

A: DVA-UDG

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio
del Mare - D.G. Valutazioni e Autorizzazioni Ambientali
E.prot DVA-2015-0021032 del 10/08/2015

Da: Tiziana Vanorio <tvanorio@stanford.edu>
Inviato: sabato 8 agosto 2015 08:39
A: Tiziana Vanorio
Oggetto: Osservazione/Nota Progetto Impianto Geotermico Pilota Serrara Fontana -
Permesso di Ricerca "Ischia Forio"
Allegati: Osservazione della Prof. Tiziana Vanorio in data 8_8_2015.pdf

Spett.le Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare
Direzione Generale per le Valutazioni Ambientali

Spett.le Regione Campania
Unita' Operativa Dirigenziale Valutazioni Ambientali

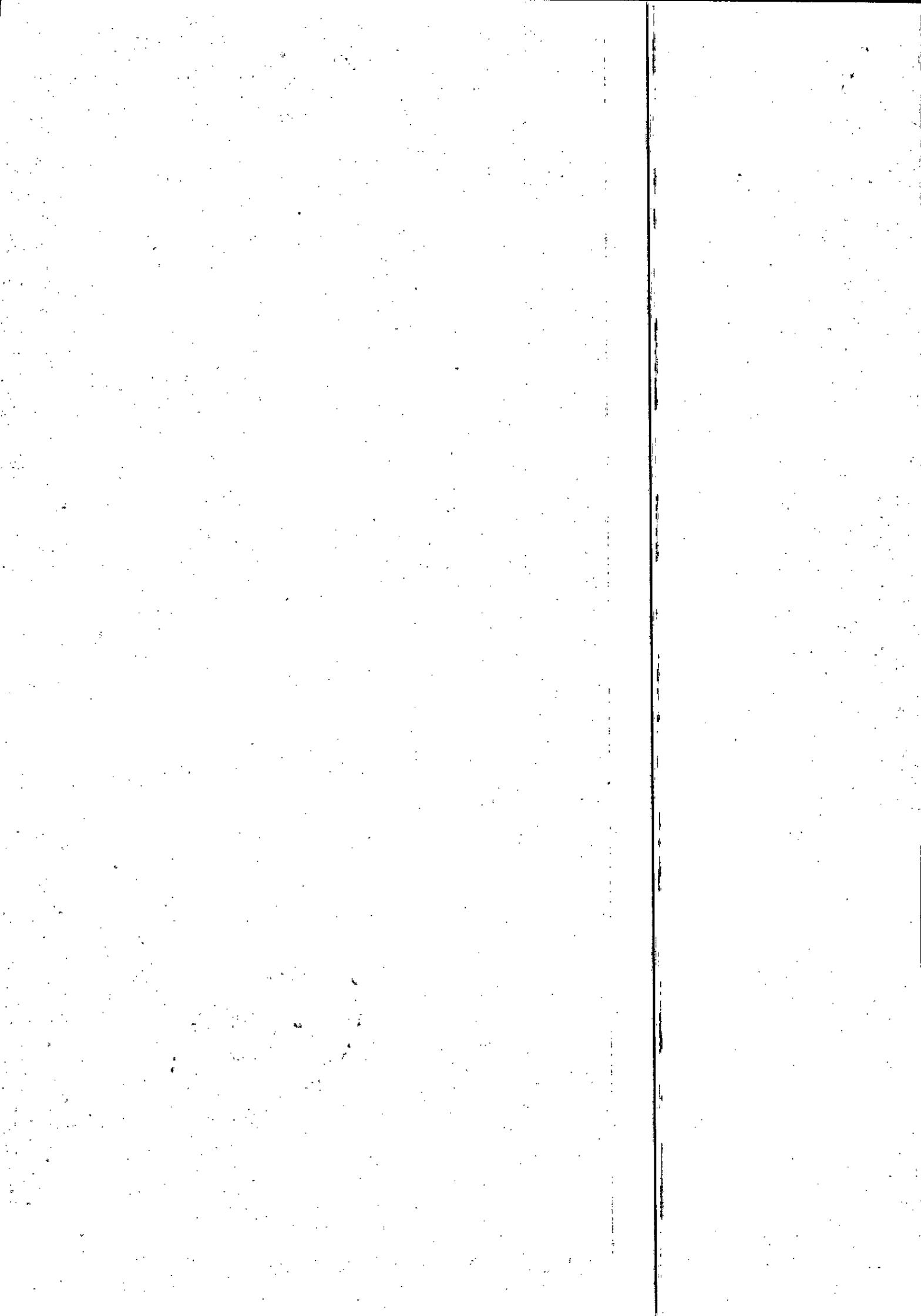
Spett.le Comune di Forio
Sindaco

trasmetto con la presente in allegato osservazione/nota sul progetto per la realizzazione di un impianto geotermico pilota nell'area del Permesso di Ricerca "Ischia Forio".

Regione: Campania ; **Provincia:** Napoli; **Comuni:** Serrara Fontana, Forio

Cordiali saluti,
Prof. Tiziana Vanorio





AL MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE
Direzione Generale Per Le Valutazioni Ambientali
Divisione II Sistemi di Valutazioni Ambientale
Via Cristoforo Colombo, 44
00147 - Roma
Fax: 06.57223040
PEC: dgsalvanguardia.ambientale@pec.minambiente.it
DVA-UDG@minambiente.it; dva@minambiente.it

ALLA REGIONE CAMPANIA
Unità Operativa Dirigenziale Valutazioni Ambientali
Fax: 081.7963048
PEC dg05.uod07@pec.regione.campania.it

AL COMUNE DI FORIO
PEC protocollo@pec.comune.forio.na.it

DA PROF. TIZIANA VANORIO
PROFESSORE DI GEOFISICA - FISICA DELLE ROCCE
DIRETTORE DEL LABORATORIO DI FISICA DELLE ROCCE
STANFORD UNIVERSITY, CALIFORNIA, USA

Oggetto: Nota sul progetto per la realizzazione di un impianto geotermico pilota "Serrara Fontana" nell'area del Permesso di Ricerca "Ischia Forio" (<http://www.va.minambiente.it/it-IT/Oggetti/Info/1547>)

Questa nota è redatta come cittadina italiana, a titolo personale, sulla base dell'esperienza e delle conoscenze acquisite come geofisico delle rocce serbatoio.

Sono professore di geofisica alla Stanford University in California, Stati Uniti, dove dirigo il Laboratorio di Fisica delle Rocce. Mi occupo di caratterizzazione chimico-meccanica di rocce serbatoio dei giacimenti di idrocarburi, dei sistemi geotermali, e degli acquiferi. Questo tipo di caratterizzazione svolge una funzione fondamentale per le compagnie di esplorazione e produzione, sia per valutare le proprietà delle rocce serbatoio prima delle operazioni di trivellazione, sia per monitorarne i cambiamenti durante la produzione. In aggiunta, oltre ad insegnare un corso di Laboratorio di Fisica delle Rocce, insegno un corso intitolato "Water-Energy Nexus". Quest'ultimo è un corso finalizzato alla comprensione delle problematiche relative, sia all'utilizzo dell'acqua per la produzione di energia (i.e., iniezioni di fluidi, fracking, estrazione/produzione di Uranio) che all'uso dell'energia necessaria per l'estrazione, il trasporto e il trattamento dell'acqua. Le mie competenze, la produzione scientifica e i numerosi premi e riconoscimenti a livello internazionale sono visibili alla seguente pagina web (<https://earth.stanford.edu/tiziana-vanorio>).

Come esperta di Fisica delle Rocce applicata alla caratterizzazione di rocce serbatoio, lavoro a stretto contatto con le più importanti società di estrazione mineraria, e similamente a quanto già esposto sull'area di Pozzuoli (Progetto Scarfoglio), una trivellazione sull'isola di Ischia è un'operazione complessa e rischiosa.

In particolare, la documentazione tecnico-scientifica presentata a corredo del progetto per la realizzazione di un impianto geotermico pilota nell'area del Permesso di Ricerca "Ischia Forio" appare lacunosa e parziale.

In particolare, questa nota si concentra su tre punti chiave:

- A) sulla necessità di valutare in maniera più approfondita la sismicità indotta dalla reiniezione di fluidi, soprattutto se quest'ultima avviene in aree interessate da faglie attive;
- B) sulla necessità di corredare il progetto con un'immagine sismica ad alta risoluzione del sottosuolo. Un'immagine siffatta è essenziale ed indifferibile in quanto consentirebbe, innanzitutto, di caratterizzare le velocità degli orizzonti potenzialmente produttivi, in secondo luogo di associare le suddette velocità a zone attraversate da faglie, ed infine, di localizzare in maniera più accurata la sismicità indotta. In ultima analisi, l'assenza di questi studi compromette un'attenta analisi della subsidenza;
- C) sulla necessità di valutare sia i costi, in termini di rischi, che un siffatto progetto potrebbe arrecare alla comunità locale, sia gli eventuali benefici che potrebbe apportare.

Elenco qui di seguito le mie osservazioni:

- 1) Al fine di minimizzare i rischi, sarebbe innanzitutto necessario ricostruire un'immagine dettagliata del sottosuolo nella zona oggetto delle trivellazioni utilizzando metodi sismici ad alta risoluzione (ordine dei metri). Un modello dettagliato di velocità consentirebbe, infatti, di localizzare i microterremoti in maniera più accurata e, contemporaneamente, di stimare le pressioni di fluido di poro attese (fase *pre-drilling*). La stima della soglia di pressione di fluido con tecniche comunemente in uso in Fisica delle Rocce risulterebbe anche funzionale ad uno studio più accurato della sismicità indotta (vedasi punto 2).

La natura vulcanica del sottosuolo ischitano e la bassa permeabilità dei tufi che lo caratterizzano determinano, come descritto da Penta (1949; 1954) ed evidenziato nella relazione INGV geologico-geotermica (Allegato 1, pagina 10, ELB-PRG-002), che *"la circolazione idrica avviene in più falde sovrapposte, aventi come recapito principale il mare...(omissis)... Il sottosuolo è caratterizzato da un'apparente « capricciosità » della distribuzione della termalità; capricciosità giustificabile soltanto ammettendo una circolazione di acqua entro fratture e discontinuità di ogni genere."*

Trattasi quindi di un sottosuolo estremamente eterogeneo a causa di discontinuità sia laterali che verticali in cui la circolazione e la risalita dei fluidi è controllata non da una porosità omogeneamente distribuita (*i.e.*, le

rocce vulcaniche tufacee non sono molto permeabili in quanto lo spazio poroso, sebbene presente, non è interconnesso) ma piuttosto dalla presenza nel sottosuolo di fratture e faglie distribuite in maniera sparsa. Diretta conseguenza della presenza di falde sovrapposte e dell'eterogenea distribuzione della permeabilità sono pressioni di fluido di poro, talvolta, più alte rispetto alla pressione litostatica (i.e., sovrappressioni).

Viste le considerazioni di cui sopra, si evidenzia che l'indagine geofisica di tipo geoelettrico presentata nella relazione geologico-geotermica INGV (Allegato 1, pagina 61-63, Figure 10.1 e 10.2) è da ritenersi integrativa e non sostitutiva di un'indagine sismica ad alta risoluzione, tipica dell'industria petrolifera e geotermica. Infatti, le indagini geofisiche di tipo geoelettrico forniscono principalmente un'immagine di massima (i.e., bassa risoluzione) e non univoca del sottosuolo. Come evidenziato da Penta (1954, pagina 354), nelle aree geotermiche il dato geoelettrico è di difficile interpretazione poiché la conducibilità elettrica dipende contemporaneamente da diversi fattori come ad esempio la salinità, la saturazione e la temperatura del fluido che permea la formazione rocciosa. Ne consegue che nelle aree siffatte un'alta conducibilità elettrica non è univocamente indicativa di alte temperature, ma potrebbe semplicemente essere una conseguenza dell'alta salinità di un fluido di bassa temperatura. Il dato sismico dunque risulta essere uno strumento discriminante fondamentale ai fini della corretta ubicazione dei pozzi di produzione e reiniezione.

Inoltre, un dettagliato modello di velocità sarebbe altresì necessario ai fini di un corretto monitoraggio della sismicità indotta, in maniera particolare per ottenere delle accurate localizzazioni epicentrali ed ipocentrali dei microterremoti. Infatti, i parametri epicentrali ed ipocentrali di un evento sismico non sono un dato direttamente osservabile, ma piuttosto il risultato di un' "inversione". Vale a dire, è l'osservazione dei tempi di arrivo delle onde sismiche che consente di ricavare il tempo di origine del terremoto, le coordinate geografiche e la profondità. Quest'operazione richiede, tuttavia, un modello di velocità del sottosuolo in cui le onde sismiche si sono propagate (i.e., il tempo di percorso di un'automobile dal punto A -ipocentro- al punto B -stazione di misura- dipende dalla velocità con la quale essa ha potuto viaggiare). Se il modello di velocità non è dettagliato, o addirittura non disponibile, esso diventa un'altra incognita del sistema, alla stessa stregua del tempo di origine del terremoto, delle coordinate geografiche e della profondità. Ne consegue che il monitoraggio della sismicità indotta finirebbe per fare affidamento su un sistema che, essendo caratterizzato da infinite soluzioni, non solo risulterebbe non affidabile, ma fornirebbe una mappatura degli eventi disordinata e confusa.

- 2) La relazione geologico-geotermica INGV (Allegato 3, ELB-PRG-006) e il Progetto definitivo (ELB-PRG-001) affermano, ai fini di una valutazione della sismicità indotta, "che nella zona di reiniezione per l'impianto in oggetto

(simulazioni ottenute con TOUGH2®), l'incremento di pressione dopo 30 anni di sfruttamento è di ± 0.3 MPa (± 3 bar)".

Il risultato di queste simulazioni merita un approfondimento soprattutto per comprenderne le limitazioni. Come primo aspetto, è importante ricordare che la *sismicità indotta* può avvenire anche in condizione di bassi regimi pressori, soprattutto in presenza di faglie attive. In secondo luogo, le simulazioni con TOUGH2® sono puramente meccanicistiche e, quindi, non tengono in dovuto conto le interazioni chimiche fluido-roccia che caratterizzano i tufi (Heap et al., 2014) a causa dell'immissione di fluidi a diversa temperatura. Infine, una simulazione di flusso di portata a scopo industriale richiede sia modelli di ricostruzione del sottosuolo a più alta risoluzione (sismica a riflessione di cui al punto 2), sia di parametri di permeabilità misurati (non teorici), né tantomeno acquisiti in condizioni che non sono rilevanti per le rocce del sottosuolo ischitano (i.e., temperature e pressione).

La trivellazione di un pozzo è, per sua natura, un'operazione invasiva, sia in fase di reiniezione, che in quella di emungimento, a causa dell'ingresso di fluidi estranei al sistema. La letteratura scientifica è vasta e le ricerche in quest'ambito sono concordi nell'affermare che la reiniezione di fluidi (che non va confusa con il concetto di idrofratturazione o fracking) è responsabile per l'aumento della sismicità (Healy et al., 1968; Simpson, 1976; Raleigh et al., 1976; Frohlich et al., 2011; Kim 2013; Ellsworth, 2013; Frohlich et al., 2014; Walsh e Zoback, 2015). Infatti, si ritiene che non è l'idrofratturazione il meccanismo responsabile per la sismicità indotta ma piuttosto la reiniezione in profondità di fluidi reflui di smaltimento (<http://earthquake.usgs.gov/research/induced/myths.php>). Inoltre, il problema non è da considerarsi semplicemente pressorio. A tal riguardo, si riportano qui di seguito, tre punti fondamentali dell'argomento in oggetto.

Walsh e Zoback, (2015) dimostrano che le aree caratterizzate da sismicità indotta corrispondono ad aree interessate dalla re-immissione di fluidi (pagina 4, quinto rigo). Gli autori evidenziano che, in aree come quella di Ischia, caratterizzate dalla presenza di faglie pre-esistenti ed attive, e quindi con molta probabilità vicine allo stress critico, anche piccole perturbazioni di pressione di fluido di poro hanno la potenzialità di avviare movimenti di scivolamento lungo faglie, e quindi essere causa di sismicità di apprezzabile entità (pagina 6, diciannovesimo rigo). La sismicità, dunque, non è associata all'idrofratturazione ad alta pressione, ma piuttosto alla reiniezione di fluidi reflui in zone geologicamente vicine allo stress critico.

Tutto ciò semplicemente evidenzia che il valore di soglia critica di pressione necessaria per indurre sismicità dipende da una serie di fattori quali, ad esempio, le condizioni geologiche locali e il livello di stress pre-esistente nelle rocce. Come evidenziato nella relazione INGV-Sismicità e subsidenza, Allegato 5, pagina 8, ELB-PRG-008 "l'insieme di queste variabili rende ardua la scelta a priori di una soglia critica di pressione, oltre la quale può essere indotta attività sismica." Questi sono tuttavia, tutti parametri di necessaria

acquisizione in fase *pre-drilling* affinché, proprio perché già trattasi di una simulazione, questa si possa ritenere plausibile ed attendibile.

In California (The Geysers, Mayacamas Mountains) ed in Oklahoma (le aree di Cherokee, di Perry di Stillwater, etc.) l'aver avuto a disposizione un sistema di monitoraggio moderno ha rappresentato la *conditio sine qua non* per la ricerca e lo studio del fenomeno della sismicità indotta da un punto di vista scientifico e quindi, per stabilire una relazione causa-effetto tra reiniezione di fluidi e sismicità. Tuttavia, vale la pena sottolineare che trattasi di aree piuttosto vaste, prettamente disabitate e prive di un patrimonio storico e architettonico come quello presente nel territorio ischitano e dei Campi Flegrei. Ciò rende queste ultime molto più vulnerabili, per cui qualsiasi paragone con gli USA è del tutto irrilevante e, peggio ancora, fuorviante.

Inoltre, Vanorio (2015) dimostra che l'iniezione di fluidi non in equilibrio termodinamico con la roccia che li ospita, induce nel breve termine dei cambiamenti permanenti nella roccia stessa, alterandone la sua permeabilità, porosità e rigidità. Questi cambiamenti vanno presi in considerazione nelle simulazioni di flusso per valutare non solo fenomeni di sismicità indotta ma anche quelli che originano perdite sotterranee con conseguente inquinamento della falda e commistione di fluidi di diversa natura. Le simulazioni con TOUGH2®, per l'inerente natura del software, non considerano interazioni fluido-roccia, tipiche di ambienti geotermici.

Infine, anche l'argomento subsidenza merita un approfondimento. La relazione INGV (Sismicità e subsidenza, Allegato 5, pagina 14) afferma che *"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 ovviamente in parte mitigato se all'attività di estrazione si accompagna la reiniezione totale del fluido, in modo che il bilancio idrogeologico globale (relativo alla sola parte di sottosuolo) rimanga invariato"*. Quest'osservazione sarebbe pertinente solo se il sottosuolo fosse costituito da rocce prevalentemente rigide.

In realtà, dalle stratigrafie dei pozzi (Relazione Geologico-Geotermica, pagina 83, Figura 13.2, ELB-PRG-002) si evince che i primi ~1000 metri di sottosuolo sono costituiti da materiale alluvionale e/o di riporto e tufi. Trattasi quindi di rocce porose e/o scarsamente consolidate caratterizzate da valori dei parametri mecano-elastici (i.e., modulo di Young e modulo di incompressibilità) piuttosto bassi.

Diretta conseguenza di questi bassi valori delle proprietà elastomeccaniche è che, tali rocce esibiscono una maggiore compressibilità se i fluidi che le permeano sono rimossi dal loro spazio poroso. A livello macroscopico ciò genera fenomeni di subsidenza. Questo processo, tuttavia, è esacerbato se il fluido immesso nel sottosuolo non è in equilibrio termodinamico con esso (i.e., diversa temperatura e pressione, e quindi, salinità e chimismo) in quanto tale immissione contribuisce ad alterare ulteriormente l'iniziale porosità, rigidità, e compressibilità della formazione rocciosa (Vanorio 2015, Figura 1) e quindi ad indebolire la formazione

rocciosa. Un esempio di come l'interazione chimica fluido-roccia (Hermansen et al., 1997), possa amplificare il fenomeno di subsidenza è rappresentato dal famosissimo caso del reservoir di Ekofisk nel Mar del Nord dove la reiniezione, avviata semplicemente per compensare l'estrazione, e quindi per mitigare la subsidenza, ha invece finito per amplificarla, causando un abbassamento del suolo di ca. 3m. E' necessario quindi che questi fenomeni siano attentamente esaminati in fase pre-esplorativa attraverso studi ad hoc di laboratorio (Torsaeter, 1984; Vanorio, 2015) in modo da studiare la risposta dei tufi ischitani all'iniezione e, conseguentemente, creare il set di parametri essenziali per eseguire simulazioni più accurate.

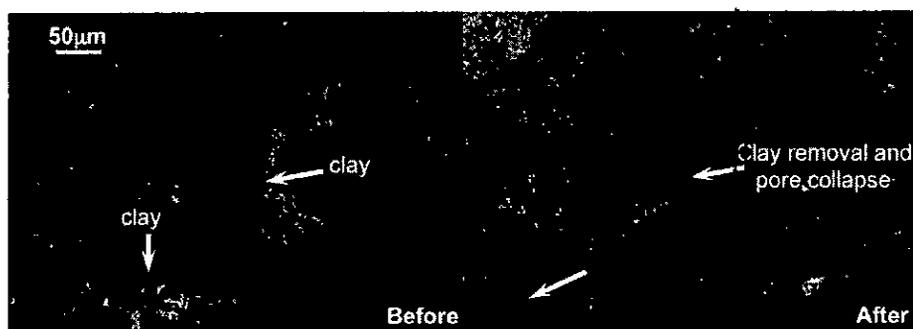


Figura 1. Monitoraggio della variazione della microstruttura di un'arenaria argillosa prima (sinistra) e dopo (destra), l'iniezione di un fluido ricco in CO₂. L'arenaria è caratterizzata da una media porosità e bassi valori elasto-meccanici. L'iniezione del fluido è eseguita sotto condizioni di temperatura e pressioni (litostatiche e pressione di fluido di poro) tipiche di reservoir (da Vanorio, 2015)

Considerazioni conclusive

Come mostrato in questa relazione l'operazione di trivellazione in un'area come quella di Ischia è un'operazione difficile a causa della complessità del sistema vulcanico ischitano, dell'eterogeneità delle sue rocce vulcaniche, e dei rischi a queste connessi. Una corretta valutazione di questi aspetti richiede:

- a) indagini geofisiche ad alta risoluzione (ordine di metri) per permettere una corretta ubicazione dei pozzi, sia ai fini produttivi, che di stime delle pressioni di fluido di poro e della sismicità indotta. Modelli concettuali dei serbatoi privi di ricostruzioni sismiche ad alta risoluzione sono da ritenersi di massima e, di conseguenza, non idonei ai fini dell'ubicazione dei siti di perforazione e dello sfruttamento delle risorse;
- b) una simulazione accurata dei flussi di portata del fluido e delle reazioni nella roccia serbatoio. Tale simulazione deve essere basata su parametri, che oltre ad essere corrispondenti alle tipologie litologiche di Ischia, siano anche misurati sotto condizioni di pressione e temperatura attinenti alla profondità del serbatoio;
- c) un'analisi approfondita della sismicità indotta, dovuta sia all'estrazione che alla reiniezione di fluidi, che tenga in dovuta considerazione: *le condizioni pressorie minime su faglie attive individuate dalla ricostruzione geofisica in 3D, le interazioni*

fluido-roccia, e la vulnerabilità del territorio ischitano (e.g., urbanizzazione, tipologie costruttive non sempre antisismiche, forte connotazione turistica dell'area). Un accurato (alta risoluzione) modello di velocità è necessario anche per lo studio dell'eventuale migrazione spazio-temporale della sismicità indotta, in quanto consentirebbe, innanzitutto, una più dettagliata localizzazione ed evoluzione degli eventi sismici, e quindi, uno studio più approfondito e serio della relazione causa-effetto tra reiniezione e sismicità;

Detto questo, anche se gli aspetti di cui sopra fossero riveduti attraverso una più attenta analisi dei dati e dei rischi, rimangono alcune considerazioni prettamente legate alle proprietà delle rocce serbatoio di Ischia, alla loro produttività e, di conseguenza, al potenziale beneficio apportato all'isola. Ne discuto brevemente le linee principali.

Il tentativo di trovare nel sottosuolo ischitano formazioni di roccia contenenti fluidi ad alta temperatura da utilizzare per la produzione di energia elettrica è stato un tema già affrontato nella storia del sistema vulcanico-idrotermale di Ischia. Come sottolineato da Bertini et al., (2005), l'esplorazione geotermica nel sud Italia è stata effettuata in Campania, nei Campi Flegrei ed Ischia, ed in Sicilia, nelle isole di Vulcano e Pantelleria (Buonasorte et al., 1995). Tuttavia, le caratteristiche sfavorevoli delle potenziali rocce serbatoio e le problematiche di tipo ambientale e logistico (l'urbanizzazione e la natura turistica delle aree) hanno precluso lo sviluppo geotermico in queste aree. In particolare, a fronte di medie temperature registrate nel sottosuolo di Ischia, si è sempre dovuto fare i conti con grossi fattori limitanti, quali la bassa permeabilità, a causa della natura vulcanica del sottosuolo. Di conseguenza, a meno di stimolare il flusso della formazione rocciosa con l'idrofratturazione, il problema della bassa permeabilità persiste.

Come evidenziato da Allegrini et al., (1995) l'energia geotermica in Italia ha un notevole potenziale in termini di risorse a bassa temperatura (pagina 201, rigo 9) e solo un moderato potenziale per la generazione di energia elettrica. Quest'ultimo è, infatti, prettamente confinato ad aree caratterizzate da alte temperature e rocce serbatoio di tipo sedimentario, tipicamente più permeabili. Come sottolineato da Penta (1954, pagina 352) ed indicato nella Tabella 2 qui di seguito riportata (Ferrara et al., 1985), a differenza del sistema geotermale di Larderello (e dell'area toscana in generale) dove il fluido nel serbatoio sedimentario (non vulcanico!) è di tipo *vaporifero, surriscaldato e producibile, sull'isola d'Ischia il fluido è prettamente allo stato liquido (i.e., un miscuglio di acqua e vapore a basso titolo - tipologia L, vedasi Tabella)*. La causa di un basso contenuto di vapore è attribuibile principalmente alla combinazione di temperature minori di 250° C ed alla bassa permeabilità delle rocce vulcaniche che, a causa degli scarsi valori di portata, provocano un notevole raffreddamento delle acque durante l'ascesa verso la superficie. Infatti, già in passato, l'installazione sull'isola di una piccola centrale a ciclo binario (i.e., viste le moderate temperature ed i bassi contenuti in vapore, l'acqua termale era utilizzata per provocare l'ebollizione di un fluido - il cloruro di etile - a più basso punto di ebollizione) non diede i frutti sperati, sia a causa della limitata potenza della centrale, che della scarsa entità, in termini di produttività e

temperature, dell'insieme dei pozzi perforati sull'isola. Ne consegue che il progetto della centrale fu decommissionato (vedasi Tabella qui di seguito riportata).

Di conseguenza, l'utilizzo della risorsa geotermale di Ischia è, gioco forza, relegato ad un preciso tipo di bassa entalpia (uso del fluido geotermico ad uso termale e balneo-turistico), il cui sfruttamento è già largamente attivo sull'isola. Quest'attività costituisce la solida ossatura economica dell'isola e deve essere tenuta ben presente quando si parla di un inserimento in questo contesto di altre destinazioni del fluido geotermico (i.e., alta entalpia). Un attento studio di come un siffatto progetto possa interferire con l'attuale idrogeologia e fluido-dinamica attualmente utilizzata per la bassa entalpia, andrebbe quindi seriamente affrontato.

Concludo, con un semplice confronto con due delle maggiori aree geotermiche italiane: Larderello-Travale/Radicondoli e Monte Amiata. Dai dati disponibili in letteratura (vedasi link qui sotto riportato), l'effettiva capacità termoelettrica di queste aree è pari a 711 MW. Questa fornisce una quantità lorda di energia elettrica generata di 5.5 TW/h, corrispondente all'1.8% dell'energia elettrica prodotta a livello nazionale ed al 25% di quella prodotta nella regione Toscana.

(http://www.geothermal-energy.org/print/electricity_generation/italy.html)

Sarebbe opportuno, quindi, considerate le vulnerabilità del territorio ischitano, valutare attentamente, ai fini di un'analisi **costi-rischi-benefici**, quanto l'anticipata capacità termoelettrica di 5MWe lorda, come descritto nel progetto definitivo di Ischia Geotermia (ELB-PRG-001), inciderebbe a livello regionale in termini di energia elettrica generata e quali vantaggi apporterebbe all'isola d'Ischia.

In Fede

Prof. Tiziana Vanorio

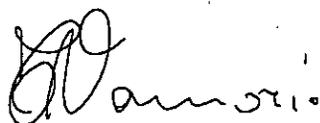


Table 2. Main characteristics of Italian geothermal areas (with reservoir temperature > 100°C)

Locality	Lithotype (a) of		Average Reservoir		Type of System (b)	Stage (c)	Main Utilization or Remarks
	Cap Rock	Reservoir	Depth (m)	Temp. (°C)			
Larderello (upper productive layers)	shl + mrl	dol lmt	100-300	120-170	V	E	Electric generation
Larderello (interm. prod. layers)	shl + mrl	dol lmt	400-1500	200-270	V	E	Electric generation
Larderello (lower prod. layers)	sct + phy	sct qzt	>2500	300-400	V	D	
Travale/Radicondoli (up. prod. layers)	clt + shl + mrl	dol lmt	100-500	120-150	V	E	Exploited to 1955-56
Travale/Rad. (low. prod. layers)	shl + mrl	dol lmt	700-1500	250	V	E	Electric generation
Bagnore (up. prod. layers)	shl + mrl + snd	dol lmt	350	150	V	E	Electric generation
Bagnore (low. prod. layers)	phy	phy	3000	>300	L	D	
Piancastagnolo (up. prod. layers)	shl + mrl	dol lmt	450	220	V	E	Electric generation and greenhouses
Piancastagnolo (low. prod. layers)	phy	phy	3000	350	L	D	Electric generation and greenhouses
Poggio Nibbio (up. prod. layers)	shl + mrl + snd	dol lmt	600	150	L	D	Not commercial
Poggio Nibbio (low. prod. layers)	phy	phy	3200	>280	L	D	Feasibility for electric generation under study
Torre Alfina	shl + mrl	lmt	700	140	L(a)	D	Direct utilization of CO ₂ under study (d)
Latera	shl + mrl	lmt	500-1500	210	L	D	Electric generation (pilot plant commissioned)
Cesano	shl + mrl	lmt	1500	210	HB		Multipurpose (salt extraction and pilot plant)
Sabatini Mtns.	shl + mrl	lmt	2500-3000	250-300	L	D	Two exp. wells unprod. due to lack of permeability
Phlegrean Fields	alt vlc	vlc	600-1600	240->300	L	D	Electric generation (pilot plant design)
Gimini Mtns.	shl + mrl	lmt	2300	230	L	F	
Vulcano Island (Vulcano Porto)	alt vlc	vlc	100-200	140-200	L	Abandoned	Two poorly prod. wells drilled in 1952-53, plugged in 1956
Vulcano Island (other areas)	vlc	vlc + int	>1500	420 max. recorded	L	F	First exploratory well unproductive
Archie Island	vlc	vlc	800-1000	5170	L	D	250 kW binary cycle (1942-43); 500 kW flash plant (1951-53) Decommissioned
Bolsena	shl + mrl	lmt	900-1500	200	L	F	First well under drilling
Acquapendente	clt + shl + mrl	lmt	1800 (estim.)	150 (estim.)	L	F	First exp. well scheduled for 1987
Tuscania	clt + shl + mrl	lmt	1500 (estim.)	150 (estim.)	L	F	First exp. well scheduled for 1986
Albani Hills	clt + shl	lmt	1600 (estim.)	>200 (estim. fr. gas)	L	F	First exploratory well scheduled for 1986

(a) shl = shale; mrl = marl; (dol) lmt = (dolomitic) limestone; sct = schist; phy = phyllite; clt = clay; snd = sandstone; (alt) vlc = (altered) volcanite; int = intrusive rock; qzt = quartzite. (b) V = vapor-dominated; L = liquid-dominated; HB = hot brine. (c) F = feasibility; D = development; E = exploitation. (d) A gas cap of practically pure CO₂ exists at the top of the reservoir.

Bibliografia Citata

- Allegrini, G., Cappetti, G. and Sabatelli, F. (1995), Geothermal development in Italy: Country update report. World Geothermal Congress, Florence, Italy, May 18-31, 1995. Proceedings, vol. 1, pp. 201-208.
- Bertini, G., Cappetti, G., Fiordelisi A.; 2005, Characteristics of Geothermal Fields in Italy, *Giornale di Geologia Applicata* 1 (2005) 247 -254, doi: 10.1474/GGA.2005-01.0-24.0024
- Buonasorte G., Cameli G.M., Fiordelisi A., Parotto M. & Perticone I. (1995) - Results of geothermal

- exploration in central Italy (Latium - Campania). WGC 1995, Florence, 1293-1298.
- Ellsworth W. F., (2013). Injection-induced earthquakes. *Science* 341, 1225942
- Ferrara G.C., Luccioli F., Palmerini G.C. and Scappini U., 1985. Update report on geothermal development in Italy. Proceedings of the International Symposium on Geothermal Energy, Kailua-Kona, HI, International Volume, 95-105.
- Frohlich C., C. Hayward, B. Stump, E. Potter, The Dallas-Fort Worth earthquake sequence: October 2008 through May 2009. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 101, 327-340 (2011).
- Frohlich C., W. Ellsworth, W. A. Brown, M. Brunt, J. Luetgert, T. MacDonald, S. Walter, (2014) The 17 May 2012 M4.8 earthquake near Timpson, East Texas: An event possibly triggered by fluid injection. *J. Geophys. Res.* 119, 581-593.
- Healy J. H., W. W. Rubey, D. T. Griggs, C. B. Raleigh, (1968), The Denver earthquakes. *Science* 161, 1301-1310.
- Heap M. J., P. Baud, P. G. Meredith, S. Vinciguerra, T. Reuschlé, (2014), The permeability and elastic moduli of tuff from Campi Flegrei, Italy: Implications for ground deformation modelling. *Solid Earth* 5, 25-44 (2014). doi:10.5194/se-5-25-2014
- Hermansen, H., Thomas, L.K., Sylte, J.E. et al. 1997. Twenty Five years of Ekofisk Reservoir Management. Presented at the Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 5-8 October. SPE-38927-MS.
- Kim, W.-Y., (2013), Induced seismicity associated with fluid injection into a deep well in Youngstown, Ohio. *J. Geophys. Res.* 118, 3506-3518.
- Penta, F., 1949, Temperature nel sottosuolo della regione "Flegrea": *Annali Geofisica*, v. 11, no. 3.
- Penta, F., 1954, Ricerche e studi sui fenomeni esalativo-idrotermali ed il problema delle "forze endogene": *Annali Geofisica*, v. 8, no. 3.
- Raleigh C. B., J. H. Healy, J. D. Bredehoeft, An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado. *Science* 191, 1230-1237 (1976).
- Simpson D. W., (1976) Seismicity changes associated with reservoir loading. *Eng. Geol.* 10, 123-150.
- Torsaeter, O. 1984. An Experimental Study of Water Imbibition in Chalk From the Ekofisk Field. Presented at the SPE Enhanced Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, 15-18 April 1984. SPE-12688-MS.
- Vanorio T., (2015) Recent advances in time-lapse, laboratory rock physics for the characterization and monitoring of fluid-rock interactions, *GEOPHYSICS*, VOL. 80, NO. 2 P. WA49-WA59, 10.1190/GEO2014-0202.1
- Vanorio T., W. Kanitpanyacharoen (2015) Rock physics of fibrous rocks akin to Roman concrete explains uplifts at Campi Flegrei Caldera, *Science* DOI: 10.1126/science.aab1292.
- Vanorio, T., M. Prasad, A. Nur, and D. Patella (2002), Ultrasonic velocity measurements in volcanic rocks: Correlation with microtexture, *Geophys. J. Int.*, 149, 22-36.
- Walsh F. R., M. D. Zoback, (2015) Oklahoma's recent earthquakes and saltwater disposal. *Sci. Adv.* 1, e1500195