricevuti, si ritiene che una rete di 7-8 stazioni opportunamente distribuite ed equipaggiate con strumentazione adeguata sia più che sufficiente a rilevare e caratterizzare la sismicità e microsismicità locale di un'area di modeste dimensioni (circa 30 km<sup>2</sup>) come quella di Montenero.

Le 10 stazioni suggerite dal Settore VIA della Regione Toscana comporterebbero un miglioramento marginale nella caratterizzazione sismologica locale a fronte di un significativo incremento di oneri di realizzazione.

Per quanto riguarda poi la specificazione che le stazioni siano dotate di sensori a banda larga, si riporta quanto indicato nelle "linee guida" emanate dal Gruppo di Lavoro istituito dal MISE: "*Si raccomanda l'installazione di almeno un sensore a banda estesa o larga (periodo proprio  $T \geq 20-40$  s, e frequenza massima di rilevazione non inferiore a 80 Hz) presso una stazione interna alla rete dedicata*". Pertanto, almeno una stazione sarà certamente equipaggiata con sismometro a banda larga e tale stazione potrebbe essere la stessa stazione ARCI di INGV, già allestita con tale tipologia di sensore.

D'altro canto, nella suddetta documentazione SIA viene anche indicata una probabile configurazione geometrica della rete locale (*Figura 3.4b a pag.25*), con le stazioni distribuite concentricamente al polo di produzione/reiniezione e posizionate a distanze crescenti che, con la stazione INGV più lontana, arrivano fino a circa 7-8 km di distanza dallo stesso. Ciò implica che la rete di rilevamento locale coprirebbe un'area almeno doppia rispetto a quella totale del progetto.

A tale riguardo si sottolinea che le sole stazioni della rete INGV già esistenti in prossimità dell'area del Permesso di Ricerca "Montenero" hanno permesso di avere un buon quadro preliminare riguardante anche la micro sismicità naturale.

Nella documentazione di progetto, non sono stati effettivamente forniti ulteriori dettagli tecnico-progettuali della rete, mentre è stato indicato INGV come uno dei possibili, anche se preferibili gestori.



PROGETTO

P15\_GES\_015

TITOLO

GESTO ITALIA SRL:

IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO MONTENERO (GR):

[ID:2777] RISPOSTE ALLE RICHIESTE DI INTEGRAZIONI  
ALLEGATO 2: SISMICITÀ INDOTTA, SUBSIDENZA E RELATIVI  
SISTEMI DI MONITORAGGIO

REV.

0

Pagina

15

Infatti i contatti preliminari con INGV hanno permesso non solo di recepire suggerimenti per ottimizzare il progetto di monitoraggio (configurazione e gestione della rete locale), ma anche e soprattutto di predisporre le basi per una futura collaborazione operativa.

Comunque, in considerazione dei consistenti costi prevedibili, non si può escludere che venga indetta una gara tra più soggetti specializzati (enti/società) per una comparazione economica delle offerte per la realizzazione e gestione della rete (scelta dei siti e della strumentazione di rilevamento dati, installazione delle stazioni sismometriche, teletrasmissione e processing dei dati).

In ottemperanza alle indicazioni fornite dalle "linee guida" emanate dal Gruppo di Lavoro istituito dal MISE nel Novembre 2014, benché non vincolanti e ad oggi definite solo per le attività di coltivazione di idrocarburi e stoccaggio gas, tali indicazioni saranno comunque considerate come un fondamentale punto di riferimento.

In particolare, le caratteristiche progettuali della rete di monitoraggio sismico locale possono essere meglio definite ed approfondite, come specificato nei punti seguenti.

- a) La rete sarà in grado di rilevare e localizzare eventi sismici caratterizzati anche da bassi valori di magnitudo locale ( $0 \leq ML \leq 1$ ).
- b) Ogni stazione sarà equipaggiata con un sensore triassiale a elevata sensibilità (sismometro a corto periodo) e, se confermato anche dalle linee guida specifiche per la geotermia, con un sensore triassiale ad elevata dinamica (accelerometro).
- c) Almeno una stazione sarà dotata anche di sensore a banda estesa o larga per la determinazione esatta di magnitudo medio-alte.
- d) I segnali saranno acquisiti in continuo e con frequenza di campionamento non inferiore a 200 Hz per i sismometri e a 100 Hz per gli accelerometri.
- e) Circa le indicazioni di acquisire dati per almeno 1 anno prima dell'inizio delle attività di perforazione, per definire e dettagliare le caratteristiche sismologiche in condizioni locali "indisturbate", si fa presente che l'allestimento della rete potrà aver inizio solo ad autorizzazione ricevuta e che, trattandosi di un progetto pilota, i tempi per l'inizio delle perforazioni saranno necessariamente contenuti. Pertanto, pur non garantendo i 12 mesi di registrazione preliminare, si farà il possibile per assicurare la funzionalità della rete qualche mese prima dell'inizio delle attività di perforazione e relativi test di produzione/reiniezione.

In questo periodo verrà garantita la trasmissione dei segnali ad un centro di acquisizione per una verifica continua della funzionalità delle stazioni stesse e per la loro manutenzione, mentre l'elaborazione e la presentazione dei dati sarà eseguita con cadenza trimestrale;

- f) Durante la fase di coltivazione invece, tutte le elaborazioni dei dati registrati saranno eseguite in tempo reale, fornendo per ogni evento sismico tutti i principali parametri di sorgente (localizzazione ipocentrale, velocità del moto del suolo e accelerazione, magnitudo, meccanismo focale ecc.) e compilando un catalogo aggiornato e completo della sismicità locale rilevata.

## 4.1

**SISTEMA A SEMAFORO**

L'elaborazione in real-time della sismicità rilevata consentirà in fase di coltivazione, se la quantità e qualità di dati acquisiti lo consentiranno, di verificare l'applicabilità operativa del "sistema a semaforo" proposto nelle linee guida per consentire agli organi competenti di valutare l'opportunità di modificare le modalità di reiniezione dei fluidi.

In particolare verrà inizialmente adottato un sistema con "livelli di attivazione" basati essenzialmente sui valori di magnitudo massima rilevati e, ovviamente, sulla localizzazione dell'ipocentro. Per evitare, infatti, inutili e dannosi allarmismi ingiustificati, dovranno essere esclusi dai livelli di attivazione tutti quegli eventi sismici lontani e/o telesismi che, sebbene caratterizzati da valori di magnitudo maggiori o uguali a quelli indicati in *Tabella 4.1a*, non sono assolutamente correlabili con le attività locali di coltivazione.

Come indicato nella tabella sottostante, ad ogni livello di attivazione corrisponde un livello di Magnitudo massima e uno "stato di possibile attivazione". I criteri descritti saranno ovviamente concordati con le autorità di controllo.

**Tabella 4.1a** *Livelli di Attenzione – Sistema a “Semaforo”*

Livello di Attivazione	Tipo di Semaforo	Livello di $M_{max}$	Stato Corrispondente
0	Verde	$M_{max} \leq 1.5$	Ordinario
1	Giallo	$1.5 \leq M_{max} \leq 2.2$	Attenzione
2	Arancio	$2.2 \leq M_{max} \leq 3.0$	Riduzione delle attività
3	Rosso	$M_{max} > 3.0$	Sospensione delle attività

L'attività geotermica di estrazione di fluidi dal reservoir può avere ripercussioni sull'idrogeologia locale e sul regime di stress sub-superficiale. Tale effetto è in parte mitigato se all'attività di estrazione si accompagna la re-iniezione totale del fluido, in modo che il bilancio idrogeologico globale (relativo alla sola parte di sottosuolo) rimanga invariato. Nelle zone in cui le rocce sono caratterizzate da elevata resistenza meccanica, e bassa porosità, la forza agente in profondità sui fluidi circolanti si riduce a quella del puro carico idrostatico, mentre quello litostatico risulta trascurabile. Queste zone sono quelle tipicamente caratterizzate da presenza di rocce cristalline (es. granito, gneiss) o di rocce calcaree compatte. In tal caso il fluido rimosso avrà effetti poco significativi sul grado di subsidenza dell'area di estrazione.

Rocce con minore resistenza ed elevata porosità, quindi maggiormente compressibili, produrranno al contrario uno stress maggiore sui fluidi circolanti in profondità. Nel caso di circolazione di acqua, essendo questa incompressibile, essa produrrà una forza corrispondente sulle rocce del serbatoio, con un contributo netto di stress che può essere maggiore del carico litostatico. In queste circostanze l'acqua diviene un elemento intrinseco della struttura sub-superficiale. In superficie, l'effetto di rimozione dei fluidi si traduce in subsidenza del suolo.

Il grado di rigidità delle rocce può essere definito attraverso un parametro, detto Modulo di Young ( $E$ ), che esprime la proporzionalità tra stress ( $\sigma$ ) applicato e strain ( $\varepsilon$ ) (con  $E = \sigma/\varepsilon$ ) o attraverso il modulo di incompressibilità ( $K$ ), meglio noto come Bulk Modulus, che esprime la variazione in volume ( $\Delta V$ ) di una roccia sottoposta a stress sferico medio ( $\sigma_m$ ) (con  $K = \sigma_m/\Delta V$ ).

Le rocce litoidi, come quelle riscontrate nell'area del progetto pilota Montenero, hanno generalmente valori di  $E$  o di  $K$  sufficientemente elevati e tali da prevenire significativi effetti di subsidenza durante la rimozione dei fluidi dai pori e dalle fratture. Queste rocce sono considerate dei buoni serbatoi geotermici da un punto di vista della stabilità meccanica. Rocce porose o scarsamente consolidate hanno invece valori più bassi di  $E$  e  $K$ , esibendo una maggiore compressibilità quando i fluidi vengono rimossi dal loro interno.

A parità di altre condizioni quindi, il livello di subsidenza di un'area cambierà in funzione della variazione di pressione e della rigidità.

Nelle aree naturalmente soggette a lenta subsidenza o a sollevamento è necessario separare il contributo deformativo dovuto a processi naturali in corso, da quello artificiale eventualmente causato dall'attività di estrazione e iniezione



dei fluidi dal sottosuolo. In generale, il controllo della subsidenza può essere ottenuto solo attraverso una buona rete di monitoraggio geodetico dei fenomeni deformativi del suolo, utilizzando le moderne tecniche di che vanno dalle livellazioni ottiche di precisione, all'uso dei GPS e del monitoraggio da satellite (InSAR).

## 5.1

### DEFORMAZIONI E SUBSIDENZA A SEGUITO DELLA COLTIVAZIONE GEOTERMICA NELL'AREA DI MONTENERO

Per valutare gli effetti deformativi in superficie nell'area del permesso di ricerca di Montenero, a seguito dell'estrazione e della re-iniezione dei fluidi, sono state eseguite delle simulazioni numeriche utilizzando il codice Comsol Multiphysics®, sulla base delle variazioni di pressione ricavate dalle modellazioni del serbatoio geotermico di cui all'Allegato 1 delle Integrazioni (Modellazione Numerica del Serbatoio Geotermico).

Il modello utilizzato, riportato nel suddetto allegato, prevede tre strati di roccia (cap impermeabile, serbatoio, basamento) con densità della matrice rocciosa pari rispettivamente a 2400, 2700 e 2650 kg/m<sup>3</sup>. E' stato assegnato un coefficiente di Poisson  $\nu=0.25$  per i tre strati mentre si è assegnato un modulo di Young (E) pari a E= 40GPa per il cap impermeabile, E=50GPa per il serbatoio, E=60GPa per il basamento (Schon, 1996; Batini et al., 2002; Triplett et al., 2013).

Il risultato della simulazione, dopo 50 anni di coltivazione della risorsa geotermica, mostra che il campo deformativo a seguito di estrazione e reiniezione dei fluidi è piuttosto blando, e consiste in una subsidenza massima, con centro nel dominio dei pozzi di emungimento, pari a -6mm, e un sollevamento massimo, con centro nel dominio dei pozzi di re-iniezione pari a +10 mm (Figura 5.1a).

Il campo di spostamenti risulta quasi stazionario dopo i primi anni di coltivazione geotermica.



PROGETTO

P15\_GES\_015

TITOLO

GESTO ITALIA SRL:  
 IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO MONTENERO (GR):  
 [ID:2777] RISPOSTE ALLE RICHIESTE DI INTEGRAZIONI  
 ALLEGATO 2: SISMICITÀ INDOTTA, SUBSIDENZA E RELATIVI  
 SISTEMI DI MONITORAGGIO

REV.

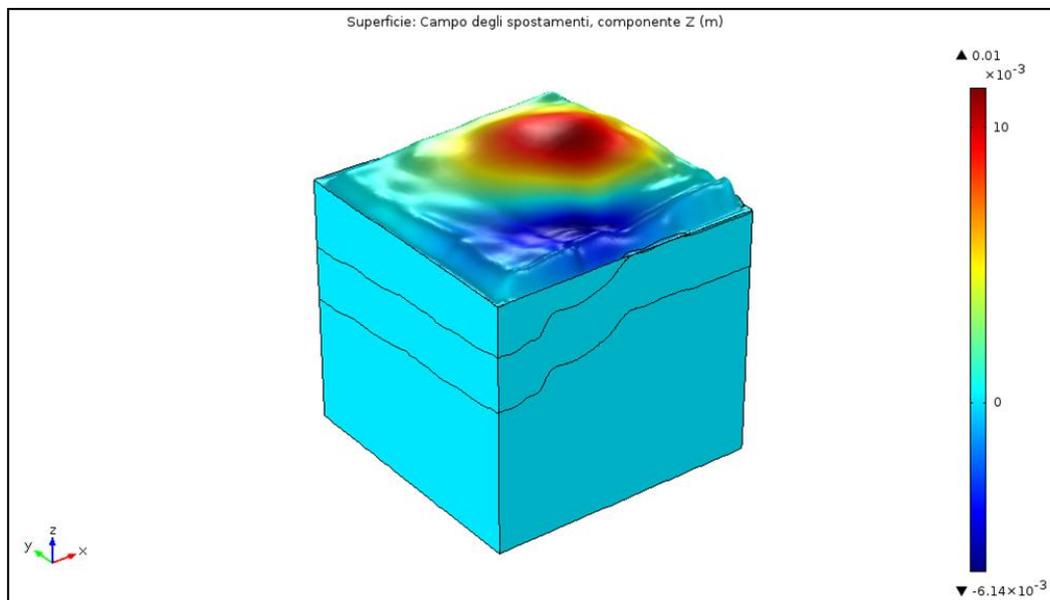
0

Pagina

19

**Figura 5.1a**

***Campo degli spostamenti orizzontali a seguito di emungimento e re-iniezione dei fluidi nel campo geotermico di Montenero (simulazione dopo 50 anni di coltivazione). Le zone di massima subsidenza e di massimo sollevamento corrispondono rispettivamente al campo pozzi di emungimento e di prelievo.***



## 6

**INTEGRAZIONI RELATIVE AL MONITORAGGIO DELLE VARIAZIONI VERTICALI DEL SUOLO (SUBSIDENZA)**

Anche se con effetti molto meno evidenti di quanto accade nel campo degli idrocarburi, anche la coltivazione di sistemi geotermici può potenzialmente indurre fenomeni di deformazione superficiale del suolo (vedi *Allegato 1* alle integrazioni, per la stima dei valori di variazione verticale del suolo dovuti all'esercizio dell'impianto geotermico in oggetto).

Si conferma quindi l'impegno ad analizzare tali fenomeni, assegnando a enti/compagnie specializzate il compito di elaborare mappe inerenti allo stato di deformazione del suolo dell'area in oggetto anche prima dell'implementazione delle attività di produzione e reiniezione. A questo scopo, sarà impiegata la metodologia "Interferometria SAR" basata sull'analisi storica delle immagini da satellite.

Successivamente, al fine di monitorare le deformazioni del suolo durante la fase di coltivazione, sempre avvalendosi di Enti o Compagnie di Servizio specializzate, potrà essere impiegata una metodologia integrata basata sull'analisi di immagini da satellite (In-SAR) e sul sistema GPS per la sua valenza di rilevazione di movimenti laterali e non solo verticali.

A tale riguardo si sottolinea che la prima fase di analisi di immagini da satellite storiche consentirà di valutare il grado di copertura dei punti *scatter* naturali presenti nell'area che, se necessario, saranno opportunamente integrati. Almeno tre punti artificiali saranno comunque allestiti ed equipaggiati certamente con sistema GPS.



PROGETTO

P15\_GES\_015

TITOLO

GESTO ITALIA SRL:  
IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO MONTENERO (GR):  
[ID:2777] RISPOSTE ALLE RICHIESTE DI INTEGRAZIONI  
ALLEGATO 2: SISMICITÀ INDOTTA, SUBSIDENZA E RELATIVI  
SISTEMI DI MONITORAGGIO

REV.

0

Pagina

21

## ***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;

*Allis R., Bromley C., Currie S., 2009.* Update on subsidence at the Wairakei–Tauhara geothermal system, New Zealand, *Geothermics*, Volume 38, Issue 1, Pages 169-180;

*Batini F., Console R., and Luongo G., 1985.* Seismological study of Larderello-Travale geothermal area, *Geothermics*, Vol. 14, No. 2/3, pp. 255 272;

*Batini F., Fiordelisi A., Moia F., 1990.* main features of the seismicity in the Monte Amiata and Latera geothermal areas (Italy). XXII general Assembly, European Seismological Commission, Barcelona;

*Batini F., Bertani R., Ciulli B., Fiordelisi A. and Valenti P., 2002.* Geophysical well logging, a contribution to the fractures characterization. PROCEEDINGS, Twenty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, January 28-30, 2002;

*Cocco M., Rovelli A., 1989.* Evidence for the Variation of Stress Drop Between Normal and Thrust Faulting Earthquakes in Italy, *J. Geoph. Res.* vol. 94, n°. B7, pp. 9399-9416;

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

*European Development Research Agency (EDRA), 2006.* Inquadramento generale dei processi gravitativi profondi (volcanic spreading) sui vulcani - Amiata.

*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;

*Glassley E., 2010.* Geothermal Energy, CRC Press, pp. 276;

*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;



PROGETTO

P15\_GES\_015

TITOLO

GESTO ITALIA SRL:

IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO MONTENERO (GR):

[ID:2777] RISPOSTE ALLE RICHIESTE DI INTEGRAZIONI  
 ALLEGATO 2: SISMICITÀ INDOTTA, SUBSIDENZA E RELATIVI  
 SISTEMI DI MONITORAGGIO

REV.

Pagina

0

22

*Gupta H.K., Chadha R.K., 1995. Induced seismicity. Birkhauser Verlag;*

*INGV, 2006. Convenzione tra Regione Toscana e INGV per l'implementazione del monitoraggio sismico del territorio regionale e lo studio dei fenomeni associati alla sismicità con particolare riguardo alle zone del Monte Amiata. REGIONE TOSCANA - MONTE AMIATA- 2003-2006;*

*Lay T, Wallace TC., 1995. Modern global seismology. Academic Press;*

*Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W., 2007. Fundamental of rocks mechanics. Blackwell;*

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

*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;*

*Schon J.H., 2004 Physical properties of rocks. Elsevierpp 583;*

*Trippetta F., Collettini C., Meredith P.G., Vinciguerra S., 2013. Evolution of the elastic moduli of seismogenic Triassic Evaporites subjected to cyclic stressing, Tectonophysics 592 (2013) 67–79;*

*Zoback M.D., 2007. Reservoir geomechanics. Cambridge Univ. Press.*



PROGETTO

P15\_GES\_015

TITOLO

GESTO ITALIA SRL:  
IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO MONTENERO (GR):  
[ID:2777] RISPOSTE ALLE RICHIESTE DI INTEGRAZIONI  
ALLEGATO 2: SISMICITÀ INDOTTA, SUBSIDENZA E RELATIVI  
SISTEMI DI MONITORAGGIO

REV.

0

Pagina

23