

QUADERNI di GEOFISICA

Esempi nel mondo di sismicità indotta
dalla produzione geotermica:
considerazioni e proposte di
monitoraggio sismico



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

187

Direttore Responsabile

Valeria DE PAOLA

Editor in Chief

Milena MORETTI (editorinchief.collane-editoriali@ingv.it)

Editorial Board

Laura ALFONSI (laura.alfonsi@ingv.it)
Raffaele AZZARO (raffaele.azzaro@ingv.it)
Christian BIGNAMI (christian.bignami@ingv.it)
Daniele BRAVI (daniele.bravi@ingv.it)
Simona CARANNANTE (simona.carannante@ingv.it)
Viviana CASTELLI (viviana.castelli@ingv.it)
Luca COCCHI (luca.cocchi@ingv.it)
Rosa Anna CORSARO (rosanna.corsaro@ingv.it)
Luigi CUCCI (luigi.cucci@ingv.it)
Lorenzo CUGLIARI (lorenzo.cugliari@ingv.it)
Alessia DI CAPRIO (alessia.dicaprio@ingv.it)
Roberto DI MARTINO (roberto.dimartino@ingv.it)
Domenico DI MAURO (domenico.dimauro@ingv.it)
Domenico DORONZO (domenico.doronzio@ingv.it)
Filippo GRECO (filippo.greco@ingv.it)
Alessandro IAROCCI (alessandro.iarocci@ingv.it)
Marcello LIOTTA (marcello.liotta@ingv.it)
Mario MATTIA (mario.mattia@ingv.it)
Daniele MELINI (daniele.melini@ingv.it)
Anna NARDI (anna.nardi@ingv.it)
Lucia NARDONE (lucia.nardone@ingv.it)
Marco OLIVIERI (marco.olivieri@ingv.it)
Nicola PAGLIUCA (nicola.pagliuca@ingv.it)
Pierangelo ROMANO (pierangelo.romano@ingv.it)
Alessandro SETTIMI (alessandro.settimi@ingv.it)
Maurizio SOLDANI (maurizio.soldani@ingv.it)
Sara STOPPONI (sara.stopponi@ingv.it)
Umberto TAMMARO (umberto.tammaro@ingv.it)
Andrea TERTULLIANI (andrea.tertulliani@ingv.it)
Stefano URBINI (stefano.urbini@ingv.it)

Segreteria di Redazione e Produzione

Francesca DI STEFANO - Coordinatore
Rossella CELI
Robert MIGLIAZZA
Barbara ANGIONI
Massimiliano CASCONI
Patrizia PANTANI
redazione.cen@ingv.it

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia | Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI

Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

QUADERNI di GEOFISICA

Esempi nel mondo di sismicità indotta dalla produzione geotermica: considerazioni e proposte di monitoraggio sismico

Examples of worldwide geothermal production-induced seismicity: considerations and suggestions for seismic monitoring

Thomas Braun¹, Bernd Schmidt², Joachim Wassermann³

¹INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Sismologia e Tettonofisica - Osservatorio di Arezzo

²Landesamt für Geologie und Bergbau – Rheinland-Pfalz – Mainz (Germania)

³Geophysikalisches Observatorium der Ludwig-Maximilians Universität, München (Germania)

Accettato 4 aprile 2023 | Accepted 6 April 2023

Come citare | How to cite Braun T., Schmidt B., Wassermann J., (2023). Esempi nel mondo di sismicità indotta dalla produzione geotermica: considerazioni e proposte di monitoraggio sismico. Quad. Geofis., 187: 1-42, <https://doi.org/10.13127/qdg/187>

In copertina Concessioni, Istanze di Concessioni, Permessi di Ricerca e Permessi per Progetti Pilota per le aree geotermiche toscane di Larderello-Travale e Monte Amiata [Braun et al., 2021] | Concessions, requests for concessions, research permits and permits for pilot projects for the geothermal areas of Larderello-Travale e Monte Amiata [Braun et al., 2021]

INDICE

Riassunto	7
<i>Abstract</i>	7
Introduzione	8
1. Le risorse geotermiche	9
2. Meccanismi che causano sismicità indotta	11
3. Indirizzi e Linee Guida ILG, definiti dal MISE (attualmente MASE)	15
3.1 Definizione e compiti del Comitato	15
3.2 Definizione del sistema a semaforo (TLS)	16
4. Regolamenti in altri paesi	18
4.1 Regolamento Germania	18
4.1.1 Assunzione di Causa del Danno	19
4.1.2 Compiti dell'Ufficio Competente	19
4.1.3 Criteri per la definizione dell'Area di Influenza	19
4.1.4 Soglia di Attenzione ⇒ evento sismico con obbligo di Segnalazione	20
4.2 Regolamento Svizzera	20
5. Esempi di sismicità indotta legati alla produzione geotermica	21
5.1 St. Gallen (CH) – 20/07/2013	21
5.2 Landau, Insheim, Bruchsal (D), Soultz-sous-forêts, Rittershofen, Illkirch (F)	22
5.3 Vendenheim (F) 26/06/2021 ML 3.9	23
5.4 Pohang (CR) 15/11/2017 Mw 5.4	24
5.5 Basilea (CH) 2006	25
5.6 ESPOO-Otaniemi (SF) giugno/luglio 2018	26
5.7 Geotermia profonda, Monaco/Baviera (D) 2017	28
6. Implicazioni per le aree geotermiche di Larderello-Travale del Monte Amiata	28
6.1 Larderello - Travale	29
6.2 Monte Amiata	30
7. “Lessons learned”	31
8. Proposta di uno schema di comunicazione per le aree geotermiche toscane, basato sull'analisi della sismicità	33
Conclusioni	35
Bibliografia	36
Glossario	39

Riassunto

In Italia, le attuali concessioni per l'utilizzo delle risorse geotermiche scadranno nel 2024. Alla prossima aggiudicazione parteciperanno - oltre ENEL-Greenpower - anche soggetti del mercato libero, che potrebbero voler applicare nuove tecnologie, attingendo comunque con alta probabilità ai medesimi reservoir geotermici dei campi di Larderello-Travale e del Monte Amiata. L'utilizzo di metodologie differenti (reiniezione parziale o totale), applicate in aree adiacenti, richiede un sistema di monitoraggio avanzato, in grado di localizzare in tempo reale la microsismicità, calcolare i parametri sismici rilevanti e comunicare, in tempo quasi-reale, i risultati ai concessionari coinvolti, agli uffici competenti e alla popolazione.

Su iniziativa della Regione Toscana è stato assegnato all'INGV il ruolo di SPM (Struttura Preposta al Monitoraggio) con l'obiettivo di garantire un monitoraggio omogeneo e centralizzato per tutte le concessioni attive nelle aree geotermiche toscane. Per impianti di competenza nazionale, le linee guida ministeriali propongono uno schema sperimentale di allerta e di reazione per il solo caso di reiniezione di acque nel sottosuolo. In tale contesto è importante notare l'attuale mancanza di linee specifiche per l'utilizzo della risorsa geotermica a livello regionale.

L'obiettivo del presente documento è di riassumere le esperienze raccolte nella gestione di impianti geotermici in altri Paesi e di incentivare la redazione di un documento che definisca un apposito schema di comunicazione da applicare al monitoraggio da parte della SPM. Tale schema può rappresentare la base di partenza per lo sviluppo di un protocollo di reazione e potrà essere utile per l'implementazione delle future linee guida regionali per il monitoraggio delle attività geotermiche.

Abstract

In Italy, the actual geothermal concessions for the use of the geothermal resources expire in 2024. By the forthcoming assignment of the mining rights participate - beyond ENEL-Greenpower - also players of the free market, who intend to apply new technologies, accessing, however, one and the same geothermal reservoirs of Larderello-Travale and Mt. Amiata. The use of different methodologies (partial or complete reinjection), in adjacent areas, requires an advanced monitoring system, capable to locate microseismicity in real-time, calculating the relevant seismic parameters and communicating the results in quasi-real-time to the involved concessions, the competent authorities and the population. Following the initiative of the "Regione Toscana", the role as responsible monitoring agency (SPM) has been assigned to INGV, with the purpose to guarantee a homogeneous and centralized monitoring of all concessions operating in the Tuscan geothermal areas. Concerning power plants under national jurisdiction, the ministerial guidelines propose an experimental alert- and reaction-scheme, for water reinjection, exclusively. In this perspective, it is important to stress the actual lack of specific guidelines for geothermal exploitation on regional level.

The aim of the present work is to summarize the experiences collected during the management of geothermal systems in other countries and to promote the drafting of a document that defines an appropriate communication scheme for application of the monitoring tasks by the SPM. Such a scheme may represent the basis for developing a reaction scheme and could be useful for the implementation of future regional monitoring guidelines for geothermal activities.

Introduzione

Da parte del Ministero dello Sviluppo Economico, di seguito passato a MITE (Ministero per la Transizione Ecologica) e MASE (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica), sono state pubblicate due versioni degli Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio geofisico delle Attività antropiche:

ILG ⇒ una prima versione generale [Dialuce et al., 2014]:

INDIRIZZI E LINEE GUIDA PER IL MONITORAGGIO DELLA SISMICITÀ, DELLE DEFORMAZIONI DEL SUOLO E DELLE PRESSIONI DI PORO NELL'AMBITO DELLE ATTIVITÀ ANTROPICHE, da applicare a invasi idrici artificiali, estrazioni minerarie (cave, miniere, idrocarburi), scavi di tunnel, stoccaggio gas metano e stoccaggio CO₂ (attività attualmente non realizzata in Italia). Gli ILG propongono un modello decisionale basato sul superamento di soglie prestabilite, un cosiddetto sistema a semaforo (TLS - *Traffic Light System*);

LGEO ⇒ una edizione specifica sulla Geotermia [Terlizzese, 2016]:

LINEE GUIDA PER L'UTILIZZAZIONE DELLA RISORSA GEOTERMICA A MEDIA E ALTA ENTALPIA, redatto sia per la Geotermia tradizionale che per la Geotermia a ciclo chiuso. Per quanto riguarda la definizione di un sistema a semaforo, le LGEO rimandano alla definizione degli ILG. In Italia, le tecnologie EGS (*Enhanced Geothermal System*), ossia la produzione di energia geotermica tramite utilizzo di sistemi geotermici stimolati artificialmente per migliorare la permeabilità del serbatoio, non sono attualmente in uso.

Per l'applicazione degli Indirizzi e Linee Guida e per la definizione di un sistema a semaforo bisogna distinguere tra:

- i "Impianti pilota", che sono di competenza nazionale e sono, quindi, regolamentate dall'applicazione degli ILG [Dialuce et al., 2014] e delle LGEO [Terlizzese, 2016];
- ii "Altri impianti di utilizzo della risorsa geotermica", che sono di competenza regionale.

Visto che (i) attualmente non esiste nessun regolamento regionale che definisca le modalità di monitoraggio per gli impianti di Geotermia toscani presenti a Larderello-Travale e Monte Amiata e (ii) considerando che dal 2020 è stato formalizzato un accordo di collaborazione scientifica tra INGV e Regione Toscana con il titolo: "COSTITUZIONE DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO SISMICO INTEGRATO DELLE AREE GEOTERMICHE TOSCANE", si rende necessario iniziare la redazione di un apposito regolamento.

Gli obiettivi principali del presente lavoro sono:

- fornire un riassunto delle definizioni principali degli ILG e delle LGEO;
- fornire una revisione delle esperienze raccolte e delle metodologie e prassi applicate nel monitoraggio di impianti geotermici in altri paesi per la produzione di energia geotermoelettrica;
- incentivazione di redazione di un documento che definisca un apposito schema di comunicazione, utile al monitoraggio, da realizzare ad opera della SPM e utile all'implementazione nelle future linee guida regionali di monitoraggio delle attività geotermiche.

1. Le risorse geotermiche

La Figura 1 mostra uno schema con le varie tecniche di utilizzo della risorsa geotermica praticate a diverse profondità all'interno della crosta terrestre (profondità crescente da sinistra a destra). In particolare si distinguono sistemi geotermici profondi e superficiali.

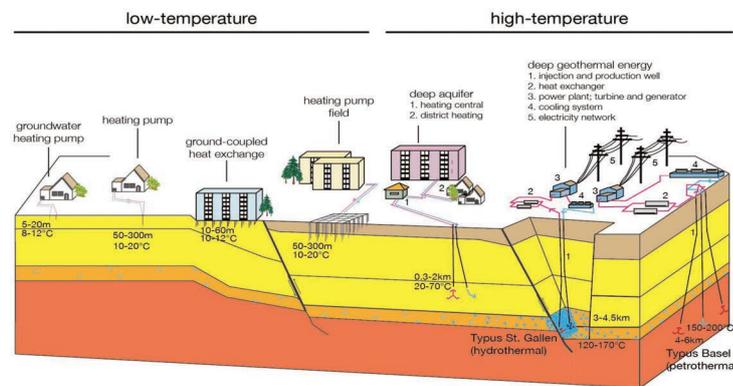


Figura 1 Differenti usi della risorsa geotermica in Svizzera [Hirschberg et al., 2015; Kraft et al., 2020].

Figure 1 Different uses of the geothermal resources in Switzerland [Hirschberg et al., 2015; Kraft et al., 2020].

Per la classificazione della Geotermia è importante distinguere tra una “risorsa” e un “sistema geotermico”. Mentre la classificazione delle risorse geotermiche è legata all’economicità di essa e quindi anche alla tecnologia utilizzata, i sistemi geotermici, e quindi anche i reservoir, vengono classificati in base alle loro caratteristiche geologiche, idrogeologiche, geochimiche. È generalmente accettata la classificazione dei sistemi geotermici in “convenzionale” (sistemi idrotermali) e “non-convenzionali” (EGS, salamoia calda, super critici, geopressurizzati, ecc.).

Moeck [2014] propone la seguente classificazione: “Come sistema geotermico si denomina un ambiente geologico delimitato, dove una parte dell’energia termica terrestre può essere estratta dai fluidi circolanti naturali, o artificialmente indotti, e poi trasportati nel luogo dell’utilizzo (centrale). Sistemi geotermici migliorati (EGS – *Enhanced Geothermal Systems*) sono porzioni di crosta terrestre dove il rapporto tra portata (F) e temperatura (T) del fluido è troppo basso ai fini di un uso economicamente favorevole; ragione per cui la portata deve essere artificialmente incrementata, applicando soluzioni tecniche per incrementare (migliorare) la permeabilità, fino ad arrivare ad un rapporto F/T sufficiente”.

La Geotermia profonda può essere classificata secondo la temperatura del serbatoio (*reservoir*) e secondo le tecniche usate per l’utilizzo della risorsa geotermica. La produzione di energia elettrica da sistemi geotermici deriva soprattutto da sistemi idrotermali (*HS - hydrothermal system*) ad alta-entalpia (indicativamente con $T > 250^{\circ}\text{C}$), spesso presenti in vicinanza di aree vulcaniche, con un gradiente geotermico tale da raggiungere centinaia di gradi negli strati superficiali. Alcuni esempi di HS in Europa sono Larderello-Travale, Monte Amiata e Islanda. I reservoir a bassa-media entalpia, invece, possono essere trovati o creati quasi ovunque, sotto le condizioni di perforare pozzi fino a profondità tali da raggiungere temperature superiori a $110 - 130^{\circ}\text{C}$ e di trovare il fluido e le permeabilità necessarie.

In caso dell’EGS, il fluido circolante può essere (vedi per esempio Moeck [2014]):

- i il fluido naturale, se un sistema idrotermale è collocato all’interno di una formazione di bassa permeabilità.
- ii il fluido artificiale (per esempio iniettato), se il sistema geotermico (petrotermale) non contiene un sufficiente volume di fluido per la produzione di calore (*Hot Dry Rock*,

Petrothermal System).

- iii Il fluido artificiale, che utilizza le zone naturalmente fratturate (faglie) come connessione idraulica (zone di alta permeabilità) (*Deep Geothermic Energy, Hot Fractured Rock, Hot Wet Rock*).

Generalmente, profondità operative dei pozzi tra 400 – 2000 m, con temperature del fluido fino a 120°C sono utili per operare impianti di teleriscaldamento (*Deep Acquifer*). Sistemi con temperature $150^{\circ}\text{C} \leq T \leq 180^{\circ}\text{C}$ (media entalpia) utilizzano tecniche che convertono calore in energia elettrica mediante un Ciclo Rankine Organico (ORC - *Organic Rankine Cycle*) avvalendosi come fluido di lavoro di una sostanza organica ad alto peso molecolare e basso punto di ebollizione. In caso di temperature operative, $T > 180^{\circ}\text{C}$, il fluido (vapore/acqua) viene utilizzato direttamente per la produzione di energia elettrica (es. Larderello, Mt. Amiata; Figura 2).

Di seguito riassumiamo le caratteristiche dei sistemi di produzione di energia geotermoelettrica, mostrando anche alcuni casi reali, riusciti o meno, in Europa: (✓ impianto operativo; † impianto fermato dopo sismicità verificatosi durante la stimolazione).

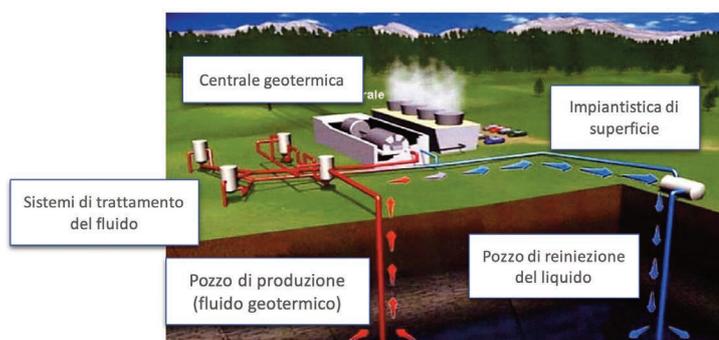


Figura 2 Schema di funzionamento di un impianto geotermico che utilizza un sistema idrotermale (fonte: ENEL).
Figure 2 Working scheme of a geothermal power plant, with production from a geothermal system (courtesy: ENEL).

Hydrothermal System (HS) - sistemi idrotermali che utilizzano la presenza di acqua calda e/o vapore nella matrice rocciosa porosa e fratturata naturalmente. In questo caso la stimolazione artificiale non è quindi necessaria. La perforazione avviene fino al *reservoir* (profondità 3 - 5 km). Il fluido viene estratto direttamente dal *reservoir*, il vapore arriva in turbina e l'acqua di condensazione viene reiniettata nello stesso serbatoio, che ha una porosità tale da garantire una connessione idraulica naturale all'interno del *reservoir* e quindi anche tra i pozzi di estrazione e di reiniezione, al fine di mantenere l'efficienza del *reservoir* (Figura 3).

- St. Gallen/CH (2012) † (⇒ §5.1)
- Larderello, Amiata (IT) ✓

Hot Dry Rock (HDR): Petrothermal/Enhanced Geothermal System – sistemi petrotermali (profondità 4 - 6 km) che utilizzano il calore presente nel volume roccioso, caratterizzato da una bassa permeabilità. La permeabilità tra i pozzi di iniezione e di produzione deve essere migliorata, applicando tecniche di geingegneria (stimolazione), ai fini di ottenere le portate necessarie alla produzione. La stimolazione consiste nell'iniezione di un fluido ad alta pressione (*hydrofracturing*). Tale processo crea delle microfessure (zone di maggiore permeabilità) con l'obiettivo di stabilire una connessione idraulica tra pozzo di iniezione ed estrazione. Nel caso dell'HDR la stimolazione

avviene nel basamento all'interno di un volume roccioso compatto (cristallino).

- Soultz-sous-forêts (FR) ✓ (⇒ §5.2)
- Basilea (CH) † (⇒ §5.5)
- Otaniemi (SF) ✓ (⇒ §5.6)

Hot Fractured Rock (HFR), Hot Wet Rock (HWR), Deep Geothermic Energy - sistemi che utilizzano il calore presente nel volume roccioso. Anche nel caso di HWR, non esiste nessun reservoir di fluidi e la connessione idraulica tra due pozzi (iniezione e produzione), perforati fino alla profondità con la temperatura desiderata ($> 150^{\circ}\text{C}$), deve essere creata attraverso una stimolazione all'interno del volume roccioso prefratturato. L'obiettivo è di utilizzare l'alta permeabilità delle faglie presenti in profondità in cui si riscontrano le temperature idonee ($>150^{\circ}\text{C}$). Il fluido viene quindi iniettato direttamente sulle faglie preesistenti all'interno del volume crostale fratturato. Le tecniche HWR implicano un rischio di sismicità indotta legata alla riattivazione di faglie esistenti.

- HWR: Landau ✓, Insheim ✓, Bruchsal ✓, Rittershofen ✓, Illkirch ✓ (⇒ §5.2)
- Vendenheim † (⇒ §5.3)
- Pohang (KR) † (⇒ §5.4)

Nel paragrafo (§5) verranno presentati ulteriori esempi sia di successo che di insuccesso, riscontrati in impianti geotermici in operazione in altri paesi del mondo.

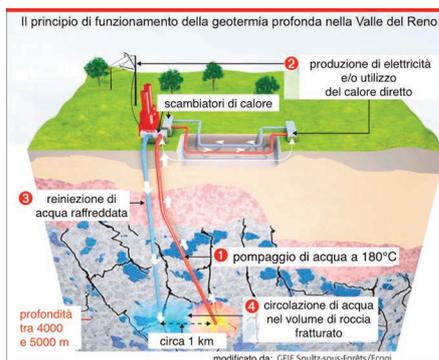


Figura 3 Schema di funzionamento di un impianto geotermico del tipo HWR [Vergne and Schmittbuhl, 2019].

Figure 3 Working scheme of a geothermal power plant of type HWR [Vergne and Schmittbuhl, 2019].

2. Meccanismi che causano sismicità indotta

Eventi sismici possono essere indotti a causa di diversi meccanismi fisici che influiscono a scale temporali e spaziali differenti. Nel caso della geotermia, tali meccanismi possono anche sovrapporsi o annullarsi reciprocamente. I principali meccanismi fisici, ritenuti responsabili per la generazione di sismicità antropogenica sono elencati di seguito [da Kraft et al., 2020], (Figura 4):

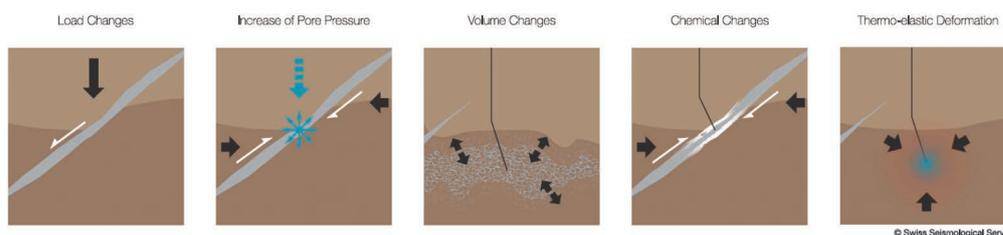


Figura 4 Meccanismi fisici, in grado di causare sismicità indotta [Kraft et al., 2020].

Figure 4 Physical mechanisms, capable to induce seismicity [Kraft et al., 2020].

Variazioni delle pressioni di pori

L'aumento della pressione di poro su una faglia sotto sforzo tettonico, può portare alla rottura della stessa, rilasciando una frazione dello stress tettonico accumulato nel tempo. Viceversa, una riduzione della pressione di poro tende a stabilizzare le faglie e quindi abbassare il tasso di sismicità [Husen et al., 2007].

Variazioni di temperatura

Raffreddamento o riscaldamento di un *reservoir* all'interno di un volume roccioso causa, rispettivamente, contrazione o espansione termica. Il raffreddamento apre delle fratture esistenti, cambiando la permeabilità, la velocità di scorrimento, il gradiente di pressione e l'iniettività. La deformazione termo-elastica cambia localmente lo stato di stress, fenomeno che può portare a sbloccare segmenti di interfacce fratturate (e/o faglie) pre-stressati [Murphy, 1978].

Variazioni di volume nella crosta

Variazioni di volume nel sottosuolo dovuti a iniezione o estrazione di fluidi (idrocarburi, acque di scarto, geotermia) o di materiale solidi (miniere) provoca un cambiamento delle condizioni di *strain/stress* su faglie adiacenti, che potrebbero essere già sotto *stress* tettonico [Segall, 1989; Gibowicz and Lasocki, 2001]. L'eccedenza del carico causato dal volume roccioso sovrastante, rispetto alla resistenza critica della faglia (*critical fault strength*), genera sismicità. Variazioni locali di carico in superficie, come in caso del riempimento o delle fluttuazioni stagionali di invasi idrici, sono da considerare casi specifici [Braun et al., 2018b] di deformazioni del sottosuolo.

Alterazioni chimiche

Causate da fluidi idrotermali, deposizione di minerali o formazione di argille, possono essere causa di variazioni delle condizioni su faglie sottoposte ad uno *stress* tettonico. Se i legami chimici vengono indeboliti si possono innescare terremoti indotti, mentre in caso di rafforzamento, una deformazione duttile (*creep*) può transitare in fragile (*stickslip*) generando eventi sismici [Atkinson, 1984; Marone, 1998].

Interazioni terremoto – terremoto

Le variazioni di *stress*, siano esse statiche o dinamiche, causate da terremoti indotti o tettonici possono funzionare come trigger per sismicità aggiuntiva [Catalli et al., 2008]. L'innesco di microsismicità durante il passaggio di onde superficiali provenienti da terremoti forti a livello globale è stato osservato a distanza di migliaia di chilometri [Hill and Prejean, 2007].

L'iniezione di fluidi in un volume crostale è probabilmente uno dei meccanismi più frequenti per la sismicità indotta. Questo contesto può essere illustrato avvalendosi del diagramma di Mohr, dove lo *stress* normale (massimo σ_1 e minimo σ_3) è plottato sull'asse orizzontale (compressione $P \Rightarrow$ positivo, tensione $T \Rightarrow$ negativo) e lo sforzo di taglio τ sull'asse verticale.

Se la pressione dei fluidi iniettati ad una certa profondità supera la pressione di poro naturale, il sistema diventa instabile. L'aumento della pressione di poro (P) porta alla diminuzione dello *stress* normale e a un aumento del rapporto tra la pressione idrostatica e litostatica. Il cerchio di Mohr (rosso) si sposta a sinistra del valore P (viola), avvicinandosi alla *failure envelope* (linea blu) che ha una pendenza caratteristica per la resistenza di frizione nel punto specifico del diagramma (Figura 5). In un'area di iniezione, i fluidi penetrano il volume crostale intorno al fondo-pozzo, migrando lungo le zone di maggiore permeabilità (minore resistenza idraulica) generando microsismicità (superamento della *shear strength*).

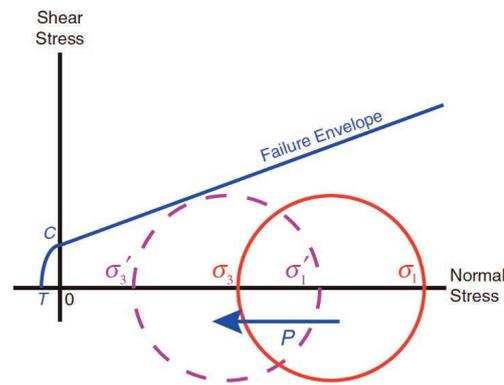


Figura 5 Diagramma di Mohr per l'iniezione dei fluidi ad elevata pressione [Rubinstein and Mahani, 2015].
Figure 5 Mohr diagram for the case of fluid injection at high pressure [Rubinstein and Mahani, 2015].

Per la definizione di un sistema a semaforo è necessario distinguere tra le fasi di **Stimolazione** e di **Operazione Definitiva**. Nel caso della Geotermia HWR o HDR, la connessione idraulica all'interno del volume crostale pre-fratturato, tra il pozzo di estrazione e di (re)iniezione, deve essere stabilita prima della fase operativa, avvalendosi di una tecnica, chiamata "stimolazione". La stimolazione si effettua attraverso l'iniezione in profondità di fluidi ad alta pressione, creando delle microfrazture (zone di maggiore permeabilità) con l'obiettivo di stabilire una connessione idraulica tra i due pozzi di esercizio.

Le pressioni applicate dipendono dalla profondità finale del pozzo ma, nella fase di stimolazione, sono significativamente più alte rispetto alla pressione idrostatica. Le profondità e i valori di pressione idrostatica, totale e sovrappressione per alcune concessioni sono riassunti in Tabella 1.

Concessione		Profondità	Pidro/bar	Ptotal/bar (Mpa)	sovrappressione/bar (MPa)
Basel (CH)	†	4629 m	460	755 (75.5)	295 (29.5)
Otaniemi (SF)	✓	5500-6100 m	550-600	600-900 (60-90)	50 - 300 (5-30)
Soultz/Forêts (F)	✓	5000 m	500	520 (52.0)	20 (2)
Rittershofen	✓	2700 m	270	305 (30.5)	35 (3.5)
Illkirch (F)					
Vendenheim (F)	†	2500 m	250	350- 450 (35-45)	100 - 200 (10-20)
Landau (D)	✓	3000 m	300	345 (34.5)	45 (4.5)
Insheim (D)	✓	3500 m	350	410 (41)	60 (6)
Pohang (CR)	†	4300 m	430	900 (90)	470 (47)
St. Gallen (CH)	†	4500 m	450	900 (900)	> 450 shut-in fango perforazione

Tabella 1 Concessione: chiusa (†), operativa (✓), profondità, pressione idrostatica, totale e supplementare.
Table 1 Concession: open (†), closed (✓), depth, hydrostatic pressure, total pressure, overpressure.

Uno studio di laboratorio realizzato da Kaiser [1950] riporta l'assenza di microfrazture (emissioni acustiche) all'interno di un blocco di materiale sotto sforzo, quando viene esposto a dei livelli di

stress inferiori rispetto ai valori di *stress* raggiunti in precedenza. Basandosi su questa osservazione. Baisch and Harjes [2003] evidenziano che nei campi geotermici, realizzati in volumi cristallini granitici di elevata temperatura, “l’effetto Kaiser” si manifesta come assenza di sismicità, finché non viene superato il livello di pressione raggiunto durante le stimolazioni precedenti. Questa osservazione è di grande importanza per l’esercizio di un campo geotermico. Durante la fase di stimolazione, appena viene registrata microsismicità, una diminuzione della pressione, e quindi anche della portata, ha un effetto immediato sulla sismicità. Di solito le pressioni dei fluidi usate durante il l’esercizio normale di una centrale geotermica, sono inferiori rispetto alle pressioni applicate durante la fase di stimolazione. Grazie “all’effetto Kaiser” viene quindi ridotta la probabilità di indurre sismicità dovuta alle pressioni usate durante il funzionamento normale.

In caso di centrali geotermiche ad alta entalpia (es. Larderello, Monte Amiata), che non necessitano di particolari sovrappressioni per la reiniezione, lo scenario cambia. In caso che siano le tensioni termiche dei fluidi freddi reiniettati ad indurre eventi sismici, una eventuale riduzione della pressione e/o portata dell’acqua non porterebbe a nessun effetto immediato relativo alla generazione di sismicità.

Uno studio di Megies and Wassermann [2014] mostra che anche impianti geotermici con parametri idraulici favorevoli, operativi a bassa pressione di iniezione d’acqua e senza necessità di stimolazione precedente sono capaci di generare sismicità, come per esempio a Poing, nel 2017 (§5.7). Una delle cause potrebbe essere associabile a iniezione di grandi volumi di acqua fredda all’interno di un serbatoio caldo che porta ad una variazione del tensore di *stress* locale. Anche una sovrappressione minima (1 bar), sommata alla pressione idrostatica della colonna d’acqua fredda concentrata in un isolato punto a fondo pozzo, porta ad un abbassamento del σ_1 e a un incremento dello sforzo di taglio τ inducendo, conseguentemente, sismicità. A titolo di esempio, negli impianti geotermici di Monaco in Baviera viene praticata l’iniezione di acqua con una temperatura di 50°C in un ambiente di 120°C, con un $\Delta T=70$ K. Mettendo in relazione la portata, la differenza di temperatura ΔT e la dimensione delle connessioni idrauliche, il tempo di permanenza del fluido nel sottosuolo non è sufficiente per riscaldare il volume d’acqua iniettato.

Un commento da tenere presente in merito all’iniezione dei fluidi (vedi esempi in §5.3, §5.4): in caso di iniezioni di grandi volumi di fluidi, come nel caso della reiniezione di acque di strato (*wastewater injection*) o durante delle stimolazioni geotermiche, la massima magnitudo aspettata può sempre essere stimata sulla base della relazione di McGarr [2014] (Figura 6).

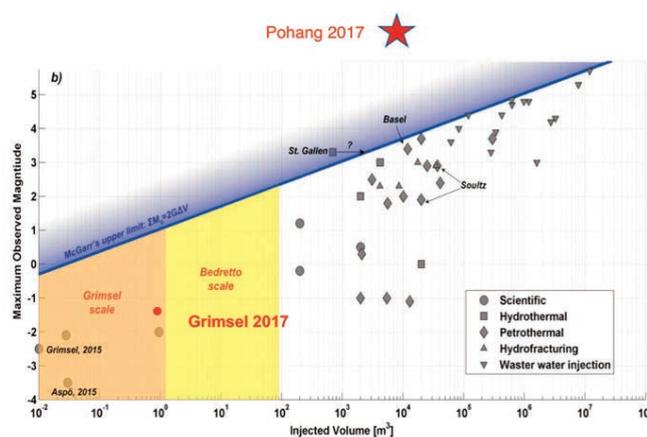


Figura 6 Relazione tra volume iniettato e magnitudo [McGarr, 2014; modificato da Wiemer, 2018].
 Figure 6 Relation between injected volume and magnitude [McGarr, 2014; modified by Wiemer, 2018].

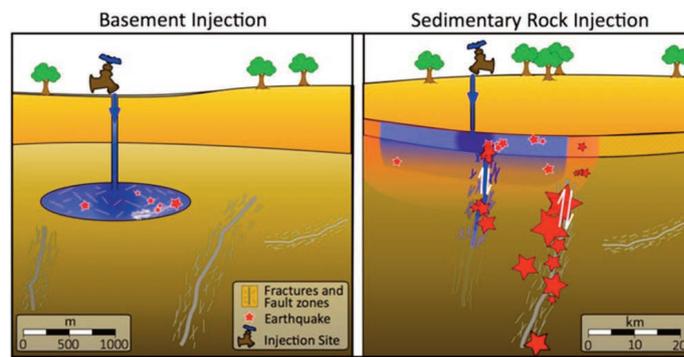


Figura 7 L'iniezione di fluidi in rocce sedimentarie, sovrastanti il basamento cristallino, può potenzialmente attivare un maggior numero di faglie, con eventi anche di magnitudo significative, rispetto all'iniezione diretta nel basamento cristallino stesso [Goebel and Brodsky, 2018].

Figure 7 Injection of fluids into sediments, overlaying the crystalline basement, can potentially activate a higher number of faults, with significant magnitudes, with respect to injection directly into the crystalline basement [Goebel and Brodsky, 2018].

Secondo uno studio di Goebel and Brodsky [2018], in siti con iniezione di acqua nei sedimenti, le rocce pongono meno resistenza ad essere pressurizzate rispetto all'iniezione diretta nel basamento cristallino. A causa della maggiore permeabilità riscontrata, la migrazione dei fluidi introdotti nei sedimenti può raggiungere distanze maggiori, con il risultato di una elevata probabilità di attivare faglie sottostanti (Figura 7). La Poro-elasticità, quindi, sembra essere la causa di induzione di terremoti nel basamento cristallino, anche se l'acqua viene iniettata dai sedimenti sovrastanti.

3. Indirizzi e Linee Guida ILG, definiti dal MISE (attualmente MASE)

3.1 Definizione e compiti del Comitato

All'interno degli ILG viene definito con il termine COMITATO, un gruppo di lavoro competente, incaricato alla gestione del monitoraggio di una concessione che pratica una delle seguenti attività nel sottosuolo:

- estrazione idrocarburi (oil and gas);
- stoccaggio gas metano;
- invasi idrici artificiali (dighe);
- geotermia tradizionale, a ciclo chiuso o stimolata;
- stoccaggio CO₂;
- estrazioni minerarie (cave, miniere);
- scavi di tunnel.

Seguendo le raccomandazioni degli ILG [Dialuce et al., 2014], la definizione del COMITATO incaricato per il monitoraggio di impianti (geotermici) di competenza nazionale è composto da un rappresentante:

- a. nazionale - DGS-UNMIG;
- b. regionale - Regione Toscana;
- c. titolare Concessione;
- d. Struttura Preposta al Monitoraggio.

Per impianti geotermici di competenza regionale, la composizione del COMITATO non è ancora definita e dovrà essere approvata dalla Regione Toscana. Un'opzione potrebbe essere che nel Comitato di competenza regionale il rappresentante nazionale di DGS-UNMIG, venga sostituito da uno o più rappresentanti dell'Amministrazione locale/provinciale, in maniera tale che la composizione del Comitato fosse come segue:

- a. un rappresentante dell'Amministrazione locale/provinciale;
- b. un rappresentante della Regione (Toscana);
- c. dal titolare della Concessione;
- d. dalla SPM (CMS-INGV).

Secondo gli **ILG §9.4**, le competenze dei singoli membri del comitato sono suddivise secondo il seguente schema. I compiti della SPM sono:

- la validazione delle condizioni dell'infrastruttura del monitoraggio;
- il monitoraggio dei parametri sismici, della deformazione del suolo e delle pressioni di poro;
- l'analisi di tali parametri e la loro comunicazione;

mentre la UNMIG, la Regione e il Concessionario, ciascuno per quanto di propria responsabilità e sulla base delle analisi della SPM, hanno l'incarico di decidere il tipo di intervento da applicare, come per esempio ridurre o sospendere le attività di produzione/reiniezione/stoccaggio in corso.

Nello specifico la SPM è responsabile per la parte tecnica del comitato e ha il compito di:

- calcolare i parametri sismici, ipocentro (coordinate geografiche e profondità), *ML* (Magnitudo locale), *PGV* (*Peak Ground Velocity*), *PGA* (*Peak Ground Acceleration*);
- decidere se le coordinate ipocentrali sono interni o esterni al dominio di monitoraggio;
- decidere se uno dei valori *ML*, *PGV*, *PGA* supera la rispettiva soglia del TLS;
- in caso affermativo determinare il livello di allerta (*LdA*) nel TLS vigente;
- segnalare al Comitato il livello di attivazione.

Tre membri del Comitato (Concessionario, Regione, Amministrazione locale/provinciale, con eccezione della SPM) devono definire la "reazione", o meglio, la valutazione delle decisioni da prendere, come per esempio la riduzione o la sospensione delle attività. La definizione della misura di intervento è una decisione politica e si basa sulla valutazione tecnica della SPM.

3.2 Definizione del sistema a semaforo (TLS)

Nel § 10 degli **ILG** (p. 31) viene suggerita «... l'adozione, in via sperimentale, di un sistema a semaforo solo per le attività in cui è prevista la re-iniezione dei fluidi nel sottosuolo», basato su:

- soglie spaziali: ipocentro rispetto al dominio di monitoraggio e
- soglie parametriche: Magnitudo, *PGV*, *PGA*

Soglie spaziali:

L'adempimento del primo compito è relativamente facile, in quanto consiste semplicemente nella definizione "a priori" di un confinamento geografico intorno alle coordinate dei pozzi geotermici di reiniezione (*PRI*), aggiungendo una zona di buffer in km. Tale fascia areale viene definita negli **ILG** e poi precisata nelle **LGEO** per il caso di pozzi geotermici. La Figura 8 illustra per le due aree di concessioni a Larderello-Travale e Monte Amiata, gestite da ENEL Greenpower, i domini di monitoraggio, con un buffer di 2 km (arancione), 2+5 km (rosso) e 8 km intorno ai *PRI*.

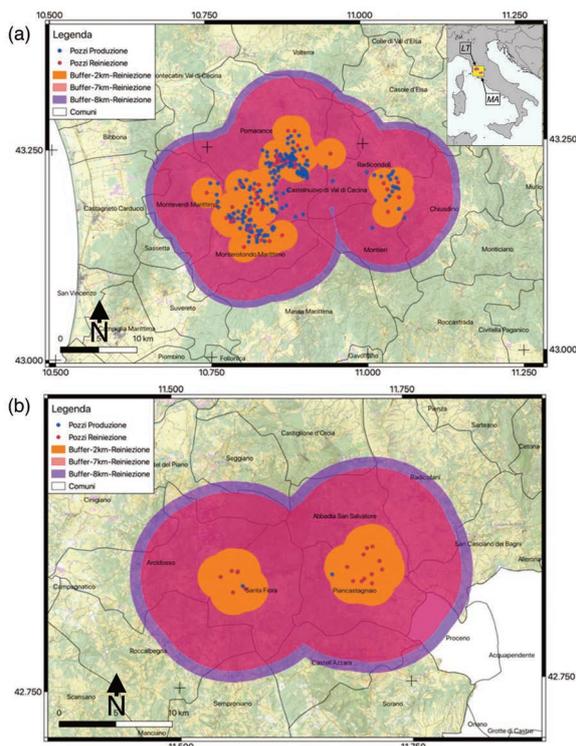


Figura 8 Domini di Monitoraggio proposti dalla SPM, buffer di: 2 km (arancione), 2+5 km (rosso) e 8 km intorno ai pozzi di reiniezione, per (a) le aree geotermiche di Larderello-Travale (LT) e (b) Monte Amiata (MA); vedi Figure 4.1, 4.2 in http://cms.ingv.it/documenti/Report_n3_Toscana_last.pdf. [Braun et al., 2021].

Figure 8 Monitoring domains proposed by the SPM, 2 km buffer of: 2 km (orange), 2+5 km (red) and 8 km around the reinjection wells, for (a) the geothermal areas of Larderello-Travale (LT) and (b) Monte Amiata (MA); see Figures. 4.1, 4.2 in http://cms.ingv.it/documenti/Report_n3_Toscana_last.pdf. [Braun et al., 2021].

Soglie parametriche:

Il secondo compito invece, deve essere definito sulla base di un “sistema a semaforo” che definisce dei livelli di attivazione. In generale un sistema a semaforo può generalmente essere suddiviso in un livello di: Ordinarietà, Attenzione e Intervento (riduzione o sospensione di attività) (Figura 9, Figura 10, Figura 11).

Livello di attivazione	Stato corrispondente
0	Ordinarietà
1	Attenzione
2	Riduzione delle attività
3	Sospensione delle attività

Figura 9 Livello di attivazione e stato corrispondente, definiti negli ILG [Dialuce et al., 2014], §9 Tabella 2. **Figure 9** Activation level and corresponding state, defined by the ILG [Dialuce et al., 2014], §9 Table 2.

Livello di attivazione	Semaforo	M_{max}	PGA (% g)	PGV (cm/s)
0	Verde	$M_{max} \leq 1.5$	-	-
1	Giallo	$M_{verde} \leq M_{max} \leq 2.2$	0.5	0.4
2	Arancio	$M_{giallo} \leq M_{max} \leq 3.0$	2.4	1.9
3	Rosso	$M_{arancio} < M_{max}$	6.7	5.8

Figura 10 Livelli di attivazione e parametri sismici definiti negli ILG [Dialuce et al., 2014], §9 Tabella 3. **Figure 10** Activation level and seismic parameters defined by the ILG [Dialuce et al., 2014], §9 Table 3.

Livello di attivazione	Azioni
	Per il quadro complessivo delle azioni da intraprendere vedere il testo - par. 9.3 -
0	La SPM fornisce i dati acquisiti e le elaborazioni effettuate in ordinario al Concessionario, all'UNMIG e alla Regione.
1	<p>a) La SPM effettua un'analisi delle variazioni dei parametri monitorati verificandone, ove possibile, l'eventuale correlazione con i dati di produzione/reiniezione/stoccaggio</p> <p>b) La SPM informa immediatamente il Concessionario, l'UNMIG e la Regione</p> <p>c) Il Concessionario fornisce eventuali ulteriori dati sulla produzione, re-iniezione o stoccaggio</p> <p>d) Nel caso sia esclusa, ovvero riscontrata, una correlazione tra le variazioni dei parametri monitorati e i dati di produzione/reiniezione/stoccaggio, si attua, rispettivamente, il rientro al livello 0 di ordinarietà o UNMIG, Regione e il Concessionario, sulla base delle analisi della SPM, fanno una valutazione complessiva delle informazioni disponibili e stabiliscono se ridurre progressivamente (livello di attivazione 2) o sospendere (livello 3) le attività in corso.</p> <p>Nel caso non sia possibile verificare l'eventuale correlazione, UNMIG, Regione e il Concessionario, ciascuno per quanto di propria responsabilità e sulla base delle analisi della SPM, stabiliscono se permanere al livello 1 o passare al livello 2.</p>
2	<p>Restano validi i precedenti punti a-c). Inoltre:</p> <p>d) Il Concessionario riduce progressivamente l'attività</p> <p>e) UNMIG, Regione e il Concessionario, sulla base delle analisi della SPM, stabiliscono se sospendere (livello 3) le attività in corso.</p> <p>f) entro 10 giorni dalla riduzione SPM verifica se ci sono le condizioni per il rientro nell'ordinarietà (livello 0) o nel livello 1.</p>
3	<p>Restano validi i precedenti punti a-c). Inoltre:</p> <p>d) Il Concessionario sospende l'attività</p> <p>e) entro 10 giorni dalla sospensione SPM verifica se ci sono le condizioni per il rientro nell'ordinarietà (livello 0) o nei livelli 1 o 2.</p>

Figura 11 Livelli di attivazione e schema di intervento, definiti negli ILG [Dialuce et al., 2014], §9 Tabella 4.
 Figure 11 Activation level and reaction scheme, defined by the ILG [Dialuce et al., 2014], §9 Table 4.

Gli ILG definiscono uno schema di intervento (*reaction scheme*) che prevede azioni concrete in caso di superamento del livello di attenzione:

- giallo: (2d) Il Concessionario riduce progressivamente l'attività;
- rosso: (3d) Il Concessionario sospende l'attività.

In assenza di un regolamento specifico per la geotermia, l'applicazione di tali criteri vale di DEFAULT. Questo significa che nessun gruppo di lavoro competente ha l'autorità per fare scelte discrezionali, ma piuttosto che la riduzione/sospensione dell'attività è automatica al superamento della soglia, anche se uno schema di reazione non può essere generalizzato in quanto dipende dalla tipologia di produzione di energia geotermica.

4. Regolamenti in altri paesi

Come notato da Bommer et al. [2006], strategie innovative per la riduzione del rischio sono realizzabili nell'ambito della sismicità indotta, in quanto è possibile gestire il rischio attraverso l'hazard, al contrario della mitigazione standard del rischio sismico, per cui è possibile intervenire soltanto sulla vulnerabilità e l'esposizione. Sono stati proposti TLS con l'obiettivo di determinare la condizione contingente di livello di rischio associato alla sismicità indotta raggiunge un livello inaccettabile, in maniera tale da ridurre o fermare le operazioni EGS, come anche farle ripartire [riferimenti in Kraft et al., 2020]. Esempi per TLS sono stati pubblicati per esempio da tanti autori [Bommer et al., 2006; Zoback, 2012; Bosman et al., 2016; Grigoli et al., 2017; Bohnhoff et al., 2018]. Bommer et al. [2006] propongono di mettere in relazione la frequenza cumulativa degli eventi e la PGV - Magnitudo equivalente (vedi Figura 18), dove R rappresenta la distanza ipocentrale in chilometri).

$$\log PGV = - 0.527 + 0.521ML - 1.058\log(R)$$

4.1 Regolamento Germania

Così come in Italia, anche in Germania il compito del monitoraggio sismico degli impianti per l'utilizzo della risorsa geotermica, è di competenza regionale. Sono in vigore le seguenti leggi nazionali che regolano le procedure in caso di danni a cose o persone.

4.1.1 Assunzione di Causa del Danno

In questo paragrafo vengono presentate per estratto alcune definizioni stabilite nella legge nazionale sulle miniere (**Bundesberggesetz (BbergG) §120**). Tali definizioni in lingua tedesca (*font PT Serif*) sono state tradotte SECONDO SCIENZA E COSCIENZA - e per migliore ricostruibilità - riassunte nel glossario. In caso di evento sismico che ha provocato danni a persone o cose, eventualmente associabile a attività antropiche, viene applicata una legge nazionale, chiamata LEGGE NAZIONALE MINIERE (**Bundesberggesetz – BbergG, §120**).

In caso di danni a cose o persone, a seguito di uno scuotimento causato da un evento sismico verificatosi all'interno di un'AREA DI INFLUENZA (**Einwirkungsbereich**), viene applicata l'ASSUNZIONE DI CAUSA DEL DANNO (**Bergschadensvermutung**). Si assume, cioè, che il danno sia stato causato dall'industria mineraria associata. In tale caso vale il principio DALLA COLPA ALLA PROVA D'INNOCENZA (**Anscheinsbeweis**), o meglio, è l'industria che deve dimostrare di non aver causato il terremoto.

Come viene definita l'Area di Influenza?

Per la definizione dell'AREA DI INFLUENZA ci si appella alla LEGGE PER LA DEFINIZIONE DELL'AREA DI INFLUENZA (**EinwirkungsbereichBergV**):

- §3 comma 4: «... a seguito di uno scuotimento, l'Ufficio Competente¹ (**Bergbehörde**) deve definire l'Area di Influenza, sulla base dei risultati di misure sismologiche e altri dati, dell'intensità microsismica e della velocità picco del sottosuolo (PGV), come anche risultati di modellazioni e valori empirici.».
- Al di fuori dall'Area di Influenza assunzione di nessun danno.
- La definizione dell'Area di Influenza può essere stabilita, a seguito della consultazione dei servizi di monitoraggio sismico competenti (SPM).

4.1.2 Compiti dell'Ufficio Competente

I compiti dell'UFFICIO COMPETENTE sono:

- la definizione dell'associazione Concessionario-Area di Influenza;
- la comunicazione dell'Area di Influenza al concessionario.

4.1.3 Criteri per la definizione dell'Area di Influenza

Nella legislazione tedesca i criteri per la definizione dell'AREA DI INFLUENZA (AI) sono definiti nella LEGGE PER LA DEFINIZIONE DELL'AREA DI INFLUENZA (**EinwirkungsbereichBergV**). Tale legge si basa sulla norma industriale tedesca **DIN4150-3**, che prevede la misura delle PGV (velocità picco del moto del suolo) all'interno di edifici o il rilevamento dell'intensità macrosismica (EMS-98):

L'AREA DI INFLUENZA è da definire come linea di confine. All'interno dell'AREA DI INFLUENZA si assume che si è verificato uno scuotimento sismico che abbia superato un'intensità macrosismica con intensità $I_0 > 5$ (EMS-98) oppure una PGV > 5 mm/s in un range di frequenza tra 1 e 10 Hz. Si assume inoltre che questi valori non vengono raggiunti fuori dell'AREA DI INFLUENZA.

L'AREA DI INFLUENZA può consistere in settori non interconnessi tra di loro. La proclamazione dell'AREA DI INFLUENZA deve essere realizzata in forma di mappe cartografiche o tramite definizione di uno o più poligoni, composto da coordinate geografiche:

- PGV > 5 mm/s (1-10 Hz) **DIN 4150-3** ⇒ mappe di isoline PGV;
- intensità macrosismica $> V$ (EMS-98) ⇒ mappa delle isosiste;

¹L'Ufficio Competente della Regione Toscana, l'equivalente della **Bergbehörde**, è l'Ufficio Miniere Regionale.

- localizzazione ipocentrale e Magnitudo dell'evento sismico in combinazione con relazioni empiriche (*Ground Motion Prediction Equations* – GMPE), oppure modellazioni del moto del suolo sulla base di informazioni geologiche, effetti di sito, meccanismo focale.

Una precisazione relativa alla misura della PGV. La misura della PGV «in campagna» (fuori dalle strutture) non è conforme con la **DIN4150-3**, dato il fatto che i valori PGV in campagna possono raggiungere valori fino a due volte più alta rispetto a PGV misurate all'interno di un edificio.

4.1.4 Soglia di Attenzione ⇒ evento sismico con obbligo di Segnalazione

Un evento sismico **deve essere segnalato** quando viene localizzato nelle vicinanze di una centrale geotermica ($r < 5$ km) con parametri che soddisfano i seguenti criteri:

- Magnitudo $M \geq 2$
- Intensità \geq IV (scala EMS-98)
- PGV ≥ 1 mm/s

Coincidenza temporale e vicinanza spaziale dell'epicentro alle attività antropiche

- Uffici coinvolti: Ufficio Miniere (competente) Regionale (**Bergbehörde**), Ente competente per il monitoraggio SPM (**Fachstelle**), concessionario.

L'ufficio regionale assegna «a priori» l'incarico del monitoraggio sismico all'Ente esperto SPM.

4.2 Regolamento Svizzera

Come illustrato per esempio da Hirschberg et al. [2015] e Kraft et al. [2020] nella “Guida delle buone pratiche per la gestione della sismicità nei progetti di energia da geotermia profonda”, in Svizzera vengono applicati e/o proposti due tipi di sistema a semaforo: (a) Sistemi TLS statici o tradizionali e (b) Sistemi TLS adattativi.

- L'applicazione di un **classical TLS** (tradizionali, Figura 12) sono misure comuni e effettive per la riduzione del rischio. Per certi parametri sismici vengono stabilite “a priori” delle soglie e associate delle (re)azioni in caso di superamento delle stesse (vedi §3.2, TLS MISE). Le decisioni si basano su valori di magnitudo e moto del suolo. I livelli di attivazione (threshold levels) sono definiti in maniera statica e considerano anche informazioni geotecniche, per quanto disponibili. In Svizzera sia il progetto EGS-Basilea [Häring et al., 2008], sia il progetto HS-St. Gallen [Diehl et al., 2017] furono gestiti, da un TLS statico, basandosi sulla:
 - percezione della popolazione (public response – intensità macrosismica);
 - magnitudo (M_L , M_w);
 - velocità picco del suolo (PGV).

Il progetto EGS-Basilea adottava uno schema di reazione a 4 livelli

- VERDE: continuare come da programma;
- GIALLO: continuare ma senza aumentare la pressione;
- ARANCIONE: stop;
- ROSSO: stop e rimozione dei fluidi dal pozzo.

Durante le operazioni di stimolazione a Basilea (⇒ §5.5) la riduzione della pressione e la rimozione dei fluidi dal pozzo (*bleed-off*) durante i giorni critici intorno all'8 dicembre 2006, erano consistenti con le azioni previste dal TLS. La chiusura e il fallimento del progetto

EGS a Basilea porta alla conclusione che l'applicazione del TLS-standard, definito "a priori", non era un sufficiente e adatto approccio di monitoraggio e di allerta [Bachmann et al., 2011].

Nel caso di St. Gallen (\Rightarrow §5.1) la situazione era leggermente differente. Il livello GIALLO del TLS era stato raggiunto, ma le azioni previste, cioè lo stop dell'iniezione per almeno 6 ore, non erano state applicate, a causa delle preoccupazioni relative alla pressione legata all'improvvisa entrata di gas metano nel pozzo (*shut-in*).

- b. Una nuova generazione di sistemi a semaforo adattativi sono gli ATLS (*Adaptive Traffic Light System*; Figura 12). Le decisioni si basano su dei modelli (in grigio) calcolati nell'ambito di un contesto predittivo, probabilistico e adattativo, poi valutati in tempo quasi-reale. Gli ATLS sono modelli dinamicamente aggiornati, predittivi e probabilistici, che prognosticano la futura sismicità e la dinamica evolutiva del *reservoir* sulla base di parametri chiave (volumi, pressione, temperatura, permeabilità), comparabili al PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Assessment*) [Hirschberg et al., 2015; Grigoli et al., 2017].

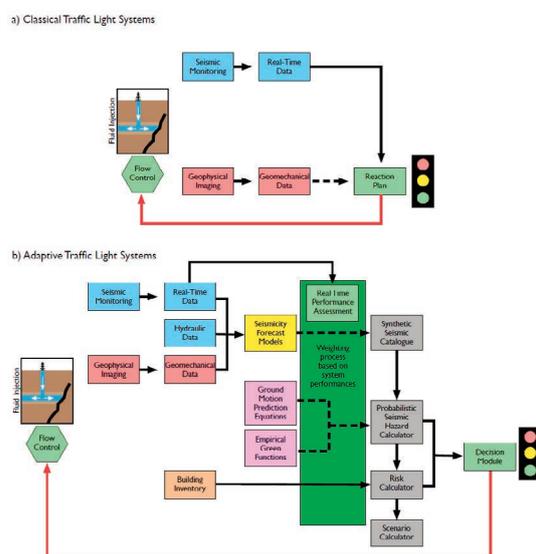


Figura 12 (a) TLS tradizionale (b) Advanced TLS [da Grigoli et al., 2017].

Figure 12 (a) traditional TLS, (b) advanced TLS [after Grigoli et al., 2017].

5. Esempi di sismicità indotta legati alla produzione geotermica

5.1 St. Gallen (CH) – 20/07/2013

Un esempio di geotermia idrotermale è il progetto di St. Gallen in Svizzera. Nel 2012 è stata installata una rete di monitoraggio sismico, composta da 6 stazioni a tre componenti in superficie e una stazione in pozzo (205 m di profondità). Nel 2013 all'interno della sequenza dei sedimenti mesozoici è stato perforato il pozzo GT-1 fino ad una profondità di 4450 m. In data 14 luglio è stata fatta una prima stimolazione test per una durata di 2 ore, iniettando un volume di 175 m³ acqua fredda (periodo 1; Figura 13). Dopo 80 minuti sono stati registrati 12 eventi sismici ($M_L < 0.9$), localizzati in vicinanza del fondo pozzo. Il 17 luglio, durante le operazioni di "pulizia del fondo pozzo", tramite due iniezioni per un totale complessivo di 145 m³ di acido idrocloridico diluito, si è verificato un immediato aumento della microsismicità ($M \leq 1.2$) per una durata di 39 ore (Periodo 2; Figura 13). In data 19/07 è entrato metano, originario da sottostanti sedimenti Permo-Carboniferi, nel pozzo provocando un *blow-out* di 12 m di altezza. Il pozzo è stato chiuso e la pressione a testa pozzo è cresciuta velocemente fino a 90 bar. Per motivi di

sicurezza è stato deciso di avviare le procedure standard di controllo, iniettando per un periodo di 18 ore 700 m³ di fluido fangoso, che portava all'immediata diminuzione della pressione a testa pozzo fino ad arrivare a 25 bar (periodo 3; Figura 13). Il verificarsi di un evento di M1.6 ha fatto scattare il livello giallo del TLS, che prevedeva la cessazione dell'iniezione. Per impedire un'eventuale fuoriuscita del metano (*gas-kick*) è stato deciso di continuare l'iniezione del fluido fangoso. Alle ore 02:40 del 20/07 si è verificato un evento di M2.1 seguito alle 05:30 da un terremoto di M3.6, l'evento principale della sequenza, provocando la segnalazione di una dozzina di casi di danni. La serie di *aftershocks* ha terminato in data 25/07 con la chiusura definitiva del pozzo.

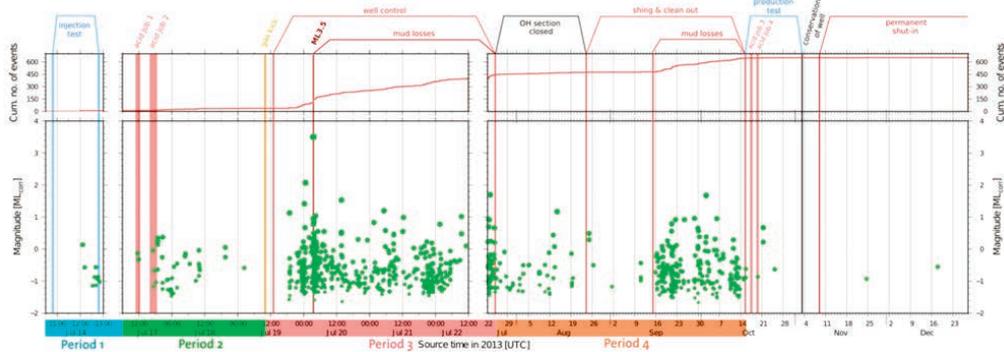


Figura 13 Evoluzione temporale (tempo in UTC) della sismicità indotta (magnitudo) in funzione della fase di operazione [da Kraft et al., 2020].

Figure 13 Temporal evolution (time in UTC) of the induced seismicity (magnitude) as function of the operation phase [from Kraft et al., 2020].

In seguito, la continua osservazione di sismicità ha portato alla decisione di riaprire il pozzo per le operazioni di pulizia (periodo 4; Figura 13). L'attività sismica ha ripreso nuovamente a settembre 2013, probabilmente associabile a delle perdite di fango all'interno del pozzo, mentre la sismicità cessava definitivamente dopo la rimozione del fluido dal volume crostale stimolato. È stato ritenuto molto probabile che l'attività microsismica sia cessata con la riduzione della pressione di poro [riassunto da Diehl et al., 2017 e Kraft et al., 2020].

5.2 Landau, Insheim, Bruchsal (D), Soultz-sous-forêts, Rittershofen, Illkirch (F)

Nella mappa delle anomalie geotermiche presenti in Francia (Figura 14), espresse come temperature (°C) a 5 km di profondità, evidenziano tre zone principali propensi all'utilizzo della risorsa geotermica: la Francia meridionale, il Massiccio Centrale e la Valle del Reno, al confine con la Germania. In quest'ultima area (rettangolo nero in Figura 14) sono stati realizzati, avviati (✓) o fermati (†) i seguenti progetti operativi.

- HWR: Landau ✓, Insheim ✓, Bruchsal ✓, Rittershofen ✓, Illkirch ✓, Vendenheim † (⇒\$5.3);
- HDR: Soultz-sous-Forêts ✓, Basilea † (⇒\$5.5)

Anche se geograficamente vicini, il tipo di esercizio geotermico dipende dalle condizioni geologiche al contorno:

A Soultz-sous-Forêts (HDR) la centrale è diventata operativa a partire dal 2008, a seguito della perforazione di 3 pozzi fino nel basamento cristallino (5000 m) e una fase di stimolazione, in cui

è stata registrata sismicità indotta in vicinanza dei pozzi [Calò et al., 2014]. I parametri operativi furono:

sovrappressione: 20 bar (2 Mpa), portata ~ 33 l/s (110 – 120 m³/min), temperature 165°C

Nelle centrali geotermiche operative (✓) di Landau, Insheim, Bruchsal, Rittershofen e Illkirch sono stati perforati dei pozzi fino a una profondità di circa 2500 - 3200 m. Stimolazioni nelle zone fratturate hanno stabilito delle connessioni idrauliche tra il pozzo di iniezione e di produzione all'interno delle zone fratturate, sfruttando l'alta permeabilità delle stesse. I valori dell'esercizio variavano tra: sovrappressione: 35 – 60 bar, portata 70 - 100 l/s, temperature 160 – 180 °C.

Le centrali geotermiche nominate nel presente paragrafo sono diventate operative a seguito di una fase di stimolazione che non ha superato i margini dei TLS vigenti.

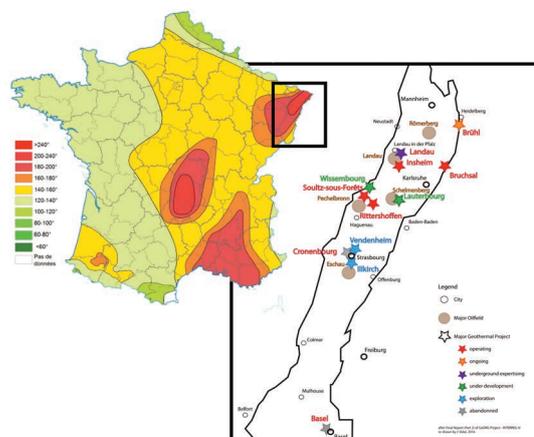


Figura 14 Mappa delle temperature (°C) a 5 km di profondità in Francia (sx) e mappa dei progetti geotermici nella Valle del Reno [dx, da Vergne and Schmittbuhl, 2019].

Figure 14 Temperature map (°C) at a depth of 5 km in France (left) and map of the geothermal projects in the Rhine Valley [right, from Vergne and Schmittbuhl, 2019].

5.3 Vendenheim (F) 26/06/2021 ML 3.9

A seguito dei successi della geotermia profonda (HWR) nella Valle del Reno sono stati avviati altri progetti di geotermia, come per esempio a Vendenheim, pochi chilometri a Nord di Strasburgo. Sono stati perforati due pozzi GT-1 (iniezione) e GT-2 (produzione) fino ad una profondità di 2500 m (Figura 15). Le stimolazioni, che avevano l'obiettivo di stabilire una connessione idraulica tra i due fondo-pozzo, sono state realizzate a partire dal 2018, a seguito della costruzione della centrale geotermica GEOVEN (Fonroche). Nelle prime stimolazioni, sia al pozzo GT-1 a primavera del 2018, che al pozzo di produzione (prima di novembre 2019), sono state applicate sovrappressioni fino a 100 bar con portate massime di 100 l/s, ed è stata generata della microsismicità intorno ai rispettivi pozzi. Test di circolazione hanno stabilito una portata di ~ 10 l/s che risulta al di sotto dei valori necessari all'esercizio della centrale. Le stimolazioni di novembre 2019 hanno portato ad uno sciame sismico a 4 - 5 km a sud del punto di iniezione con una magnitudo locale massima (calcolata sulla componente verticale) di $M_{LV} = 3.0$. È probabile che i fluidi iniettati, anziché stabilire una connessione idraulica tra i due fondo pozzi, siano migrati lungo le zone di maggiore permeabilità, innescando sismicità 5 km sud del pozzo GT-1 (cerchi rossi in Figura 15).

Ad ottobre 2020, a seguito di una nuova serie di stimolazioni ad una profondità di 3 km, applicando sovrappressioni fino a 200 bar, un ulteriore cluster di sismicità è stato osservato nella località “La Wantzenau”, ad una distanza di meno di 1 km dai pozzi GT-1 e GT-2. Il verificarsi di eventi sismici di $M_{LV} = 3.6$ (04/12/2020), seguito da un evento di $M_{LV} = 3.3$ (22/01/2021) e un $M_{LV} = 3.9$ (26/06/2021), ha causato l'arresto definitivo del progetto.

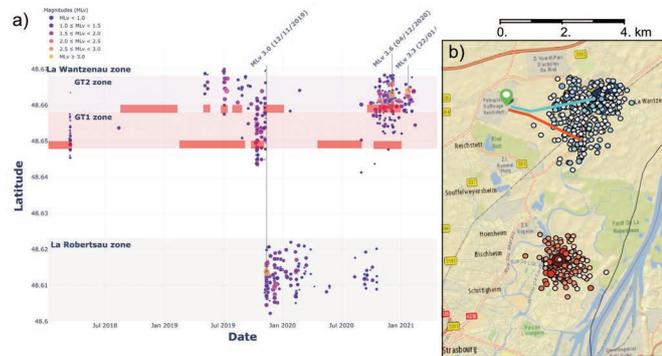


Figura 15 (a) Cronologia della sismicità registrata tra marzo 2018 e gennaio 2021 riportata in grafico rispetto alla latitudine geografica; (b) mappa epicentrale degli eventi registrati a seguito delle stimolazioni fatte al pozzo di iniezione GT-1 (rosso) e al pozzo di produzione GT-2 (azzurro) [da Schmittbuhl et al., 2021].
Figure 15 (a) Chronology of the recorded seismicity between March 2018 and January 2021 plotted with respect to the geographic latitude; (b) epicentral map of the recorded events after the stimulations performed at the reinjection well GT-1 (red) and the production well GT-2 (light blue) [after Schmittbuhl et al., 2021].

5.4 Pohang (CR) 15/11/2017 Mw 5.4

In data 15 novembre del 2017, nelle vicinanze del campo geotermico a Pohang nel Corea del Sud, si è verificato un evento sismico di Magnitudo M5.4. Nel 2015 e 2016 sono state realizzate due perforazioni (Figura 16) fino ad una profondità di 4300 m: un pozzo verticale (PX-2), usato poi per l'iniezione dell'acqua in fase di stimolazione, e un pozzo (PX-1), lateralmente deviato in profondità, in maniera tale da non perforare la zona fagliata (arancione in Figura 16). La distanza orizzontale tra i due fondi pozzo era di 616 m. Per un periodo di quasi due anni, tra gennaio 2016 e settembre 2017 sono state realizzate cinque stimolazioni con l'obiettivo di stabilire una connessione idraulica tra i due pozzi, PX-1 (produzione) e PX-2 (iniezione). A causa della relativa impermeabilità (*seal*) della faglia prossima alla perforazione PX-1 con $P_{max} = 300$ bar, le stimolazioni non erano sufficienti a stabilire una circolazione tra i due pozzi. Come conseguenza la pressione dell'iniezione nel pozzo PX-2 è stata incrementata fino ad arrivare ad una pressione $P_{well-head} = 900$ bar (con una portata di 100 l/s), tre volte più alto delle pressioni utilizzate a Basilea, nove volte più alte delle pressioni ammissibili in Francia e paragonabile alla pressione litostatica a 4200 m. Le attività di perforazione vennero registrate da una rete sismica installata in diverse configurazioni. A seguito dell'evento di M5.4, un team di specialisti ha impiegato nove mesi per le analisi della sismicità indotta. L'analisi dei dati ha rilevato che durante la stimolazione la sismicità si sviluppava lungo una superficie ad una distanza di centinaia di metri dal punto di iniezione. Questa superficie risultava poi come la faglia situata tra i due pozzi, che ha portato alla riattivazione della stessa portando all'evento principale di M5.4. L'assenza di un monitoraggio sismico in tempo reale ha impedito di accorgersi con tempestività che gli ipocentri della sismicità indotta erano localizzati lontani dal fondo pozzo PX-2. Considerando che il numero degli eventi registrati era comunque basso (una decina) e solo uno o due degli eventi registrati raggiungevano

una magnitudo tale da far scattare il semaforo (Figura 17), forse le condizioni non sarebbero state sufficienti per ridurre o sospendere le attività di iniezione.

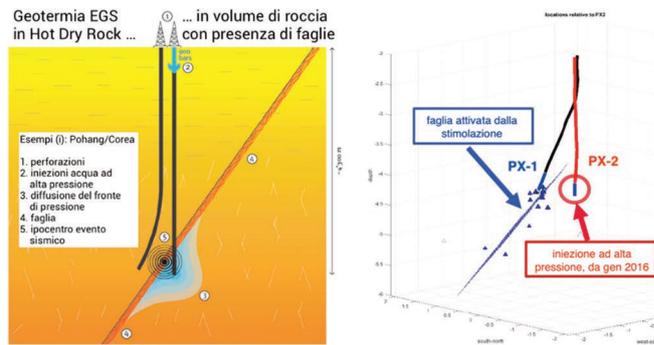


Figura 16 Schema di configurazione dei pozzi di produzione PX-1 (deviato) e di iniezione PX-2 (verticale), perforati fino ad una profondità di 4300 m, nell’ambito del progetto geotermico a Pohang (Corea del Sud) [Zingg and Meier, 2019].

Figure 16 Configuration scheme of the production well PX-1 (deviated) and the injection well PX-2 (vertical), drilled down to a depth of 4300 m, in the framework of the geothermal project at Pohang (South Korea) [Zingg and Meier, 2019].

PGV ($\mu\text{m/s}$) @ MSS01	M_w	Stage	Injection rate (Event @ high rate)	Injection rate (Event @ low rate)	Adjusted injection rates for next cycle
≥ 100	≥ 2.0	5	Flowback	Flowback	Flowback
≥ 52	≥ 1.7	4	Flowback	Flowback	Flowback
≥ 27	≥ 1.4	3	★ 	★ 	★
≥ 10	≥ 1.0	2	★ 	★ 	
< 10	< 1.0	1	★ 	★ 	

Legend: ★ Induced seismic event — adjusted injection rate *** planned injection rate

Figura 17 Sistema a semaforo usato durante le attività di stimolazione ciclica nel pozzo PX-1 a Pohang [Hofmann et al., 2019].

Figure 17 Traffic light system used during cyclic stimulation activity at the well PX-1 at Pohang [Hofmann et al., 2019].

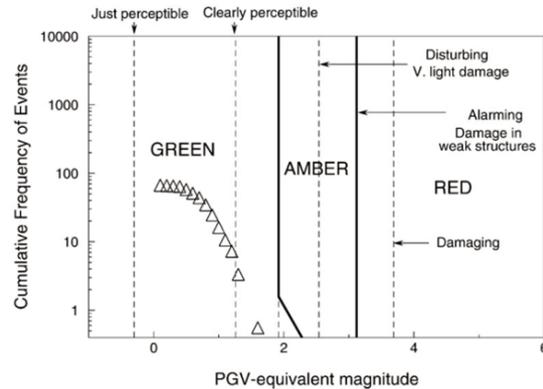
A posteriori, si può constatare che l’indicatore decisivo per riconoscere lo stato critico delle operazioni non era solamente il verificarsi della sismicità “lontano” dal punto di iniezione, ma piuttosto la sparizione del fluido iniettato ad alta pressione, che durante la stimolazione non raggiungeva l’altro fondo pozzo, ma alimentava la faglia. Tale anomalia avrebbe dovuto fermare le attività d’iniezione, per analizzare la situazione e rivalutare l’hazard.

5.5 Basilea (CH) 2006

Un esempio di geotermia petrotermale (HDR) è il progetto *Deep Heat Mining* a Basilea (CH) (Figura 19). Era previsto di aumentare la permeabilità del reservoir all’interno del basamento cristallino, iniettando fluidi ad alta pressione per un lasso di tempo di almeno due settimane.

A febbraio del 2006 è stata installata una rete di monitoraggio sismico composta da 6 stazioni da pozzo (300 – 2700 m), da abbinare poi ad uno schema TLS [proposto da Bommer et al., 2006].

Figura 18 TLS proposto in funzione di magnitudo, derivato da PGV [da Bommer et al., 2006].
Figure 18 TLS proposed as function of magnitude, derived from PGV [after Bommer et al., 2006].

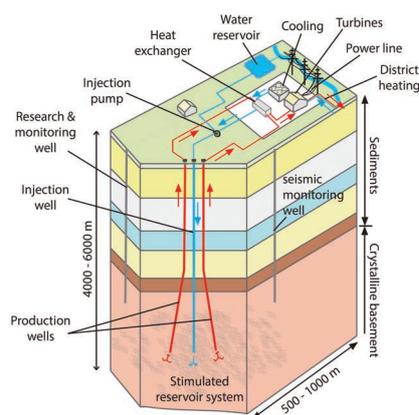


Tra maggio ed ottobre 2006 è stato perforato un pozzo nel basamento granitico fino ad una profondità di 5000 m, oltrepassando 2400 m di sedimenti. Durante queste operazioni e la successiva cementazione è stata immediatamente registrata microsismicità ($M \leq 0.7$). Durante un test di stimolazione con pressioni fino a 76 bar è stata osservata il verificarsi di microsismicità in vicinanza del fondo pozzo, appena superata una pressione di 50 bar. Questa microsismicità è stata seguita da un'entrata laterale di acque di formazione.

Durante la stimolazione principale dal 02 - 08/12/2006, sono stati iniettati nel pozzo 11500 m³ di acqua ad alte pressioni fino a 295 bar, con una portata massima di 55 l/s. Dopo 16 ore di stimolazione si è verificato un evento di M2.6 all'interno del reservoir. Essendo tale magnitudo nella fascia "Amber" del TLS è stato deciso di sospendere le operazioni, eseguendo uno *shut-in* del pozzo. Nel pomeriggio dello stesso giorno si sono verificati due ulteriori terremoti di magnitudo M2.7 e M3.4 ($I_{EMS}=V$), provocando danni pari a circa 6 Milioni di CHF. Durante le 8 settimane successive altri si verificarono una serie di aftershocks, inclusi tre eventi con $M > 3$.

Figura 19 Schema del sito geotermico di Basilea.
 [Kraft et al., 2020].

Figure 19 Sketch of the geothermal site of Basel. [Kraft et al., 2020].



5.6 ESPOO-Otaniemi (SF) giugno/luglio 2018

In Finlandia, nell'ambito di un progetto HDR è stata realizzata una perforazione nel basamento cristallino (OTN-3) fino ad una profondità di 6.1 km (Figura 20). A giugno/luglio del 2018 sono state realizzate 5 fasi di stimolazione per un totale di 49 giorni, iniettando un totale di 18,160 m³ di acqua in una profondità tra 5.5 – 6.1 km (Figura 20b). Una rete sismica composta da 24 sismometri da

pozzo con ottime capacità di localizzazione ipocentrale, ha reso possibile di fornire in tempo reale i parametri (tassi di sismicità, ipocentri, magnitudo e comparazione tra energia sismica e idraulica) utili a regolare la pressione (60 – 90 MPa) e la portata dei fluidi (400 – 800 l/min) iniettati.

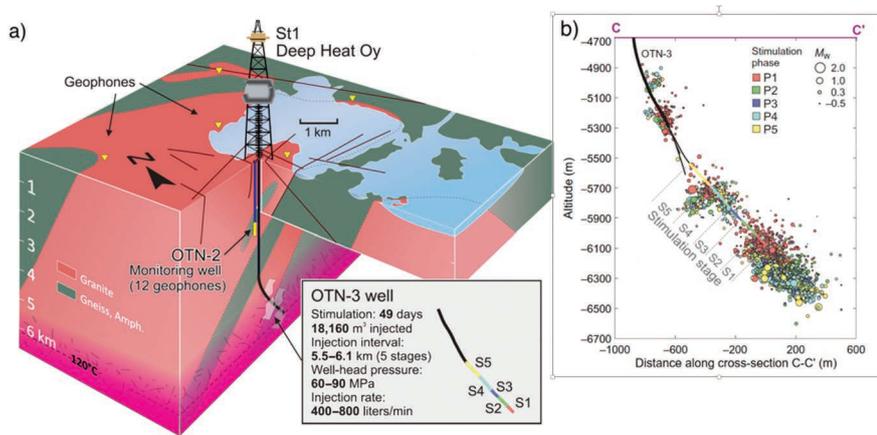


Figure 20 (a) Schema della perforazione del pozzo OTN-3; (b) ipocentri della sismicità indotta durante le 5 fasi di stimolazione (P1 – P5), [da Kwiatek et al., 2019].

Figure 20 (a) Sketch of the perforation of the well OTN-3; (b) hypocenters of the seismicity induced during the 5 stimulation phases (P1 – P5), [after Kwiatek et al., 2019].

La Figura 21 mostra per ogni fase (P1 – P5) l’evoluzione temporale dei seguenti parametri:

- a. Pressione (testa pozzo) e portata cumulativa per ogni sub-fase (P1 – P5) di iniezione rispetto alla sismicità parametrizzata in termini di magnitudo e distanza dal OTN-3 (localizzato con HypoDD).
- b. Il numero di eventi e il rateo di sismicità (numeri di eventi/ora) e il valore b della sismicità (Gutenberg- Richter), per un catalogo con una Magnitudo di completezza di $M_w > -0.5$.
- c. Magnitudo locale M_L e magnitudo momento M_w . Eventi simici rilevati ma non localizzati con simboli neri.

In questa maniera è stato possibile evitare che le magnitudo della sismicità indotta superasse il valore di soglia $M=2.0$.

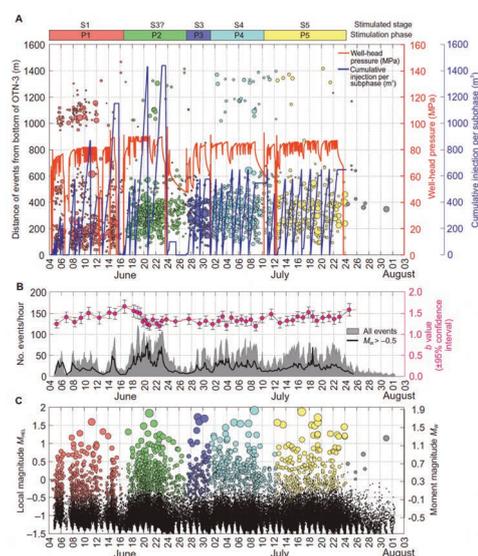


Figure 21 Evoluzione temporale per ogni fase (P1 – P5) dei parametri caratteristici descritti nel testo [Kwiatek et al., 2019].

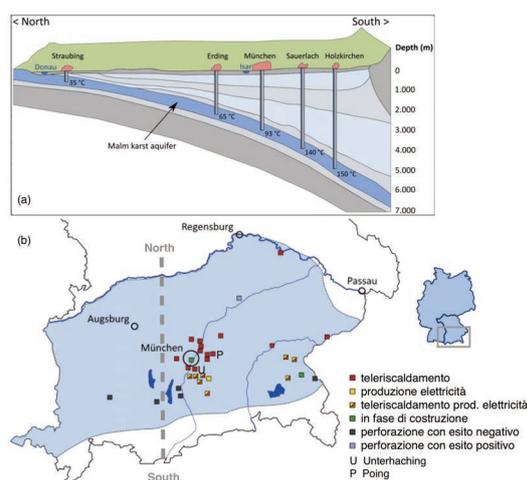
Figure 21 Temporal Evolution for each phase (P1 – P5) for the characteristic parameters described in the text [Kwiatek et al., 2019].

5.7 Geotermia profonda, Monaco/Baviera (D) 2017

La presenza di acqua termale all'interno della formazione ad elevata porosità del giurassico superiore (Malm) in Baviera, la rende interessante per l'utilizzo geotermico. La Figura 22a illustra un profilo schematico orientato N-S lungo la linea tratteggiata (b), che evidenzia lo sprofondamento dello strato dalla superficie (N) ad oltre 6000 m (S) con un aumento della temperatura da 35 °C ad oltre 150 °C. La Figura 22b mostra con simboli colorati gli impianti geotermici che rappresentano il tipo di utilizzo.

Figura 22 (a) Profilo di profondità N-S della crosta superiore in Baviera; (b) mappa dei siti geotermici <https://geothermie-allianz.de/geothermieanlagen-in-bayern/>.

Figure 22 (a) Depth profile N-S of the upper crust in Bavaria; (b) map of the geothermal sites <https://geothermie-allianz.de/geothermieanlagen-in-bayern/>.



Data la bassa pericolosità sismica del bacino davanti al promontorio delle alpi settentrionali, l'utilizzo idrotermale degli acquiferi profondi della Baviera, con tecniche a bassa pressione, viene generalmente considerato non-problematico relativamente all'eventuale generazione di sismicità indotta. Tuttavia, si sono verificati terremoti con $M > 2$ in vicinanza di alcune centrali geotermiche [Keil et al., 2022].

A Unterhaching (U) è stata rilevata microsismicità fino a $M_L 2.4$ (2008) durante i primi anni di esercizio, mentre a Poing (P) si sono verificati varie sequenze con magnitudo massima comprese tra $1.8 \leq M_L \leq 2.1$ a distanza di 5 anni dall'apertura dell'esercizio. Entrambi gli esempi mostrano che anche impianti geotermici con iniezione dell'acqua a bassa pressione (e senza stimolazione a priori) sono capaci di generare terremoti anche in aree con bassa attività sismotettonica.

Possibili cause sono riconducibili agli effetti legati all'iniezione a lungo termine di acqua fredda, all'apertura di fratture esistenti, a variazioni della permeabilità e della velocità di scorrimento.

6. Implicazioni per le aree geotermiche di Larderello-Travale del Monte Amiata

Di seguito vengono sinteticamente assunte alcune implicazioni del monitoraggio da realizzare da parte della SPM nell'ambito del monitoraggio delle centrali geotermiche in Toscana.

La Figura 23 mostra i permessi di ricerca, le istanze per le concessioni e le concessioni attive nelle aree geotermiche toscane. Attualmente, la produzione di energia elettrica viene realizzata esclusivamente da ENEL Greenpower. Le concessioni dove è prevista ulteriore produzione di energia geotermoelettrica si trovano tutte nei dintorni del M. Amiata (Figura 3.1) e sono:

1. Montenero, parte occidentale (Castel del Piano); competenza MATTM.
2. Poggio Montone, parte meridionale (Saragiolo); competenza RT.
3. Le Cascinelle, parte meridionale (Abbadia S. Salvatore/Val di Paglia); competenza RT.

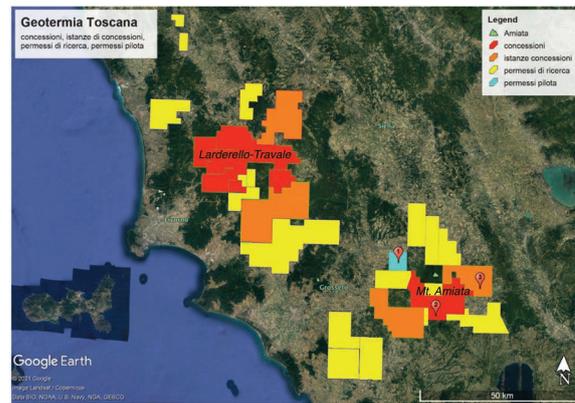


Figura 23 Concessioni, Istanze di Concessioni, Permessi di Ricerca e Permessi per Progetti Pilota per le aree geotermiche toscane di Larderello-Travale e Monte Amiata [Braun et al., 2021].

Figure 23 Concessions, requests for concessions, research permits and permits for pilot projects for the geothermal areas of Larderello-Travale e Monte Amiata [Braun et al., 2021].

Considerando la vicinanza dei permessi, delle istanze e delle concessioni, che sia a Larderello che sull'Amiata mirano a utilizzare un unico serbatoio geotermico, su proposta formulata in Braun et al. [2020], la Regione Toscana ha deciso di centralizzare il monitoraggio e di assegnarlo ad un'unica SPM, l'INGV-CMS. Nell'ambito di un accordo tra Regione Toscana e INGV, Il CMS ha il compito di creare una rete virtuale, composta dalle stazioni dall'INGV e dei dati sismici messi a disposizione dai singoli concessionari. Compito della rete integrata è di rilevare sia la microsismicità ($M_L < 1.5$), che può dare indicazioni importanti sull'eventuale attivazione di faglie, che l'analisi dettagliata di eventi sismici importanti ($M_L > 3.0$ che si verificano periodicamente nelle aree geotermiche di Larderello - Travale e Monte Amiata.

6.1 Larderello - Travale

Senza entrare in dettaglio della sismotettonica dell'area è utile richiamare l'attenzione sull'attività sismica recente.

In data 01-05-2018 05:16:58 (UTC) si è verificato un evento sismico di magnitudo M_w 3.7 nella zona a 3 km NE da Castelnuovo di Val di Cecina (PI). I bollettini INGV e ENEL riportano i seguenti parametri ipocentrali:

Data	Ora	Min.	Sec.	Lat. (°N)	Lon. (°E)	Prof (km)	Magnitudo
05/01/20	05	16	58	43.23	10.93	7 km	M_w 3.7
05/01/20	05	16	58	4.323.72	1.094.82	4.56 km	M_L 3.87

Tabella 2 Parametri ipocentrali del terremoto del 01-Mag-2018 a Castelnuovo di Cecina; M_w = Magnitudo Momento.
Table 2 Hypocentral parameters of the earthquake on 01-Mag-2018 at Castelnuovo di Cecina; M_w = Moment Magnitude.

Per quanto riguarda la sismicità storica dell'area epicentrale delle Colline Metallifere il CPT115 [Rovida et al., 2016] riporta n°7 eventi a partire del 1900 con Magnitudo massima ($M_4.68$) nel 1970. Considerando la geometria delle reti sismiche la profondità calcolata da INGV è probabilmente soggetta a un'incertezza elevata. La profondità più superficiale calcolata da ENEL è più coerente

con le osservazioni macrosismiche e quindi con il livello di risentimento del terremoto nell'area.

Data	Ora	Min.	Sec.	Lat. (°N)	Lon. (°E)	Prof. (km)	I ₀	M _e
03/21/192	7	33	40	43.227	10.871		5-6	4.2
10/19/193	13	29	45	43.166	10.864		4-5	3.9
04/29/194	0	6		43.267	10.879		6	4.6
08/19/197	12	19		43.252	10.788		6	4.6
06/24/199	5	52	31	43.186	10.815	0.5	4-5	3.5
08/06/199	7	51	48	43.291	10.944	2.3	5-6	4.0
05/20/199	11	7	42	43.081	10.81	7.5	4-5	4.1

Tabella 3 Riepilogo degli eventi storici significativi nelle Colline Metallifere (CPTI15 [Rovida et al., 2016]).

Table 3 Summary of the significant historical events in the Metalliferous Hills (CPTI15 [Rovida et al., 2016]).

Rispetto agli eventi sismici recenti, l'evento del 1° maggio 2018 è comparabile con il terremoto del 24 giugno 1990 presente in Tabella 3. I parametri ipocentri riportati da INGV (Tabella 2) si basano sulla rete sismica Nazionale che nell'area geotermica in questione non è molto densa. Ulteriori informazioni su parametri, modellazioni di mappe di scuotimento e osservazioni delle intensità macrosismiche relative a questo evento possono essere consultate sul sito dell'INGV <http://cnt.rm.ingv.it/event/19103491>.

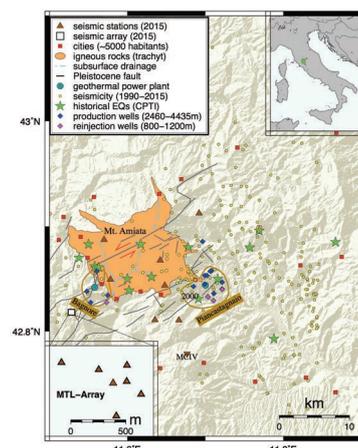
6.2 Monte Amiata

Nell'area del Mt. Amiata è prevista una prossima messa in esercizio di centrali geotermiche realizzate da operatori non-ENEL (segnaposti 1, 2, 3, in Figura 23). Questa futura estensione delle attività richiede un attento monitoraggio di eventuali variazioni dei parametri registrati, come per esempio la sismicità. Come evidente dalla Figura 24 la distribuzione areale della sismicità dal 1982 ad oggi, registrata tramite la rete sismometrica ENEL del M. Amiata, evidenzia una significativa microsismicità, di cui solo il 6.2% degli oltre 3000 sismi registrati supera una magnitudo $M_d > 2$.

La parte orientale del Monte Amiata, la parte alta della Val di Paglia, è interessata da una notevole sismicità fino a Magnitudo $M_L=3.9$, $M_w=4.5$ [Braun et al., 2018b].

Figura 24 Mappa della sismicità registrata nell'area del Monte Amiata (1990 - 2015) [Braun et al., 2016].

Figure 24 Map of the seismicity recorded in the area of Monte Amiata (1990 - 2015) [Braun et al., 2016].



Anche la sismicità storica, che è uno degli indicatori delle faglie attive, risulta significativa nel settore orientale (Val di Paglia) rispetto alla parte occidentale del M. Amiata. La Val di Paglia infatti, geologicamente, ricade all'interno del "Graben di Radicofani" che, per definizione, è una depressione tettonica allungata, generata dall'attività distensiva di faglie che lo delimitano ai bordi (per dettagli vedi Braun et al., [2021]).

Gli eventi più forti ricadono nell'area della Val di Paglia (Tabella 4), dove sono avvenuti almeno tre terremoti (1777, 1919, 1940) con intensità macrosismiche $I_0 \geq VII$, che corrispondono a Magnitudo macrosismiche equivalenti (M_e) comprese tra $M_e = 5$ e $M_e = 5.4$, mentre nell'area Amiatina l'evento più significativo è quello accaduto nel 1926 ($I_0=VII$).

N.	Anno	Mese	Giorno	Ora	Min.	Area epicentrale	Lat. (°)	Lon. (°)	I_0	M_e
261	1509	12	24	21		Val d'Orcia	42.896	11.769	7-8	4.63
324	1545	11	27	2		Val d'Orcia	43.067	11.643	7-8	5.33
847	1777	10	5	15	45	Val di Paglia	42.880	11.757	7	5.14
2237	1919	9	10	16	57	Val di Paglia	42.793	11.788	7-8	5.36
2345	1926	1	8	9	14	Monte Amiata	42.852	11.631	7	4.9
2568	1940	10	16	13	17	Val di Paglia	42.885	11.867	7-8	5.29
2639	1948	11	3	11	40	Monte Amiata	42.861	11.563	6	4.82
2785	1958	5	30	6	26	Val di Paglia	42.896	11.769	5	4.05
3111	1975	4	16	21	23	Monte Amiata	42.850	11.688	5	4.16
3733	1994	2	9	21	49	Val di Paglia	42.804	11.927	4-5	3.55
3831	1997	3	21	16	46	Monte Amiata	42.860	11.696		4.04
4014	2000	4	1	18	8	Monte Amiata	42.831	11.691	6	4.52

Tabella 4 Elenco degli eventi estratti dal CPT115_v3.0 per l'area orientale del M. Amiata. M_e = magnitudo equivalente.
Table 4 List of events extracted from the CPT115_v3.0 for the eastern area of Mt. Amiata. M_e = equivalent magnitude.

L'attività sismica recente, nella quale si ricordano gli eventi sismici di $M=4.3$ nell'area di Castel Giorgio/Torre Alfina [Braun et al., 2018b; Lisi et al., 2019] e $M = 4.0$ a Piancastagnaio del 01/04/2000 [Braun et al., 2018a], danno testimonianza della continua e naturale attività sismotettonica dell'area. Molte delle faglie mappate sia sul M. Amiata che nell'area circostante (Figura 24) sono considerate potenzialmente attive [es. Brogi and Fabbrini, 2009; Brogi et al., 2015; Piccardi et al., 2017].

7. "Lessons learned"

Lo svilupparsi di microsismicità in una distanza significativa dal punto di iniezione può essere un indicatore che la stimolazione stia attivando una faglia. Compito del monitoraggio sismico continuo e in tempo reale, svolto dalla SPM, è di osservare l'evoluzione di tale sismicità sia in fase di stimolazione, sia in fase di operazione e di comunicare l'eventuale superamento di specifiche soglie del rispettivo TLS. Rimane poi una decisione politica di intraprendere le decisioni operative

Né gli ILG [Dialuce et al., 2014], né le LGEO [Terlizzese, 2016] propongono alcun TLS specifico, inteso come schema di comunicazione e/o di intervento per il monitoraggio delle concessioni geotermiche. Le LGEO [Terlizzese, 2016] rimandano al sistema a semaforo generale, proposto negli ILG [Dialuce et al., 2014] per l'applicazione sperimentale nei siti pilota di Minerbio (stoccaggio gas), Cavone (estrazione idrocarburi), Val d'Agri (estrazione idrocarburi e reiniezione acque di strato) e Casaglia (Geotermia). Questa attuale assenza di normativa specifica è anche dovuta al fatto che, con l'eccezione di pochi siti pilota, la maggior parte degli impianti geotermici esistenti e futuri sono di competenza regionale.

Con la prossima apertura del mercato della geotermia e la nuova aggiudicazione delle concessioni, si presenterà presto la situazione dove operatori differenti applicheranno tecnologie differenti (reiniezione parziale o totale), attingendo spesso dagli stessi reservoir geotermici di Larderello-Travale e del Monte Amiata. L'utilizzo di metodologie differenti, applicate in aree adiacenti, con una significativa sismicità di fondo richiede un sistema di monitoraggio avanzato, in grado di localizzare in tempo reale la microsismicità, calcolare i parametri sismici rilevanti e comunicare in tempo quasi-reale i risultati ai concessionari coinvolti, gli uffici competenti e la popolazione.

Dalle esperienze acquisite dal monitoraggio sismico e dalla gestione degli impianti geotermici (vedi §5) è importante distinguere tra:

- i la fase di esplorazione del futuro sito geotermico, spesso caratterizzato da operazioni necessarie per stabilire una connessione idraulica tra il pozzo di iniezione e il pozzo di produzione (stimolazione attraverso iniezioni di fluidi ad alta pressione) e
- ii l'operazione definitiva.

Considerando che i valori di pressione in fase operativa sono più basse rispetto alla fase di stimolazione, dovute all'effetto Kaiser [1950] (§3), il verificarsi di sismicità rimane improbabile finché il volume crostale che contiene il serbatoio geotermico non verrà esposto a dei livelli di *stress* superiori rispetto ai valori di *stress* raggiunti in precedenza (vedi esempi descritti in §5.2).

Un esempio efficace di gestione reattiva (*feedback*) durante la fase di stimolazione è stata applicata nell'esplorazione del sito geotermico OTN-3 ad Otaniemi (§5.6). In quel caso il monitoraggio in tempo reale dell'evoluzione della sismicità ha fornito i parametri necessari per regolare la pressione d'iniezione e quindi la microsismicità risultante, evitando il superamento del livello critico del TLS vigente.

Esempi per accadimenti imprevisti durante la fase di stimolazione che portano a microsismicità incontrollata, sono i seguenti:

- I valori di portata efficaci non vengono raggiunti, quindi vengono realizzati tentativi di stimolazione aumentando la pressione e /o cambiando punto d'iniezione (§5.3, Vendenheim).
- La scomparsa di fluido: l'acqua pompata nel pozzo di iniezione non crea microfratture in direzione del pozzo di ricezione (produzione), ma alimenta altre zone di alta permeabilità (§5.3, Vendenheim; §5.4, Pohang) che causa microsismicità lontana dal punto d'iniezione.
- Eventi straordinari di rischio di *blow-out*: entrata laterale nel pozzo di gas (§5.1, St. Gallen) o acqua (§5.5, Basilea), con la necessità di chiusura (in emergenza *shut-in*) del pozzo. L'aumento di pressione a fondo pozzo, causato dalle operazioni di *shut-in* (per esempio iniezioni di fango baritico) può indurre terremoti importanti ($M > 3$) che portano alla cessazione delle attività e del progetto.

Durante la fase operativa, non possono essere esclusi episodi di sismicità a lungo termine, come per esempio dovuti ad alterazioni geochimiche delle connessioni idrauliche (variazione di

permeabilità) tra iniezione e produzione (vedi §3) [Atkinson, 1984; Marone, 1998]. Prima della definizione di un “Sistema di Comunicazione”, si pongono le seguenti domande generali, che devono essere chiarite da parte degli uffici regionali competenti:

Qual è l’ufficio regionale competente?

Quali istituzioni fanno parte del COMITATO nel caso regionale?

Inoltre, per ogni nuova concessione si pongono le seguenti domande:

Che tipo di Geotermia prevede la nuova centrale (HS, HDR, HWR, DA)?

Quali sono i parametri (P, T) del nuovo esercizio previsto?

Quali sono le faglie attive e capaci nelle vicinanze delle future centrali?

Quali sono le caratteristiche geochimiche (quale è il fluido dominante, composizione della fase gassosa e della fase liquida) dei reservoir atenzionati e nelle vicinanze?

A seguito della costituzione del Comitato, devono essere definiti i seguenti parametri (aggiornati via via con l’aggiunta di ogni nuova concessione e il tipo di esercizio previsto):

- i confini dei domini di monitoraggio (§3.2)
- le soglie di magnitudo, PGA e PGV del sistema a semaforo (§8)
- le faglie attive e capaci nelle vicinanze (§7)

che servono alla SPM come schema di comunicazione dei parametri sismici della sequenza in atto. Come previsto dagli ILG [Dialuce et al., 2014], il tipo di intervento (riduzione, sospensione) viene deciso sulla base dei parametri tecnici comunicati dalla SPM rimane compito dei restanti componenti del COMITATO, in quanto è una decisione politica.

8. Proposta di uno schema di comunicazione per le aree geotermiche toscane, basato sull’analisi della sismicità

In generale, il problema principale non è solamente la definizione dei valori di soglia (*threshold*), utili alla definizione di uno “**Schema di Comunicazione**”, ma anche la definizione delle conseguenze – o meglio – dello “**Schema di Intervento**”. Diventa quindi necessario chiedersi, quali siano le azioni di COMUNICAZIONE e di INTERVENTO (riduzione, sospensione) da applicare, in caso venga superato uno dei livelli di attivazione del sistema a semaforo. Una diminuzione della pressione/portata o addirittura la sospensione dell’iniezione, può avere un effetto immediato sulla sismicità soltanto per processi controllati dalla pressione, o meglio, in caso stimolazione o di operatività EGS (HDR, HWR).

Nel caso di sistemi idrotermali, dove le pressioni operative sono basse, ma è la differenza termica del fluido iniettato nel serbatoio geotermico a causare eventuali tensioni, la riduzione della portata o la sospensione dell’iniezione di acqua non comporta nessun effetto immediato sulla sismicità. Inoltre, a differenza delle centrali per la produzione di energia elettrica, alimentate da combustibili fossili (carbone, olio, gas), i processi attivi nelle centrali geotermiche non possono essere interrotte a richiesta.

Si deve inoltre considerare che uno schema di reazione non può essere generalizzato, in quanto:

- dipende dal tipo di esercizio specifico dell’impianto;
- non è compito della SPM prendere delle decisioni in merito all’esercizio;
- eventuali azioni devono essere concordate con il concessionario.

In quel senso, il presente documento si limita esclusivamente a proporre delle indicazioni relative alla definizione di uno “schema di comunicazione” per le attuali e future concessioni di produzione geotermica in Toscana (nelle aree di Larderello e Monte Amiata).

Intensità strumentale	Accelerazione (g)	Velocità (cm/s)	Percezione	danneggiamento
I	< 0.000464	< 0.0215	impercettibile	Nessuno
II - III	0.000464 - 0.00297	0.135 - 1.41	debole	Nessuno
IV	0.00297 - 0.0276	1.41 - 4.65	leggero	Nessuno
V	0.0276 - 0.115	4.65 - 9.64	moderato	Molto leggero
VI	0.115 - 0.215	9.64 - 20.0	forte	Leggero
VII	0.215 - 0.401	20.0 - 41.4	molto forte	Moderato
VIII	0.401 - 0.747	41.4 - 85.8	rovinosa	Moderato - severo
IX	0.747 - 1.39	85.8 - 178.0	distruttiva	Severo
X+	> 1.39	> 178.0	completamente distruttiva	Molto severo

Tabella 5 Esempio di relazione tra intensità macrosismica, PGV e PGA., tradotto da https://en.wikipedia.org/wiki/Peak_ground_acceleration.

Table 5 Example of a relation between macroseismic intensity, PGV and PGA. https://en.wikipedia.org/wiki/Peak_ground_acceleration.

In conformità con gli ILG e le LGEO lo schema di comunicazione si basa sul calcolo dei parametri (ipocentro, ML, PGV, PGA). Gli obiettivi principali del TLS sono la definizione dei livelli di attivazione e - in caso di superamento - e quali istituzioni devono ricevere quali informazioni. I compiti della SPM sono il calcolo e la comunicazione dei parametri sismici che devono essere stabiliti secondo le soglie del sistema semaforo. Come risultato delle analisi di diversi sistemi a semaforo in vigore in altre concessioni geotermiche, si propone come prima base di discussione il seguente schema (Figura 25). Tale schema si basa su una combinazione tra un TLS in uso a Monaco in Baviera e la norma tedesca DIN4150-3, che non definisce alcuna soglia di magnitudo e si basa esclusivamente su PGV e intensità macrosismica, che può essere poi convertita in PGA, avvalendosi di relazione empiriche come elencato per esempio nella Tabella 5.

Come primo approccio, si propone l'applicazione del TLS a tutti gli eventi sismici registrati dalla SPM nelle vicinanze della centrale geotermica ($r < 5$ km). Le caselle in azzurro indicano i valori dei parametri decisivi che determinano il passaggio al successivo livello.

competenza	Livello	Magnitudo ML	PGV [mm/s]	Intensità EMS-98	PGA [mm/s ²]
concessionario	0 - ordinario	< 1.0	< 0.1	I	< 0.17
	1 - ordinario	1.0 < 2.0	0.1 < 1	I	< 0.17
	2 - attenzione	1.0 < 2.0	0.1 < 1	II - III	0.17 ≤ 1.4
Ufficio Miniere Comitato	3 - attenzione	≥ 2.0	1.1 ≤ 4.9	≥ IV	1.4 ≤ 3.9
	4 - allerta	≥ 2.0	≥ 5.0	> V	3.9 ≤ 9.2
	5 - allerta	≥ 2.0	≥ 5.0	≥ VII	> 9.2

Figura 25 Proposta di uno "schema di comunicazione" da applicare al monitoraggio Geotermia Toscana. **Figure 25** Proposal of a "communication scheme" to be applied to the monitoring of Geothermic in Tuscany.

Lo schema di comunicazione si divide in diversi livelli:

- I livelli 0, 1 e 2 (verde e giallo) comprendono eventi sismici strumentali con Magnitudo $M < 2$ che devono essere comunicati al concessionario.
- I livelli superiori includono tutti gli eventi sismici più forti, sia come Magnitudo, PGV o risentimento, che devono essere comunicati all'ufficio miniere delle Regione (Tabella 1).
- Oltre allo schema "bavarese" si propone (come colore arancione) l'inserimento della DIN4150-3, che indica il verificarsi di eventuali danneggiamenti a strutture.

La SPM avrebbe il compito di effettuare la COMUNICAZIONE secondo il seguente schema:

0/1 - Ordinario segnalazione al Concessionario, eventi non percepiti con $M < 2$; $I_{EM598} = I$; $PGV < 0.17$ mm/s
2 - Attenzione con segnalazione al Concessionario, eventi percepiti con $M < 2$; $I_{EM598} = II-III$; $PGV \geq 1$ mm/s
3 - Attenzione con segnalazione al Comitato/UC, eventi percepiti con $M \geq 2$; $I_{EM598} \geq IV$; $PGV \geq 1.4$ mm/s
4 - Allerta DIN 4150-3 con segnalazione al Comitato/UC, eventi percepiti $M \geq 2$; $I_{EM598} > V$; $PGV > 5$ mm/s
5 - Allerta Rossa con segnalazione al Comitato/UC eventi percepiti $M \geq 2$; $I_{EM598} \geq VII$; $PGV > 9.2$ mm/s

Tale schema può rappresentare la base per lo sviluppo di uno schema di reazione e potrà essere utile per l'implementazione delle future linee guida regionali per il monitoraggio delle attività geotermiche.

Conclusioni

La prossima apertura al mercato libero delle concessioni geotermiche comporterà l'applicazione di nuove tecnologie per la coltivazione della risorsa geotermica, come, per esempio, la reiniezione parziale o totale dei fluidi nel reservoir. Questo significa, per le aree geotermiche di Larderello-Travale e Monte Amiata, che l'utilizzo di metodologie differenti applicate in aree adiacenti. Ciò richiede un sistema di monitoraggio sismico in tempo reale che permetta di calcolare e comunicare tempestivamente agli uffici competenti i parametri sismici rilevanti.

Gli ILG ministeriali [Dialuce et al., 2014; Terlizze, 2016] propongono uno schema sperimentale di allerta e di reazione per il solo caso di reiniezione di fluidi incompressibili nel sottosuolo, che vale implicitamente anche per impianti geotermici di competenza nazionale (progetti pilota). Dal fatto che gli ILG non sono tassativi per le concessioni di competenza regionale nasce l'esigenza di proporre uno "schema di comunicazione".

Esperienze acquisite tramite il monitoraggio sismico degli impianti geotermici in altri paesi hanno insegnato che è importante distinguere tra la fase di esplorazione del futuro sito geotermico, spesso caratterizzato da iniezione di fluidi ad alta pressione (stimolazione), e la gestione definitiva dell'impianto.

Il presente documento propone dei valori di soglia, utili alla definizione di uno "Schema di Comunicazione", senza entrare in merito alla definizione di uno "Schema di Intervento", che al di là è fuori dalle competenze della SPM. Nel caso di superamento delle soglie definite nel TLS sono previsti interventi come la riduzione e/o sospensione delle attività di iniezione dei fluidi con l'obiettivo di ottenere un effetto immediato sulla sismicità. Tali interventi possono

risultare efficaci soltanto per processi controllati dalla pressione (stimolazione) e non nel caso di sistemi geotermici dove è la differenza termica tra serbatoio e fluido iniettato a causare eventuali tensioni.

Lo schema di comunicazione proposto rappresenta una base di partenza per la definizione di un futuro “protocollo di reazione” e potrà essere utile per l’implementazione delle future linee guida regionali per il monitoraggio delle attività geotermiche.

Bibliografia

- Atkinson B.K., (1984). *Subcritical crack growth in geological materials*. J. Geophys. Res.: Solid Earth (1978–2012), 89(B6), pp. 4077–4114. <https://doi.org/10.1029/JB089iB06p04077>
- Bachmann C.E., Wiemer S., Woessner J., and Hainzl S., (2011). *Statistical analysis of the induced Basel 2006 earthquake sequence: introducing a probability-based monitoring approach for Enhanced Geothermal Systems*. Geophys. J. Int., 186(2), pp. 793–807. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05068.x>
- Baisch S., and H.P. Harjes, (2003). *A model for fluid-injection induced seismicity at the KTB, Germany*. Geophys. J. Int., 152, pp. 160–170. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01837.x>
- Bohnhoff M., Malin P., ter Heege J., Deflandre J.P., and Sicking C., (2018). *Suggested best practice for seismic monitoring and characterization of non-conventional reservoirs*. First Break, pp. 59–64. <https://doi:10.3997/1365-2397.n0070>
- Bommer J.J., Oates S., Cepeda J.M., Lindholm C., Bird J., Torres R., Marroquin G., and Rivas J., (2006). *Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project*. Engineering Geology, 83(4), pp. 287–306. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.11.002>
- Bosman K., Baig A., Viegas G., and Urbancic T., (2016). *Towards an improved understanding of induced seismicity associated with hydraulic fracturing*. First Break, 34(7), special topic Passive Seismic 1 ESG Solutions. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.34.7.86051>
- Braun T., Caciagli M., Carapezza M., Famiani D., Gattuso A., Lisi A., Marchetti A., Mele G., Pagliuca N.M., Ranaldi M., Sortino F., Tarchini L., Kriegerowski M., and Cesca S., (2018a). *The seismic sequence of 30th May - 9th June 2016 in the geothermal site of Torre Alfina (Central Italy) and related variations in soil gas emissions*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 359, pp. 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.06.005>
- Braun T., Caciagli M., Errico M., Morelli A., and Zerbinato G., (2021). *Costituzione di un sistema di monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane*. 1° relazione annuale. http://cms.ingv.it/documenti/Report_n3_Toscana_last.pdf.
- Braun T., Cesca S., Kühn D., Martirosian-Janssen A., and Dahm T., (2018b). *Anthropogenic seismicity in Italy and its relation to tectonics: state of the art and perspectives*. Anthropocene, 21, pp. 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2018.02.001>
- Braun T., Dahm T., Krüger, F., Ohrnberger, M., (2016). *Does geothermal exploitation trigger earthquakes in Tuscany?* Eos 97. <https://doi.org/10.1029/2016EO053197>
- Braun T., Danesi S., and Morelli A., (2020). *Application of monitoring guidelines to induced seismicity in Italy*. J. Seismol., 9, pp. 1–91. <https://doi:10.1007/s10950-019-09901-7>
- Braun T., Famiani D., Caciagli M., Cesca S., Heimann S., and Dahm T., (2021). *On the origin of micro-earthquakes in geothermal areas (OMEGA): first results from a seismic experiment at Mt. Amiata (Italy)*. Boll. Geof. Teor. Appl., 62(2), pp. 231–242. <https://doi.org/10.4430/bgta0316>
- Broggi A. and Fabbrini L., (2009). *Extensional and strike-slip tectonics across the Monte Amiata - Monte Cetona transect (northern Apennines, Italy) and seismotectonic implications*. Tectonophysics, 476(1-2), pp. 195–209. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.02.020>
- Broggi A., Capezzuoli E., Liotta D. and Meccherini M., (2015). *The Tuscan Nappe structures in the Monte Amiata geothermal area (central Italy): a review*. Ital. J. Geosci., 134, pp. 219–236. <https://doi.org/10.3301/IJG.2014.55>

- Catalli F., Cocco M., Console R., and Chiaraluce L., (2008). *Modeling seismicity rate changes during the 1997 Umbria-Marche sequence (central Italy) through rate- and state-dependent model*. *J. Geophys. Res.*, 113. <https://doi.org/10.1029/2007JB005356>
- Calò M., Dorbath C., and Frogneux M., (2014). *Injection tests at the EGS reservoir of Soultz-sous-Forêts. Seismic response of the GPK4 stimulations*. *Geothermics*, 52, pp. 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.10.007>
- Dialuce G., Chiarabba C., Di Bucci D., Doglioni C., Gasparini P., Lanari R., Priolo E., and Zollo A., (2014). *Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche*. GdL MISE, Roma. https://unmig.mite.gov.it/wp-content/uploads/2018/07/85_238.pdf
- Diehl T., Kraft T., Kissling E., and Wiemer S., (2017). *The induced earthquake sequence related to the St. Gallen deep geothermal project (Switzerland): Fault reactivation and fluid interactions imaged by microseismicity*. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. <https://doi.org/10.1002/2017JB014473>
- Gibowicz S.J., and Lasocki S., (2001). *Seismicity induced by mining: Ten years later*. *Advances in Geophysics*, 44, pp. 39–181. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(00\)80007-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(00)80007-2)
- Goebel T.H., Brodsky E.E., (2018). *The spatial footprint of injection wells in a global compilation of induced earthquake sequences*. *Science*, 361(6405), 899–904. <https://doi.org/10.1126/science.aat5449>
- Grigoli F., Cesca S., Priolo E., Rinaldi A., Clinton J., Stabile T., Dost B., Garcia-Fernandez M., Wiemer S., Dahm T., (2017). *Current challenges in monitoring, discrimination and management of induced seismicity related to underground industrial activities: a European perspective*. *Rev. Geophys.*, 55, pp. 310–340. <http://dx.doi.org/10.1002/2016RG000542>
- Häring M., Schanz U., Ladner F., and Dyer B.C., (2008). *Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system*. *Geothermics*, 37(5), pp. 469–495. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2008.06.002>
- Hill D.P., and Prejean S.G., (2007). *Dynamic triggering*. *Treatise on Geophysics*, 4, Earthquake Seismology, Schubert G. (Ed.), pp. 257–291. Elsevier, Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00070-5>
- Hirschberg S., Wiemer S., and Burgherr P., (2015). *Energy from the Earth Deep Geothermal as a Resource for the Future? TA-SWISS Study TA/CD 62/2015*, vdf Hochschulverlag AG, Zurich, Switzerland. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010277690>
- Hofmann H., Zimmermann G., Farkas M., Huenges E., Zang A., Leonhardt M., Kwiatek G., Martinez-Garzon P., Bohnhoff M., Min K.-B., Fokker P., Westaway R., Bethmann F., Meier P., Shin Yoon K., Won Choi J., Jong Lee T., and Yeom K., (2019). *First field application of cyclic soft stimulation at the Pohang Enhanced Geothermal System site in Korea*. *Geophys. J. Int.*, 217, pp. 926–949. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz058>
- Husen S., Bachmann C., and Giardini D., (2007). *Locally triggered seismicity in the central Swiss Alps following the large rainfall event of August 2005*. *Geophys. J. Int.*, 171, pp. 1126–1134. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03561.x>
- Kaiser J., (1950). *Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch*. PhD Thesis. Fak. F Maschinenwesen. TH München, Germany.
- Keil S., Wassermann J., and Megies T., (2022). *Estimation of ground motion due to induced seismicity at a geothermal power plant near Munich, Germany, using numerical simulations*. *Geothermics*, 106, 13 pp. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102577>
- Kraft T., Roth P., and Wiemer S., (2020). *Good Practice Guide for Managing Induced Seismicity in Deep Geothermal Energy Projects in Switzerland*. ETH-library, 71 pp. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000453228>
- Kwiatek G., Saarno T., Ader T., Bluemle F., Bohnhoff M., Chendorain M., Dresen G., Heikkinen P., Kukkonen I., Leary P., Leonhardt M., Malin P., Martínez-Garzón P., Passmore K., Passmore P., Valenzuela S., and Wollin C., (2019). *Controlling fluid-induced seismicity during a 6.1-km-deep geothermal stimulation in Finland*. *Sci. Adv.*, 5. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav7224>

- Lisi A., Marchetti A., Frepoli A., Pagliuca N.M., Mele G., Carapezza M.L., Caciagli M., Famiani D., Gattuso A., and Braun T., (2019). *Microseismicity analysis in the geothermal area of Torre Alfina, Central Italy*. *J. Seismology*, 23, pp. 1279-1298. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09865-8>
- Marone C., (1998). *Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting*. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26(1), pp. 643-696. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.26.1.643>
- McGarr A., (2014). *Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, pp. 1008-1019. <https://doi.org/10.1002/2013JB010597>
- Megies T., and Wassermann J., (2014). *Microseismicity observed at a non-pressure stimulated geothermal power plant*. *Geothermics*, 52, pp. 36-49. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.01.002>
- Moeck I.S., (2014). *Catalog of geothermal play types based on geologic controls*. *Renew. Sust. Energy Rev.*, 37, pp. 867-882. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.032>
- Murphy H.D., (1978). *Thermal stress cracking and the enhancement of heat extraction from fractured geothermal reservoirs*. Los Alamos National Laboratory Report LA-7235-MS, Los Alamos, New Mexico USA.
- Piccardi L., Vittori E., Blumetti A.M., Comerci V., Di Manna P., Guerrieri L., Baglione M., and D'Intinosante V., (2017). *Mapping capable faulting hazard in a moderate-seismicity, high heat-flow environment: the Tuscia Province (southern Tuscany - northern Latium, Italy)*. *Quat. Int.*, 451, pp. 11-36. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.07.018>
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds), (2016). *CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes*. National Institute of Geophysics and Volcanology. <http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15>
- Rubinstein J.L., and Mahani A. B., (2015). *Myths and Facts on Wastewater Injection, Hydraulic Fracturing, Enhanced Oil Recovery, and Induced Seismicity*. *Seismol. Res. Lett.* 86(4), pp. 1060-1067. <https://doi.org/10.1785/0220150067>
- Schmittbuhl J., Lambotte S., Lengliné O., Grunberg M., Jund H., Vergne J., Cornet F., Doubre C., and Masson F., (2019). *Induced and triggered seismicity below the city of Strasbourg, France from November 2019 to January 2021*. *Comptes Rendus Géoscience*. 353, pp. 561-584. *Sciences de la Planète. Special Issue: Seismicity in France*. <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/geoscience/articles/10.5802/crgeos.71/>
- Segall P., (1989). *Earthquakes triggered by fluid extraction*. *Geology*, 17(10), pp. 942-946. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017<0942:ETBFE>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017<0942:ETBFE>2.3.CO;2)
- Terlizzese F., (2016). *Linee guida per l'utilizzazione della risorsa geotermica a media e alta entalpia*. GdL MISE, Roma. http://www.cngeologi.it/wp-content/uploads/2016/10/Linee_guida_geotermia.pdf
- Vergne J., and Schmittbuhl J., (2019). *Bilan et futur du LabEx G-Eau-Thermie profonde*. RST RESIF - Biarritz -13 novembre 2019. https://rst-resif-19.sciencesconf.org/data/pages/Vergne_geothermie.pdf
- Wiemer S., (2018). *Umgang mit induzierter Seismizität in der Schweiz*. Vortrag SED an der ETH Zürich, 26. Juni 2018.
- Zingg O and Meier P., (2019). *Zusammenfassung der Untersuchungen zum Erdbeben vom November 2017 in Pohang, Südkorea, und der Auswirkungen auf das Geothermieprojekt Haute-Sorne*. Geo Energie Suisse.
- Zoback M.D., (2012). *Managing the seismic risk posed by waste water disposal*. *EARTH Magazine* 57(38). <https://www.earthmagazine.org/article/managing-seismic-risk-posed-wastewater-disposal/>

Glossario

Bundesberggesetz BBergG) §120: Legge Nazionale Miniere.

Einwirkungsbereich: confinamento spaziale/dell'Area di Influenza.

EinwirkungsbereichBergV: Legge per definizione dell'Area di Influenza.

Bergschadensvermutung: assunzione di causa del danno da parte dell'industria mineraria associata.

Bergbehörde: Bergbehörde: l'Ufficio Miniere Regionale ⇒ l'Ufficio (Regionale) Competente.

Fachstelle: ente esperto ⇒ Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM).

Bergbaubetrieb: concessionario.

Anscheinsbeweis: l'industria che deve dimostrare di non aver causato il terremoto.

Meldepflichtiges Ereignis: evento sismico con obbligo di segnalazione.

AI - Area di Influenza.

EGS - Enhanced Geothermal System.

HDR - Hot Dry Rock.

HFR - Hot Fractured Rock.

HWR - Hot Wet Rock.

ILG - Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo, e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche.

LGEO - Linee Guida per l'utilizzazione della risorsa geotermica a media ed alta entalpia.

MASE - Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica.

MISE - Ministero dello Sviluppo Economico.

MITE - Ministero per la Transizione Ecologica.

MATTM - Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.

ORC - Organic Rankine Cycle.

PRI - Pozzo di Reiniezione.

RT - Regione Toscana.

SPM - Struttura Preposta al Monitoraggio.

QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

<https://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/quaderni-di-geofisica.html/>

I QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) accolgono lavori, sia in italiano che in inglese, che diano particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari che necessitano di rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. Per questo scopo la pubblicazione on-line è particolarmente utile e fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi. I QUADERNI DI GEOFISICA sono presenti in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics, e in "Open Access Journals" di Scopus.

QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) welcome contributions, in Italian and/or in English, with special emphasis on preliminary elaborations of data, measures, and observations that need rapid and widespread diffusion in the scientific community. The on-line publication is particularly useful for this purpose, and a multidisciplinary Editorial Board with an accurate peer-review process provides the quality standard for the publication of the manuscripts. QUADERNI DI GEOFISICA are present in "Emerging Sources Citation Index" of Clarivate Analytics, and in "Open Access Journals" of Scopus.

RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

<https://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/rapporti-tecnici-ingv.html/>

I RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico come manuali, software, applicazioni ed innovazioni di strumentazioni, tecniche di raccolta dati di rilevante interesse tecnico-scientifico. I RAPPORTI TECNICI INGV sono pubblicati esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) publish technological contributions (in Italian and/or in English) such as manuals, software, applications and implementations of instruments, and techniques of data collection. RAPPORTI TECNICI INGV are published online to guarantee celerity of diffusion and a prompt access to published data. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

https://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favorisce la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV. In particolare, MISCELLANEA INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli, ecc. La pubblicazione è esclusivamente on-line, completamente gratuita e garantisce tempi rapidi e grande diffusione sul web. L'Editorial Board INGV, grazie al suo carattere multidisciplinare, assicura i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi sottomessi.

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favours the publication of scientific contributions regarding the main activities carried out at INGV. In particular, MISCELLANEA INGV gathers reports of scientific projects, proceedings of meetings, manuals, relevant monographs, collections of articles etc. The journal is published online to guarantee celerity of diffusion on the internet. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

Coordinamento editoriale

Francesca DI STEFANO
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Progetto grafico

Barbara ANGIONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Impaginazione

Barbara ANGIONI
Patrizia PANTANI
Massimiliano CASCONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

©2023

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma
tel. +39 06518601

www.ingv.it



Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

