

Accordo di Collaborazione Scientifica
Regione Toscana, INGV

Costituzione di un sistema di monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane

Responsabile di Progetto: Thomas Braun

Autori: T. Braun, M. Caciagli, M. Errico, D. Famiani, A. Govoni, R. Maffucci e G. Zerbinato

Redazione: M. Errico



2023/1



In copertina: Centrale geotermica Bagnore IV. Braun, et al., (2016), Eos, 97,
doi:10.1029/2016E0053197.

1	INTRODUZIONE	6
1.1	CRONISTORIA ATTIVITÀ	6
1.2	CONDIVISIONE DATI CONCESSIONARIO EGP	8
2	WP2: PIANIFICAZIONE E REALIZZAZIONE RETE SISMICA	10
2.1	CONDIVISIONE DI STAZIONI SISMICHE DA PARTE DI EGP	10
2.2	STAZIONI SISMICHE INGV	11
3	WP3: ACQUISIZIONE DATI SISMICI	14
3.1	ACQUISIZIONE IN TEMPO REALE DEI SEGNALI SISMICI PRESSO IL CMS DI BOLOGNA	14
3.2	CONTROLLO E VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DEI DATI	15
3.3	ARCHIVIAZIONE DATI SISMICI PRESSO IL CMS DI BOLOGNA	20
3.4	INTEGRAZIONI DI STAZIONI IV E TRASMISSIONE A CAD-BO	21
3.5	INTEGRAZIONI STAZIONI EGP E TRASMISSIONE A CAD-BO	22
4	WP4: MONITORAGGIO E ANALISI DATI	26
4.1	ANALISI DATI SISMICI DI DETTAGLIO, MONITORAGGIO SECONDO ILG	27
4.2	ORGANIZZAZIONE DEI TURNI DI MONITORAGGIO/REPERIBILITÀ.	30
4.3	BOLLETTINO SISMICO	31
5	WP5: DISSEMINAZIONE/DIVULGAZIONE RISULTATI	34
6	ESEMPI NEL MONDO DI SISMICITÀ INDOTTA DALLA PRODUZIONE GEOTERMICA	36
6.1	LE RISORSE GEOTERMICHE	37
6.2	MECCANISMI CHE CAUSANO SISMICITÀ INDOTTA	41
6.3	INDIRIZZI E LINEE GUIDA ILG, DEFINITI DAL MISE (ATTUALMENTE MASE)	46
6.3.1	Definizione e compiti del Comitato	46
6.3.2	Definizione del sistema a semaforo (TLS)	48
6.4	REGOLAMENTI IN ALTRI PAESI	51
6.4.1	Regolamento Germania	51
6.4.2	Regolamento Svizzera	53
6.5	ESEMPI DI SISMICITÀ INDOTTA LEGATI ALLA PRODUZIONE GEOTERMICA	55
6.5.1	St. Gallen (CH) – 20/07/2013	55
6.5.2	Landau, Insheim, Bruchsal (D), Soultz-sous-forêts, Rittershofen, Illkirch (F)	56
6.5.3	Vendenheim (F) 26/06/2021 ML3.9	58
6.5.4	Pohang (CR) 15/11/2017 Mw5.4	59
6.5.5	Basilea (CH) 2006	61
6.5.6	ESPOO-Otaniemi (SF) Giugno/Luglio 2018	62
6.5.7	Geotermia profonda, Monaco/Baviera (D) 2017	65
7	CONSIDERAZIONI E PROPOSTE DI MONITORAGGIO SISMICO	67
7.1	IMPLICAZIONI PER LE AREE GEOTERMICHE DI LARDERELLO-TRAVALE DEL MONTE AMIATA	67
7.1.1	Larderello - Travale	68
7.1.2	Monte Amiata	69
7.2	“LESSONS LEARNED”	71
7.3	PROPOSTA DI UNO SCHEMA DI COMUNICAZIONE PER LE AREE GEOTERMICHE TOSCANE, BASATO SULL’ANALISI DELLA SISMICITÀ	73
8	CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI	76
8.1	CONCLUSIONI	76
8.2	ATTIVITÀ DI RICERCA FINALIZZATA AL MONITORAGGIO	77
8.3	OUTLOOK	80
	GLOSSARIO	82
		3

BIBLIOGRAFIA	84
ELENCO DELLE FIGURE	88
ELENCO DELLE TABELLE	90

Accordo di Collaborazione Scientifica tra Regione Toscana e Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Costituzione di un sistema di monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane

Relazione tecnica finale (Relazione n.5)

Thomas Braun^{1,2}, Marco Caciagli^{1,3}, Maddalena Errico³, Daniela Famiani², Aladino Govoni⁴, Roberta Maffucci², Giampaolo Zerbinato³

¹ INGV, Osservatorio Sismologico Arezzo Italia;

² INGV, Sezione di Roma 1, Italia;

³ INGV, Sezione di Bologna, Italia;

⁴ INGV, Osservatorio Nazionale Terremoti, Roma, Italia.

23/06/2023

1 Introduzione

1.1 Cronistoria attività

In data 01/07/2018 ha avuto inizio un accordo di collaborazione scientifica con i seguenti obiettivi:

- valutazione delle attuali procedure implementate da *Enel Green Power* per il monitoraggio microsismico delle aree geotermiche;
- validazione da parte dell'INGV dei dati acquisiti dalla rete microsismica *Enel Green Power*;
- individuazione, di concerto con *Enel Green Power*, di eventuali azioni migliorative;
- validazione dei bollettini sismici prodotti e forniti da *Enel Green Power*.

I risultati delle attività svolte sono state pubblicate in INGV (2018a, 2018b, 2019, 2021).

In data 01/07/2020 ha avuto inizio un Accordo di Collaborazione Scientifica (ACS) tra la Regione Toscana (RT) e l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) con il titolo "*Costituzione di un sistema di monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane*", che nasce dalle attività svolte nell'ambito del precedente accordo, con il titolo: "*Supporto scientifico per la valutazione del monitoraggio sismico operato dalle reti di Enel Green Power nelle aree geotermiche di Larderello-Travale ed Amiata*" (INGV, 2018-2021). L'art. 2, comma 2, del presente accordo prevede un Programma delle attività, suddiviso nei seguenti obiettivi:

- attività propedeutiche alla costituzione della rete sismica (definizione dei domini di monitoraggio, schema di scenari di rete sismica integrata, simulazione di capacità di detezione, ricerca siti nelle aree geotermiche toscane di Larderello e del Monte Amiata);
- definizione di protocolli omogenei di definizione e condivisione dei dati sismici provenienti dai differenti concessionari e relativa valutazione della qualità del dato;
- acquisizione in tempo reale dei segnali sismici presso i laboratori del Centro di Monitoraggio Sismico dell'INGV di Bologna e condivisione con la Regione Toscana dei dati sismici;
- monitoraggio e analisi dati: analisi dati sismici di dettaglio, monitoraggio secondo le ILG (calcolo Localizzazione PGV, ML), reperibilità, compilazione report scientifico in caso di evento significativo nelle aree monitorate;
- coordinamento delle attività di installazione delle stazioni sismiche finanziate dai Concessionari ed eventuale installazione di postazioni sismiche integrative;
- supporto tecnico-scientifico alla Regione Toscana, nell'ambito dei processi decisionali connessi con le attività di monitoraggio sismico.

In data 24/07/2020 l'INGV ha trasmesso alla RT il 1° rapporto, chiamato "Relazione di Inizio Attività" che illustra in dettaglio lo stato di fatto e il cronoprogramma delle attività (CMS, 2020a).

In data 30/11/2020 l'INGV ha trasmesso alla RT il 2° rapporto, chiamato "Relazione Tecnica Intermedia" relativa alla verifica sia della conclusione delle attività propedeutiche sia dello stato di avanzamento inerente la messa in funzione della rete di monitoraggio sismico (CMS, 2020b).

In data 30/06/2021 l'INGV ha trasmesso alla RT il 3° rapporto chiamato "Prima relazione tecnica annuale" relativa alla descrizione dell'avanzamento delle attività riportate (CMS, 2021).

In data 30/06/2022 l'INGV ha trasmesso alla RT il 4° rapporto, chiamato "Seconda relazione tecnica annuale" (CMS, 2022).

Il presente 5° rapporto, denominato "Relazione tecnica finale", riassume tutte le attività previste e svolte nell'ambito dell'ACS (art. 2, com. 2). Dopo un riassunto sintetico sulla condivisione dei dati del concessionario EGP, segue un capitolo che descrive l'aggiornamento sulla realizzazione della rete sismica integrata, composta (i) da stazioni sismiche della RSN dell'INGV, (ii) dell'array sismico MALA installato nei pressi di Montalcino e (iii) delle stazioni appartenenti alla rete sismica di EGP. Il terzo capitolo descrive le procedure attivate presso il Centro di Acquisizione Dati del CMS con sede a Bologna, riguardo all'acquisizione in tempo reale, al controllo qualità e all'archiviazione dei dati sismici, seguito da un report sintetico sull'analisi e il monitoraggio dell'ultimo semestre. Il quinto paragrafo riassume le attività di divulgazione e disseminazione delle informazioni inerenti al monitoraggio sismico delle aree geotermiche toscane. In previsione della futura necessità di applicare uno schema di comunicazione da parte della SPM al monitoraggio il sesto capitolo riassume le esperienze raccolte nella gestione di impianti geotermici in altri Paesi, seguito da una proposta concreta per le aree geotermiche toscane (§7). I capitoli §6 e §7 sono stati pubblicati in Braun et al. (2023)

L'ultimo paragrafo riporta le conclusioni, le future attività di ricerca e una prospettiva per la prosecuzione dell'ACS tra Regione Toscana e INGV.

Pianificazione progetto: "Rete Integrata di Monitoraggio Sismico della Toscana"



Figura 1.1. Pianificazione temporale delle attività previste nei singoli WP.

1.2 Condivisione dati concessionario EGP

Uno degli obiettivi principali del presente accordo di collaborazione scientifica tra Regione Toscana e INGV è la realizzazione nelle aree geotermiche toscane di un monitoraggio sismico integrato che si basa sulla trasmissione in tempo reale dei dati provenienti (i) dalla rete sismica nazionale dell'INGV, (ii) dal maggior numero possibile delle stazioni sismiche rese disponibili dagli operatori geotermici, (iii) dalle stazioni aggiuntive acquistate e installate nell'ambito del presente accordo di collaborazione scientifica tra Regione Toscana e INGV.

Per un confronto tra l'attività sismica registrata e le operazioni di coltivazione di energia geotermica, nell'ambito di un Protocollo d'Intesa tra Regione Toscana (RT) ed *ENEL Green Power Italia S.r.l.* (EGP) è stato concordato di trasmettere i dati di produzione alla RT, che ha il permesso di condividere tali dati in maniera confidenziale con la SPM. Come ente terzo, la SPM (INGV) garantisce l'uso di dati esclusivamente ai fini del monitoraggio sismico senza condividerli pubblicamente o con altri soggetti.

Nelle date 08/11/2022, 13/12/2022 e 14/04/2023 si sono tenute delle riunioni RT - EGP - INGV per la definizione delle modalità di condivisione dei dati sismici e di produzione per le aree geotermiche toscane:

- (i) Per quanto riguarda la trasmissione dei dati sismici, sono state discusse le modalità di trasferimento in ottica di *cyber security*, è stato proposto di valutare l'uso di una VPN dedicata (vedi §3.5) ed è stato concordato di completare i test di trasmissione entro giugno 2023, con l'obiettivo di far partire il monitoraggio sismico regolare a luglio del 2023, con l'inizio della proroga della convenzione.
- (ii) Relativa alla condivisione dei dati di produzione e dei volumi di vapore prodotti viene concordato di trasmettere i valori di questi dati almeno a cadenza giornaliera.

A partire da gennaio 2023 è iniziata da parte di EGP la regolare e periodica trasmissione dei dati confidenziali di produzione, che consistono in: (i) valori complessivi di liquido estratto e reiniettato (in metri cubi), separato per pozzo, a cadenza mensile e (ii) consumo del Vapore (in tonnellate) per ogni centrale geotermica, a cadenza giornaliera.

2 WP2: pianificazione e realizzazione rete sismica

Il “Centro di Monitoraggio delle attività di Sottosuolo” (CMS) è la struttura dell’INGV che ha le mansioni di raccolta, analisi, interpretazione e modellazione di dati relativi alle aree del territorio nazionale interessate da attività antropiche di sfruttamento di Georisorse. A partire dal 2020, nell’ambito di un “Accordo di Collaborazione” con la Regione Toscana, il CMS svolge l’incarico di monitorare gli impianti di produzione di energia geotermica in Toscana. L’attuale accordo (2020 - 2023) ha l’obiettivo di acquisire presso il Centro di Acquisizione Dati del CMS (INGV di Bologna) i segnali sismici in tempo reale provenienti dalle stazioni sismiche disponibili nell’area. Tali stazioni appartengono sia alla RSN dell’INGV sia alle stazioni condivise da parte dei concessionari.

2.1 Condivisione di stazioni sismiche da parte di EGP

In Italia, le attuali concessioni per l’utilizzo delle risorse geotermiche scadranno nel 2024. Alla prossima aggiudicazione parteciperanno - oltre *ENEL Green Power* anche soggetti del mercato libero, che potrebbero voler applicare nuove tecnologie, attingendo ai medesimi *reservoir* geotermici dei campi di Larderello-Travale e del Monte Amiata. Attualmente, l’unico concessionario produttivo nelle aree geotermiche toscane è EGP.

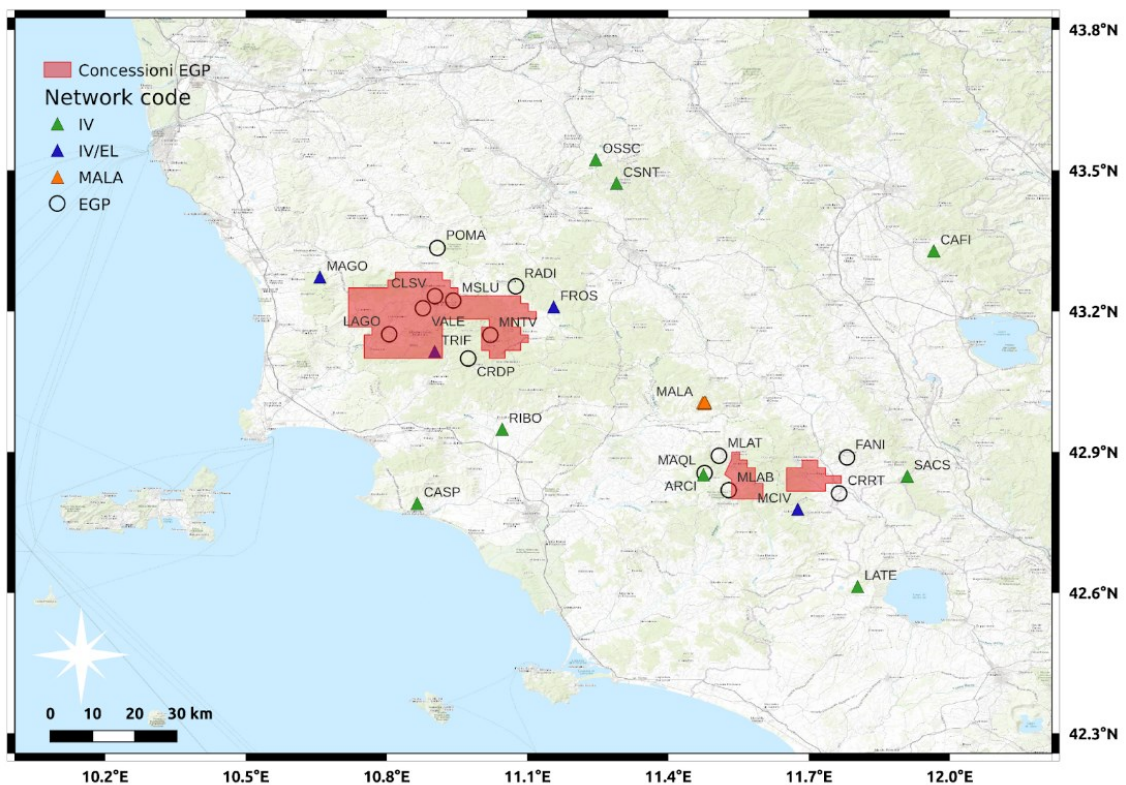


Figura 2.1. Stazioni sismiche della prima configurazione della rete sismica integrata.

In accordo con la RT, l'INGV ha comunicato a EGP l'elenco delle stazioni sismiche per le quali trasmettere i dati in tempo reale al CMS. Tali stazioni sono sostanzialmente quelle equipaggiate con sismometri a tre componenti, come previsto dagli ILG. Come sottolineato nell'ultima relazione (Braun et al., 2022), non è da escludere che nel futuro seguiranno ulteriori richieste di integrazioni. Come riportato nell'ultima relazione (Braun et al., 2022) le stazioni sismiche messe a disposizione da EGP per la trasmissione dei dati in tempo reale (formato MSEED protocollo *seedlink*, *SeedManual*, 2012) sono (Figura 2.1):

- per LARDERELLO (8/26 stazioni): CLSV, CRDP, LAGO, VALE, MNTV, MSLU, POMA, RADI;
- per il Mt. AMIATA (5/16 stazioni): FANI, CRRT, MAQL, MLAB, MLAT;

La Figura 2.1 mostra le stazioni che costituiscono la prima configurazione della rete sismica integrata nell'area tra Larderello-Travale e Monte Amiata:

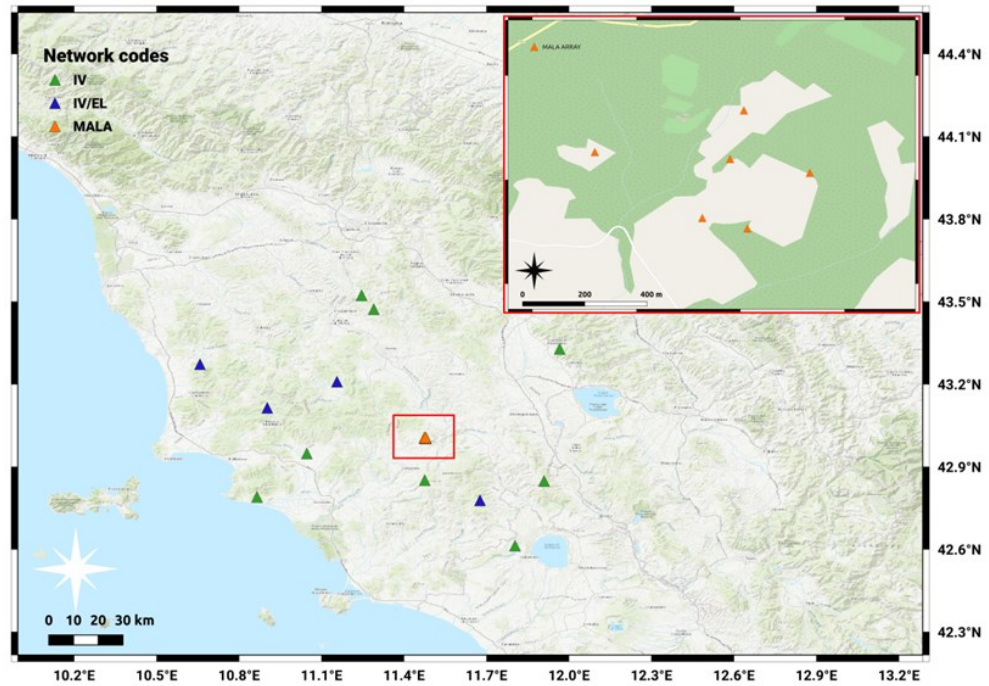
- cerchi: stazioni EGP a 3 componenti;
- triangoli verdi: stazioni IV (RSN) trasmesse in tempo reale alla sala sismica a Roma;
- triangoli blu: stazioni IV e EGP condivise trasmesse in tempo reale alla sala sismica a Roma (integrate nella RSN);
- triangolo arancione: MALA (Montalcino Amiata Larderello Array), installato nell'ambito dell'attuale ACS (vedi §2.2).

2.2 Stazioni sismiche INGV

Come già accennato nella precedente relazione (Braun et al., 2022), la necessità di registrare eventi sismici anche di bassa magnitudo impone un'adeguata distribuzione spaziale delle stazioni della rete di monitoraggio. Con l'obiettivo di potenziare la capacità di detezione nelle aree Larderello-Travale e Monte Amiata, in maggio 2022 si è conclusa l'installazione dell'array MALA in una zona limitrofa a Montalcino (SI).

La scelta del sito soddisfa diverse necessità. Prima fra tutte quella di coprire un'area prima sprovvista di strumenti sismici e poi la ricerca di un sito lontano da fonti di rumore. L'area infatti si trova in una zona rurale, lontana da strade ad alto flusso di mezzi e le installazioni sono state realizzate all'interno di un vitigno privato e recintato. Inoltre, come descritto nei precedenti rapporti (RT 2021/1, paragrafo 5.2 e RT 2022/1 paragrafo 2.2.2) il sito scelto risulta avere le caratteristiche geologiche idonee (presenza di substrato litoide affiorante) per garantire un buon rapporto segnale/rumore.

Figura 2.2. Stazioni della prima configurazione della rete sismica integrata. Il triangolo arancione indica la posizione di MALA installato nei pressi di Montalcino; il rettangolo rosso illustra un ingrandimento dell'array.



L'attuale dotazione strumentale delle stazioni dell'array sismico MALA è preliminare e consiste in strumentazione di proprietà INGV, resa disponibile per la fase test dell'array: acquisitori modello GAIA-2 e sismometri triassiali a breve periodo (1 Hz) modello Mark L4C, con temporizzazione GPS, alimentazione a batteria/pannello solare e trasmissione dei dati in tempo reale via WIFI/LTE.

Stazione1	Stazione2	Distanza (km)
MALA1	MALA2	0.11
MALA4	MALA5	0.16
MALA3	MALA4	0.19
MALA1	MALA4	0.2
MALA2	MALA4	0.23
MALA2	MALA3	0.23
MALA3	MALA5	0.25
MALA1	MALA3	0.29
MALA0	MALA4	0.32
MALA0	MALA1	0.33
MALA1	MALA5	0.36
MALA0	MALA5	0.37
MALA2	MALA5	0.38
MALA0	MALA2	0.43
MALA0	MALA3	0.51

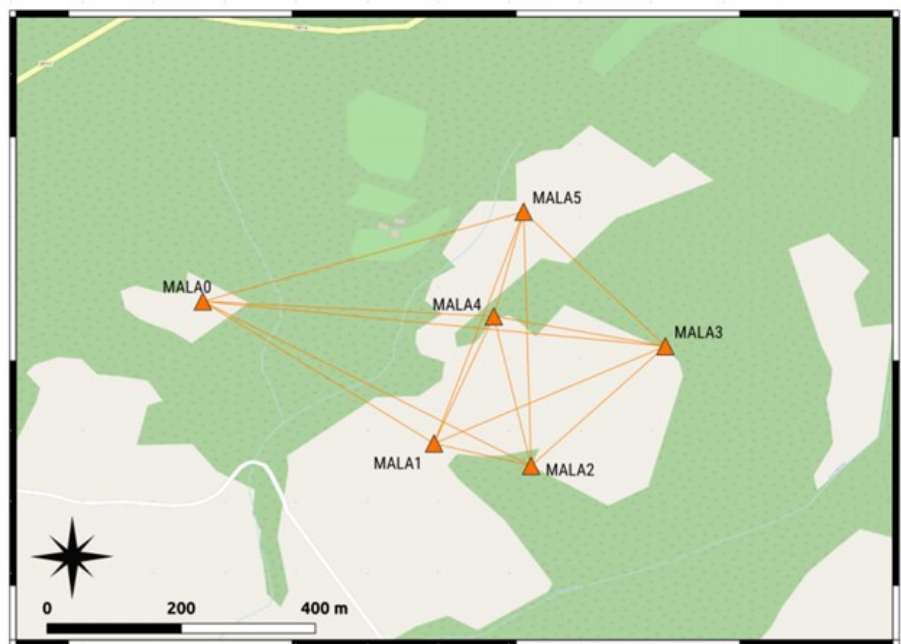


Figura 2.3. Configurazione dell'array MALA.

Come previsto dall'attuale ACS, a seguito di un periodo di test, è prevista la sostituzione della strumentazione con (i) 6 sismometri a banda estesa (modello Lennartz Le3D-5s, già disponibile), (ii) una stazione a larga banda (Trillium Horizon (120s) e (iii) digitalizzatori a 24 bit (modello Nanometrics Centaur). I componenti di *hardware* di cui (ii) e (iii) sono stati ordinati e verranno installati, appena consegnato l'ordine.

Gli obiettivi posti nel WP2 del presente ACS possono essere considerati conclusi.

3 WP3: Acquisizione dati sismici

3.1 Acquisizione in tempo reale dei segnali sismici presso il CMS di Bologna

Il dato sismologico viene acquisito mediante uno schema ridondante di due macchine, presso il *data center* TIER1 (<https://www.cnaf.infn.it/wlwg-tier-1-data-center/>) dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), e mediante un sistema di *disaster recovery* sito presso il CED della Sezione INGV di Roma, per un totale di 5 macchine, così distribuite: presso TIER1 il CMS ha predisposto 4 macchine virtuali, divise in 2 coppie. Entrambe le coppie sono identiche e sono costituite da una macchina che si occupa di acquisire il dato sismologico. Mentre il compito della seconda macchina è il processamento dei dati in tempo reale. Mediante questa macchina, il CMS effettuerà la revisione delle localizzazioni per mezzo dell'operatore umano. La seconda coppia di macchine serve come riserva nel caso di malfunzionamento o blocco programmato per la manutenzione alla prima coppia. A queste si aggiunge la macchina di *disaster recovery* situata presso la sede INGV di Roma, la quale unisce in un unico apparato i compiti di acquisizione e processamento del dato sismologico. Questa macchina viene usata nel caso si verifichi l'impossibilità a connettersi alle macchine situate presso TIER1, o per un malfunzionamento congiunto delle stesse. La macchina di *disaster recovery* viene tenuta pronta e regolarmente mantenuta dal personale del CMS.

Quanto sopra descritto viene implementato mediante i seguenti componenti *hardware* e *software*:

La parte *hardware* consta di due server fisici con cpu Intel Xeon a 80 core con *hyperthreading*, e 4 TB di RAM ciascuno. Le 4 macchine sopra elencate sono equipaggiate con 8 core, 20 GB di ram e acquisiscono e processano i dati mediante il *software* SeisComP con gestore del dato sismologico *Caps*. L'intero sistema è caratterizzato da:

- n. 2 *Server multiblade* Supermicro;
- n.1 *storage array* Dell costituito da:
 - n. 2 *controller*;
 - n. 2 *power supplies*;
 - n. 2 10GBASE-T con connettività RJ45 per controller;
 - n. 16 hdd da 8TB ciascuno;
 - compatibilità *Free/Libre e Open Source Software*; *Storage Array* SCv3000 Dell;
 - continuità Operativa assicurata da assistenza 5dx8h;

- ridondanza;
- sostenibilità ambientale, efficienza energetica, costo di smaltimento e riciclaggio garantiti da un approccio *Green Computing*.

La parte *software* è composta dal pacchetto SeisComP, che svolge le funzioni di:

- acquisizione dei datastream dei segnali sismici in tempo reale;
- analisi automatica di dati (parametri ipocentrali, Magnitudo) in tempo quasi reale;
- rielaborazione manuale: revisione parametri, calcolo meccanismo focale, PGV, PGA;
- reportistica.

Questo software è distribuito su licenza e supportato da contratto di assistenza casa costruttrice.

3.2 Controllo e valutazione della qualità dei dati

Come accennato in parte nel paragrafo 2.2, la capacità di una rete sismica di rilevare terremoti anche di bassa magnitudo dipende dal numero di stazioni operative, dalla configurazione della rete (la distribuzione spaziale delle stazioni) e dalle caratteristiche tecniche degli strumenti.

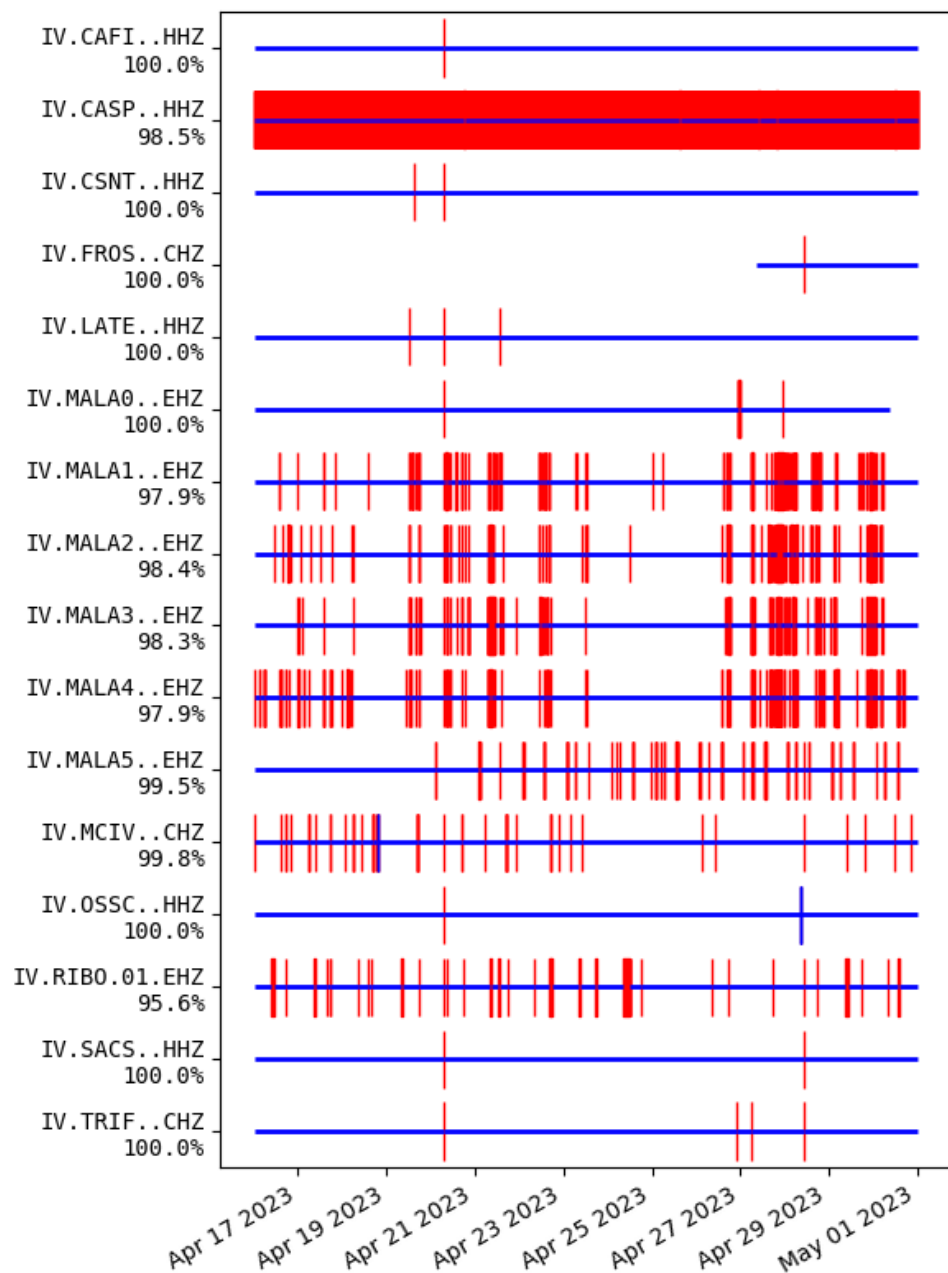
Al fine di garantire un monitoraggio costante dell'area, viene in primo luogo controllato che le stazioni acquisiscano in maniera costante. Di seguito, Figura 3.1, viene mostrato un esempio di come viene monitorata la disponibilità dei dati acquisiti in tempo reale delle stazioni sismiche che compongono la rete di monitoraggio per la geotermia toscana (linea orizzontale blu). La figura riporta la disponibilità dei dati nell'intervallo di tempo dal 16 al 30 aprile 2023. Le barre verticali indicano, se rosse interruzioni nei dati, se blu sovrapposizione dei dati.

Per ottenere localizzazioni affidabili l'acquisizione oltre che costante deve essere di buona qualità.

Viene periodicamente calcolata la densità spettrale di potenza probabilistica (PPSD - *Probabilistic Power Spectral Density*) per le stazioni che compongono la rete, al fine di valutare il livello assoluto dell'energia sismica per periodo (s) e sorvegliare il valore di rumore sismico e temporanei possibili malfunzionamenti dei sensori. A titolo di esempio, le figure seguenti riportano i plot delle PPSD ottenute dai dati delle stazioni delle reti IV, IV/EL di EGP (array MALA Figura 3.2) per 15 giorni di rumore sismico registrato dalle tre componenti (Z-verticale, N-S, E-W) nello stesso intervallo di tempo della Figura 3.1 (dal 16 al 30 aprile 2023). Le figure 3.2 - 3.4 rappresentano una stazione per ogni riga, mentre ogni colonna rappresenta una componente E-W(sx), N-

S(centro), Verticale (dx). Le curve in grigio rappresentano rispettivamente il massimo (NHNM - *New High Noise Model*) e minimo (NLNM - *New Low Noise Model*) livello di rumorosità sismica di fondo, secondo Peterson (1993). Si possono osservare delle fluttuazioni delle diverse curve al di sotto di 1s di periodo per alcune stazioni (MALA3, LATE, MCIV e RIBO) dovute probabilmente ad attività antropica delle ore diurne, a parte per MALA3 che tali fluttuazioni potrebbero essere dovute a qualche disturbo di carattere strumentale. Per l'intervallo sopra 1s le fluttuazioni dipendono dal rumore naturale, in alcune stazioni tali fluttuazioni sono dovute alla minore sensibilità in quel *range* di frequenza (stazioni *short period*). Nell'insieme le figure mostrano che per le alte frequenze il rumore sismico rimane sotto del NHNM per quasi ogni stazione.

Figura 3.1. Esempio di grafico per il controllo del funzionamento delle singole stazioni IV della prima configurazione della rete sismica integrata.



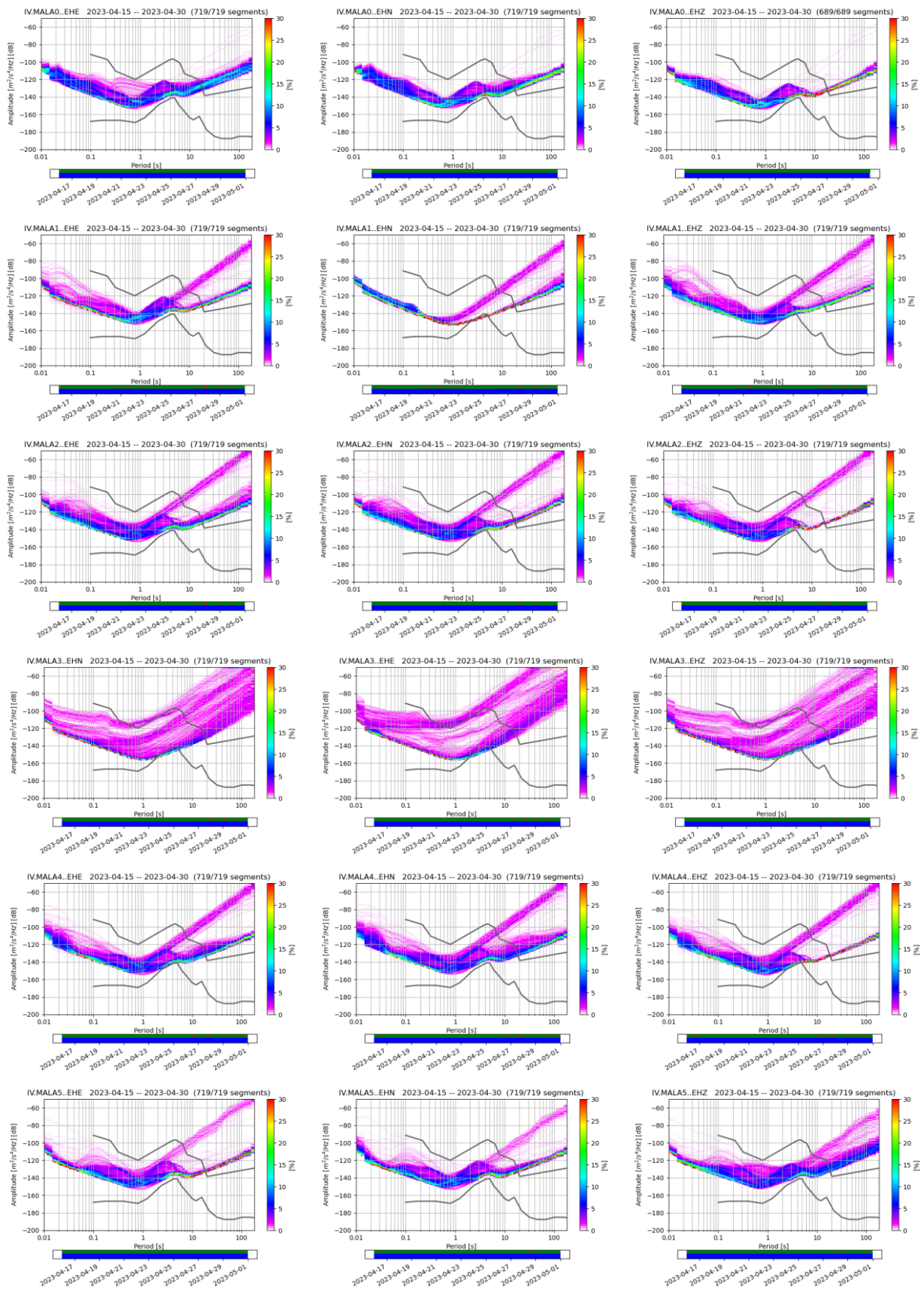


Figura 3.2. Esempi dei plot della PSD per monitorare la qualità dei dati registrati dalle stazioni dell'array MALA.

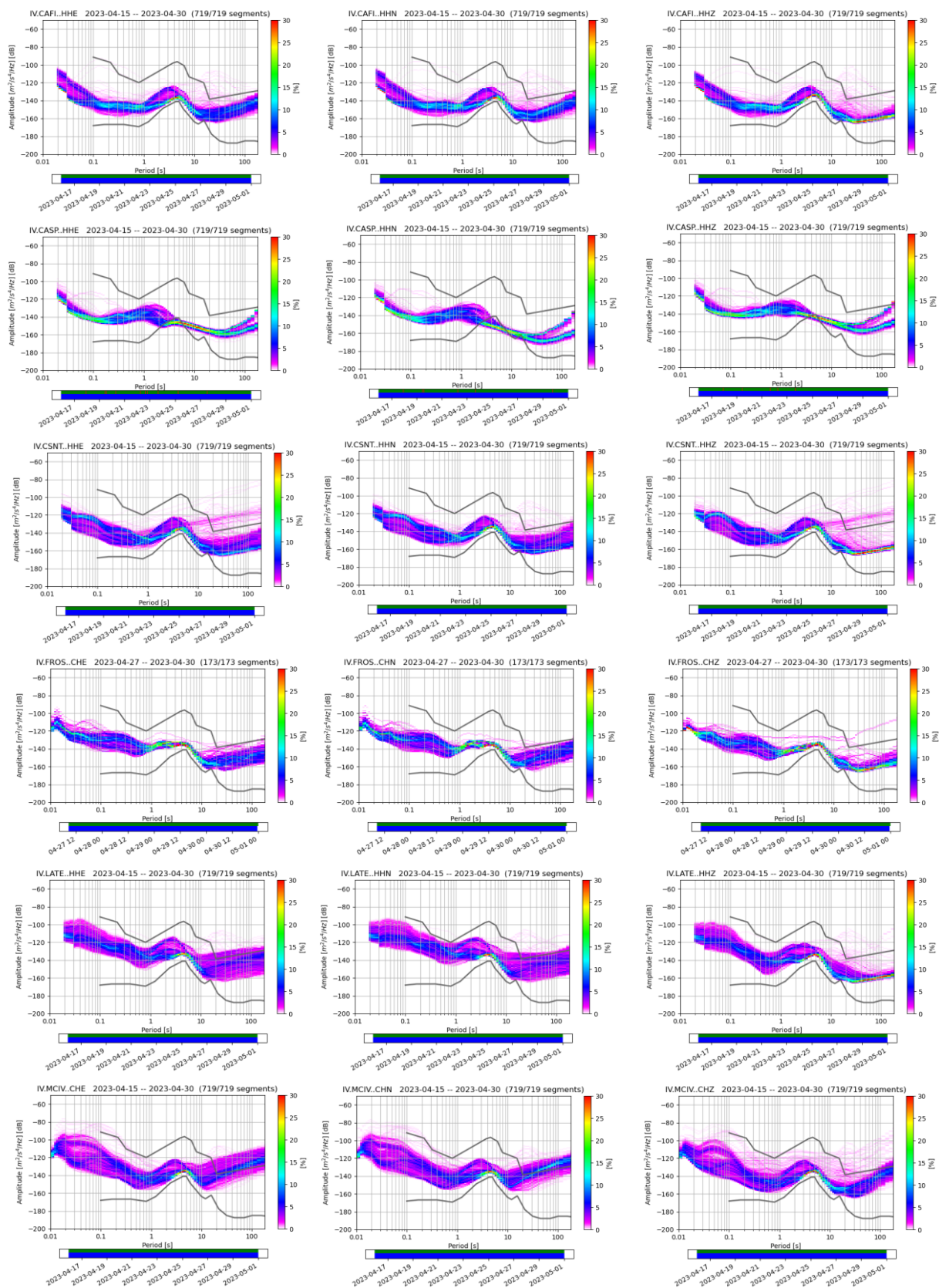


Figura 3.3. Esempi dei plot della PSD per monitorare la qualità dei dati registrati dalle stazioni delle reti IV e IV/EL.

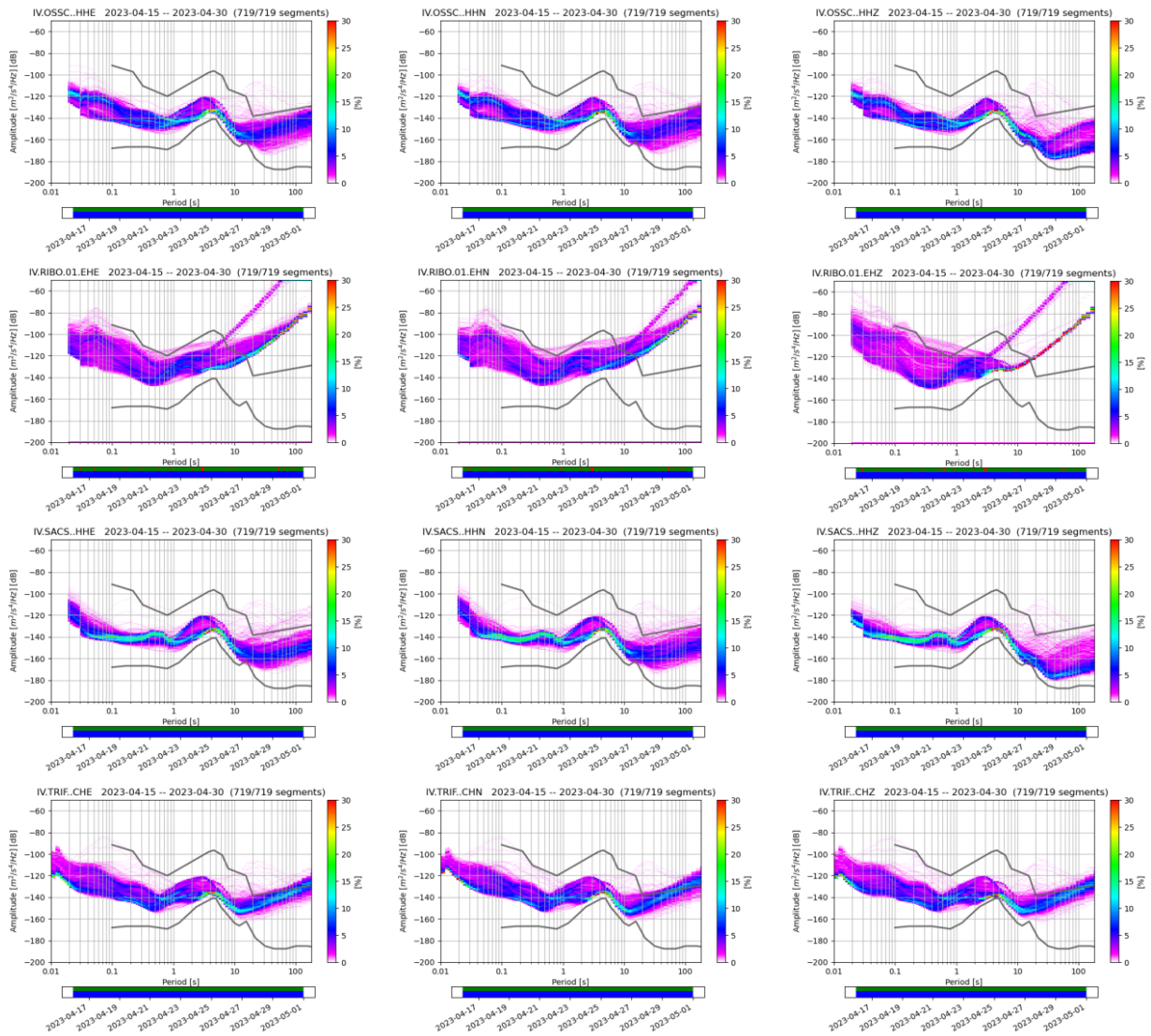


Figura 3.4. Esempi dei plot della PSD per monitorare la qualità dei dati registrati dalle stazioni delle reti IV e IV/EL.

3.3 Archiviazione dati sismici presso il CMS di Bologna

Il dato sismologico viene archiviato presso tre elementi di *storage*. I primi due afferiscono ai sistemi di immagazzinamento propri delle due macchine di acquisizione, locate presso TIER1. In questi elementi l'archiviazione avviene in formato chiuso per preservare la confidenzialità del dato sismologico in esse trattato. Un terzo punto di archiviazione avviene presso i locali della Sezione INGV di Bologna (geograficamente distante da TIER1), in questo caso in formato *Seedlink*, al fine di permettere una eventuale successiva analisi con programmi scientifici open source. L'accesso a questo *storage* con dati in formato aperto è strettamente regolamentata e controllata dal personale del CMS.

L'immagine di seguito dettaglia quanto indicato nei paragrafi 3.1 e 3.4.

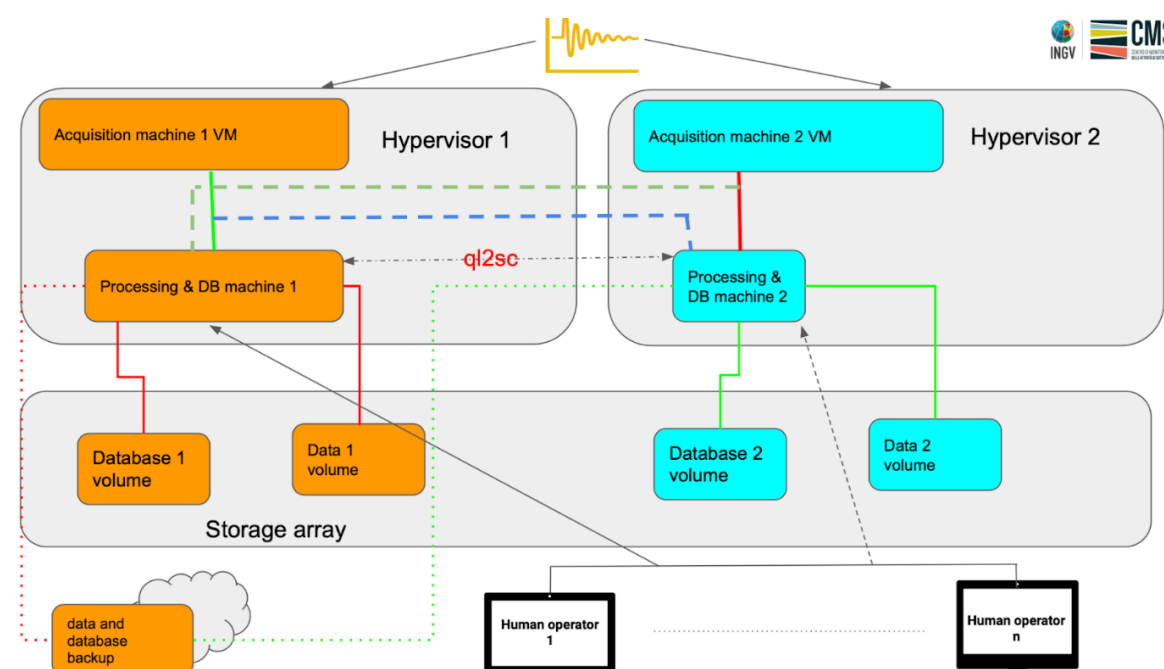


Figura 3.5. Architettura del Centro Acquisizione Dati (CAD-BO) presso l'INGV di Bologna.

3.4 Integrazioni di stazioni IV e trasmissione a CAD-BO

Come accennato nell'ultimo report, il CMS ha accesso ai dati in tempo reale della sala sismica di Roma gestita dall'Osservatorio Nazionale Terremoti (ONT). Confluiscono quindi i *datastream* delle stazioni operative nell'area di interesse tra il Monte Amiata e Larderello-Travale. Le stazioni elencate in Tabella 3.1 e illustrate in Figura 3.6 sono state integrate nel sistema di acquisizione del CMS e sono state applicate le correzioni della risposta in frequenza a ciascuna stazione per correggere le ampiezze delle forme d'onda e consentire una stima idonea delle magnitudo degli eventi localizzati.

Sigla	Rete	Lat [°] N	Long [°] E	Alt [m]	Località	Provincia
ARCI	IV	42.851900	11.475400	1080	Arcidosso	GR
CAFI	IV	43.329200	11.966300	547	Castiglion Fiorentino	AR
CASP	IV	42.790800	10.865200	390	Castiglion della Pescaia	GR
CSNT	IV	43.473110	11.290170	636	Castellina in Chianti	SI
FROS	IV/EL	43.209720	11.156220	432	Frosini	SI
LATE	IV	42.613700	11.804000	610	Latera	VT
MAGO	IV/EL	43.273245	10.657926	280	Magona	LI
MCIV	IV/EL	42.778610	11.676500	790	Monte Civitella	GR
OSSC	IV	43.523580	11.245790	452	Osservatorio del Chianti	FI
RIBO	IV	42.949000	11.046500	50	Ribolla	GR
SACS	IV	42.849060	11.909670	845	San Casciano dei Bagni	SI
TRIF	IV/EL	43.114780	10.902650	596	Trifonti	GR
MALA0	IV	43.0058	11.4738	441	Montalcino S. Angelo Colle	SI
MALA1	IV	43.0039	11.4769	403	Montalcino S. Angelo Colle	SI
MALA2	IV	43.0036	11.4782	414	Montalcino S. Angelo Colle	SI
MALA3	IV	43.0052	11.4800	445	Montalcino S. Angelo Colle	SI
MALA4	IV	43.0056	11.4777	430	Montalcino S. Angelo Colle	SI
MALA5	IV	43.0070	11.4781	444	Montalcino S. Angelo Colle	SI

Tabella 3.1. Elenco delle stazioni sismiche della rete IV e dell'array MALA operative nelle aree geotermiche toscane. Le stazioni elencate con font blu sono in condivisione con la rete sismica EL di EGP.

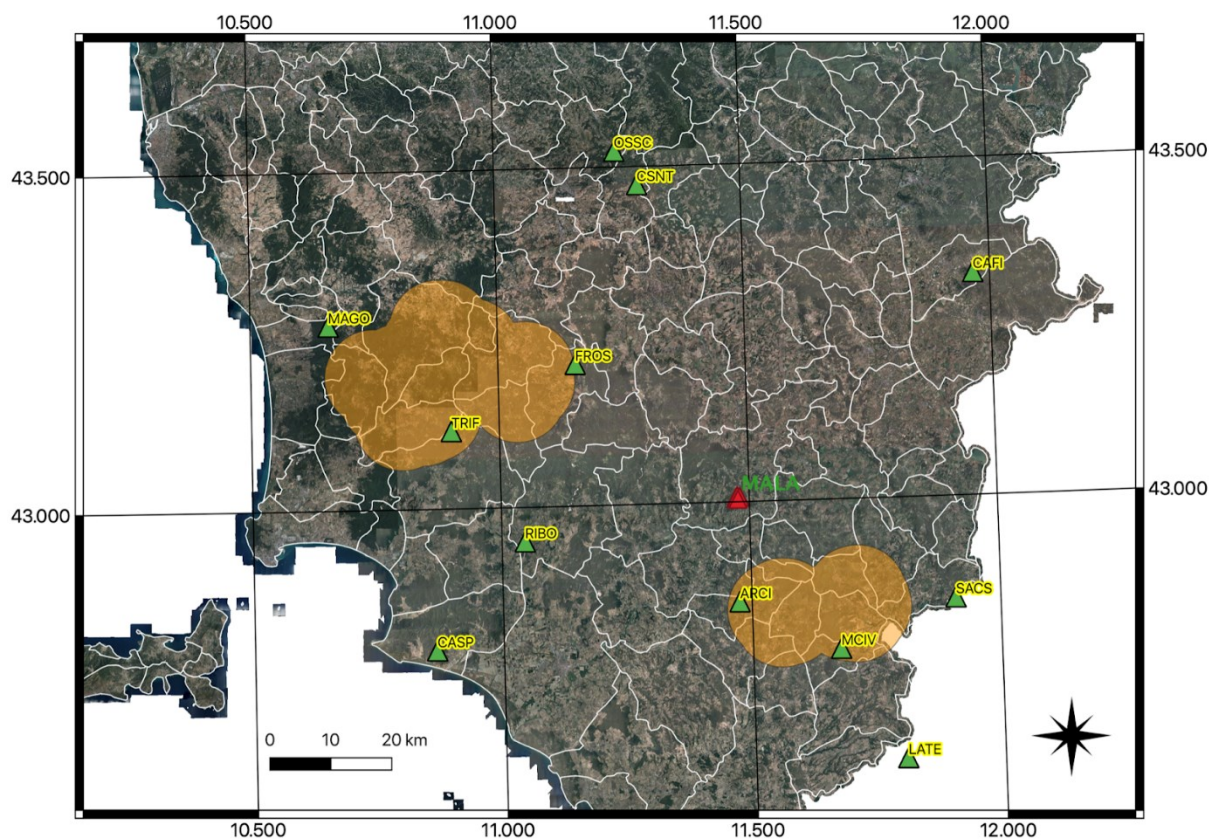


Figura 3.6 Mappa delle stazioni sismiche della rete IV e dell'array MALA operative nelle aree geotermiche tra Larderello e Amiata (vedi Tabella 3.1).

3.5 Integrazioni stazioni EGP e trasmissione a CAD-BO

Il CMS, per svolgere le sue attività di analisi nell'ambito del programma di monitoraggio, riceve i dati sismologici da EGP in modalità *real-time*. Al fine di garantire i requisiti di confidenzialità del dato, EGP e CMS si sono accordati per dotarsi di un collegamento *extranet-based site-to-site* criptato (Fortinet, 2023), tra il *datacenter* del CMS, che si trova a Bologna, e il Centro di calcolo di EGP, sito a Pisa, è stato scelto di utilizzare la tecnologia VPN di tipo IPSec. Le caratteristiche principali di questa scelta sono l'elevata affidabilità, sia in termini di sicurezza informatica, che di stabilità della connessione e rapido ripristino in caso di malfunzionamento.

IPSec (<https://aws.amazon.com/it/what-is/ipsec/>) è una collezione di regole e protocolli utilizzati per garantire la sicurezza delle connessioni all'interno di una rete. Essendo l'*Internet Protocol* (IP) lo standard predominante per la trasmissione dei dati su Internet, IPSec fornisce ulteriori livelli di sicurezza attraverso la crittografia e l'autenticazione. In pratica, IPSec crittografa i dati all'origine e li decodifica alla destinazione, aggiungendo inoltre un controllo sull'origine dei dati trasmessi.

IPSec può essere utilizzato per svolgere diverse operazioni, tra cui:

- rendere sicuro il router durante la trasmissione dei dati attraverso la rete pubblica di Internet;
- crittografare i dati delle applicazioni per proteggerli dall'intercettazione da parte di terzi non autorizzati;
- autenticare rapidamente i dati se provengono da un mittente sconosciuto;
- proteggere i dati di rete mediante la creazione di tunnel IPsec, ovvero circuiti crittografati che proteggono tutti i dati inviati tra due *endpoint*. Le organizzazioni utilizzano IPsec per difendersi dagli attacchi di *replay*, o *man-in-the-middle*, dove un attaccante intercetta e modifica la trasmissione instradando i dati attraverso un computer intermedio. Il protocollo IPsec assegna un numero sequenziale a ciascun pacchetto di dati e controlla la presenza di pacchetti duplicati per rilevare eventuali manomissioni della trasmissione.

IPsec supporta diversi algoritmi di crittografia, tra cui *AES*, *Blowfish*, *Triple DES*, *ChaCha* e *DES-CBC*.

IPsec utilizza sia la crittografia asimmetrica che quella simmetrica per rendere veloce e sicuro il trasferimento dei dati. Nella crittografia asimmetrica, una chiave di crittografia è resa pubblica, mentre quella di decrittografia è mantenuta privata. Nella crittografia simmetrica, invece, la stessa chiave viene utilizzata sia per crittografare che per decrittografare i dati. IPsec stabilisce una connessione sicura utilizzando la crittografia asimmetrica e passa poi alla crittografia simmetrica per aumentare la velocità del trasferimento dei dati.

Il processo di scambio di dati con il protocollo IPsec avviene tipicamente nel seguente modo:

- il computer mittente determina se la trasmissione dei dati necessita di protezione IPsec verificando la corrispondente *policy* di sicurezza. In caso affermativo, il computer avvia la trasmissione IPsec sicura con il computer destinatario;
- entrambi i computer negoziano i requisiti per stabilire una connessione sicura. Ciò include l'accettazione reciproca dei parametri di crittografia, autenticazione e altre associazioni di sicurezza;
- il computer mittente crittografa i dati e li invia al computer destinatario attraverso la connessione IPsec sicura;
- il computer destinatario riceve i dati e li decrittografa utilizzando la chiave di decrittografia corrispondente;
- entrambi i computer convalidano la provenienza dei dati e verificano che il contenuto sia affidabile;
- La connessione IPsec viene terminata quando la trasmissione dei dati è stata completata o quando la sessione scade.

In sintesi, IPSec garantisce la sicurezza della comunicazione tra due *endpoint* attraverso l'utilizzo di crittografia, autenticazione e altre tecniche di sicurezza. Questo protocollo è utilizzato per proteggere una vasta gamma di applicazioni di rete, tra cui VPN, VoIP e *tunneling*.

I protocolli IPSec inviano pacchetti di dati in modo sicuro attraverso la rete. Un pacchetto di dati è composto da tre parti: l'intestazione, il *payload* e il *trailer*. L'intestazione contiene le informazioni necessarie per instradare il pacchetto alla destinazione corretta, il *payload* rappresenta il contenuto effettivo del pacchetto e il *trailer* contiene dati aggiuntivi che indicano la fine del pacchetto.

Il protocollo *Authentication Header* (AH) aggiunge un'intestazione per autenticare il mittente e proteggere i contenuti dei pacchetti da modifiche non autorizzate, utilizzando un *hash* crittografico per confrontare il *payload* con l'intestazione. Il protocollo *Encapsulating Security Payload* (ESP) esegue la crittografia su tutto il pacchetto IP o solo sul *payload*, aggiungendo l'intestazione e il *trailer* al pacchetto di dati al momento della crittografia, a seconda della modalità IPSec selezionata.

Infine, *Internet Key Exchange* (IKE) è un protocollo che stabilisce una connessione sicura tra due dispositivi in Internet, negoziando le chiavi e gli algoritmi di crittografia per trasmettere e ricevere i pacchetti di dati successivi attraverso l'associazione di sicurezza configurata in entrambi i dispositivi.

IPSec offre due modalità di funzionamento con differenti gradi di protezione:

- Modalità *Tunnel*: questa modalità è utile per il trasferimento di dati su reti pubbliche, in quanto offre una maggiore protezione dei dati da parti non autorizzate. In questa modalità, il computer crittografa tutti i dati, inclusi il *payload* e l'intestazione, e aggiunge una nuova intestazione per i dati crittografati.
- Modalità di Trasferimento: questa modalità crittografa solo il *payload* del pacchetto di dati e lascia l'intestazione IP nella sua forma originale. L'intestazione del pacchetto non crittografata consente ai *router* di identificare l'indirizzo di destinazione di ogni pacchetto di dati. Questa modalità viene utilizzata in una rete chiusa e attendibile, ad esempio per proteggere una connessione diretta tra due computer.

La differenza principale tra VPN IPSec e VPN SSL è la posizione in cui si applicano all'interno del modello OSI. VPN IPSec agisce sui livelli di rete e di trasferimento, mentre VPN SSL agisce al livello applicativo. Inoltre, VPN IPSec richiede l'installazione di un software dedicato, mentre VPN SSL può essere utilizzata tramite un browser web. Entrambi i protocolli offrono crittografia e sicurezza, ma la scelta tra di essi dipende dalle esigenze specifiche dell'utente e dall'ambiente in cui verranno utilizzati.

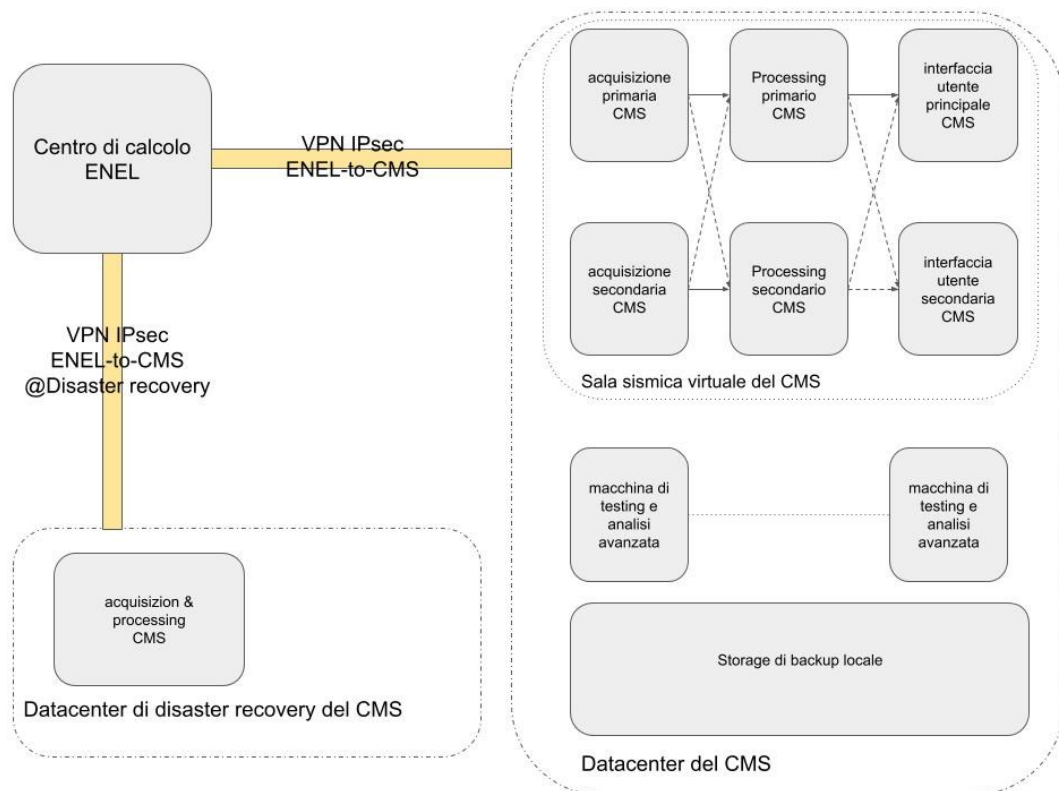


Figura 3.7. Topologia della connettività tra il *datacenter* EGP e le infrastrutture informatiche del Cms.

In conclusione, la sicurezza delle reti informatiche è un tema cruciale per il CMS e per EGP, allo scopo di proteggere le informazioni sensibili degli utenti e delle organizzazioni. I protocolli di sicurezza come IPsec e SSL forniscono un alto livello di crittografia dei dati e autenticazione degli utenti, contribuendo a mantenere la *privacy* e l'integrità dei dati trasmessi su Internet. Le VPN basate su IPsec e SSL offrono entrambe vantaggi in termini di sicurezza, ma sono utilizzate in situazioni diverse e si applicano a livelli diversi del modello OSI. La scelta della soluzione VPN più adatta dipende dalle esigenze specifiche dell'utente o dell'organizzazione.

Alla data di trasmissione del seguente report, i *datacenter* del CMS e di EGP risultano collegati mediante tunnel ipsec, mentre invece non sono ancora state eseguite prove di trasmissione dovuto a una attuale non- compatibilità dei range di indirizzi ip assegnati alle reti coinvolte.

Sono state avviate delle procedure per risolvere le problematiche quanto prima.

Gli obiettivi posti nel WP3 del presente ACS possono essere considerati in via di conclusione.

4 WP4: Monitoraggio e analisi dati

Seguendo gli ILG (UNMIG, 2016) l'obiettivo del monitoraggio sismico è:

1. rilevare, localizzare e determinare i principali parametri di sorgente della sismicità e microsismicità verificatasi nel dominio di rilevazione;
2. migliorare a scala locale il livello di magnitudo di completezza degli eventi sismici rilevati all'interno del dominio di rilevazione;
3. misurare con accuratezza le velocità di oscillazione e le accelerazioni del suolo prodotte in superficie da terremoti in prossimità dell'area di coltivazione e reiniezione.

I dati rilevati dovranno anche servire a costruire un catalogo di eventi sismici che possa essere utilizzato per valutare l'evoluzione nel dominio spazio-tempo-magnitudo della sismicità nel dominio di rilevazione, e analizzare la pericolosità dell'eventuale sismicità indotta, anche in relazione al tempo.

La nuova rete di monitoraggio sismico dovrà soddisfare i seguenti requisiti:

1. nel dominio di rilevazione, rilevare e localizzare i terremoti a partire da magnitudo locale ML compresa tra 0 e 1 ($0 \leq ML \leq 1$) e con errori nella localizzazione dell'ipocentro non superiori a poche centinaia di metri;
2. determinare l'accelerazione e la velocità del moto del suolo provocata da eventuali terremoti presso i punti di misurazione;
3. integrarsi opportunamente con le reti di monitoraggio esistenti (ovvero: rete nazionale, reti regionali e ulteriori eventuali reti locali) al fine di migliorare l'accuratezza e la completezza della rilevazione della sismicità mediante la stipula di opportuni accordi tra il Concessionario, l'Amministrazione competente ed i soggetti gestori delle reti di monitoraggio esistenti.

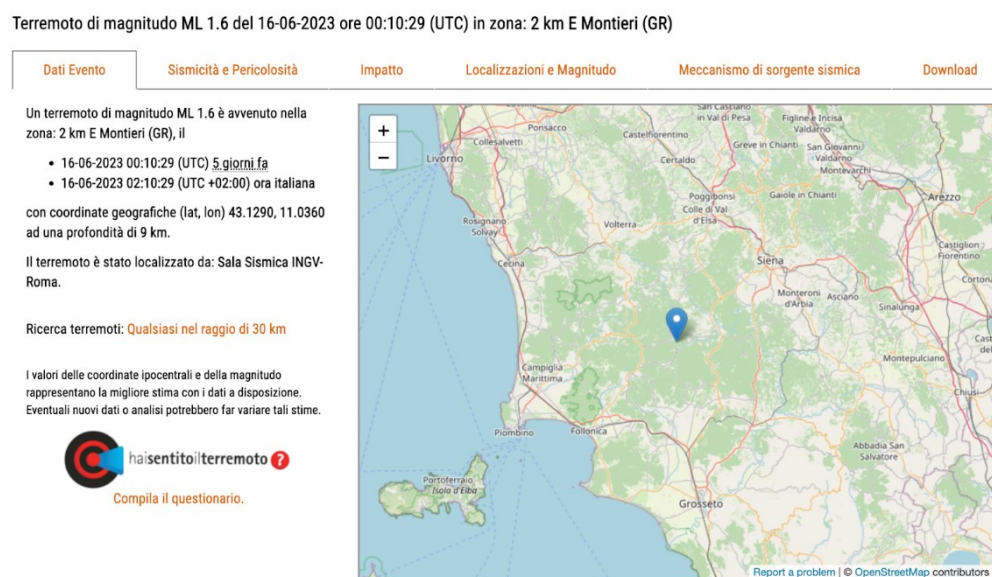
Secondo l'Accordo di Collaborazione RT - INGV, in caso di eventi significativi all'interno delle aree monitorate, viene richiesta la compilazione di un apposito report scientifico. Nell'ambito dei processi decisionali connessi con le attività di monitoraggio sismico, la RT richiede inoltre il supporto tecnico-scientifico del CMS-INGV.

4.1 Analisi dati sismici di dettaglio, monitoraggio secondo ILG

Di seguito viene illustrata la procedura dell'analisi *standard* di un evento sismico avvenuto nell'area di interesse, attraverso il *software* SeisComP, prendendo come esempio un evento sismico di Magnitudo ML=1.6, verificatosi nell'area di Montieri (GR) in data 16/06/2023 alle ore 00:10:29 UTC (02:10:29, ore italiane). La Figura 4.1 mostra uno *screenshot* con le informazioni relative all'evento fornite dalla sala sismica a Roma dell'ONT (<http://terremoti.ingv.it/event/35319151?timezone=UTC>).

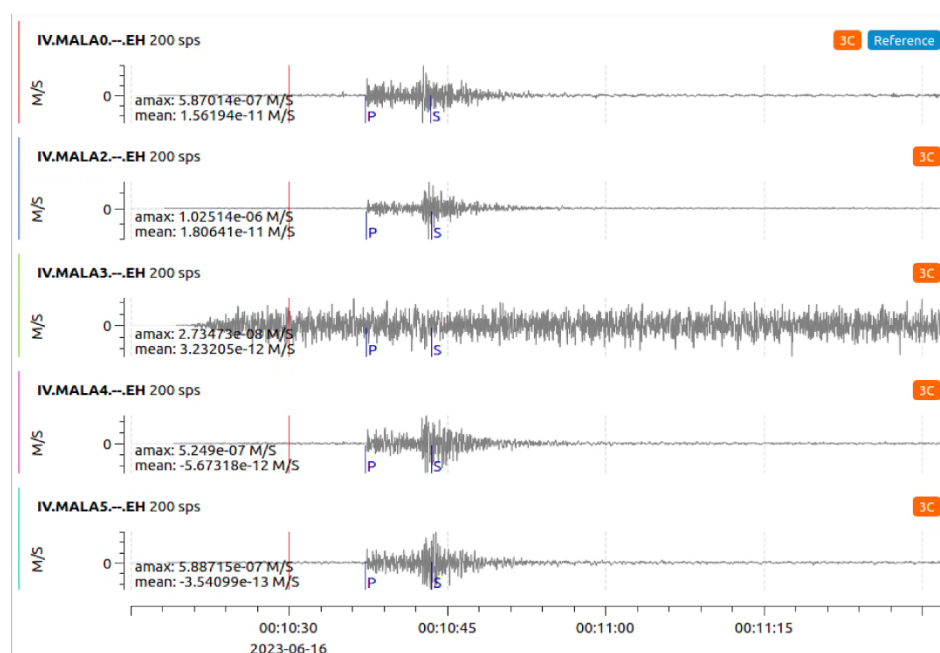
Figura 4.1. Screenshot localizzazione evento fornito dalla sala sismica di Roma.

<http://terremoti.ingv.it/event/35319151?timezone=UTC>



Le tracce verticali registrate da MALA sono illustrate in Figura 4.2, usando il modulo SC_LAMBDA.

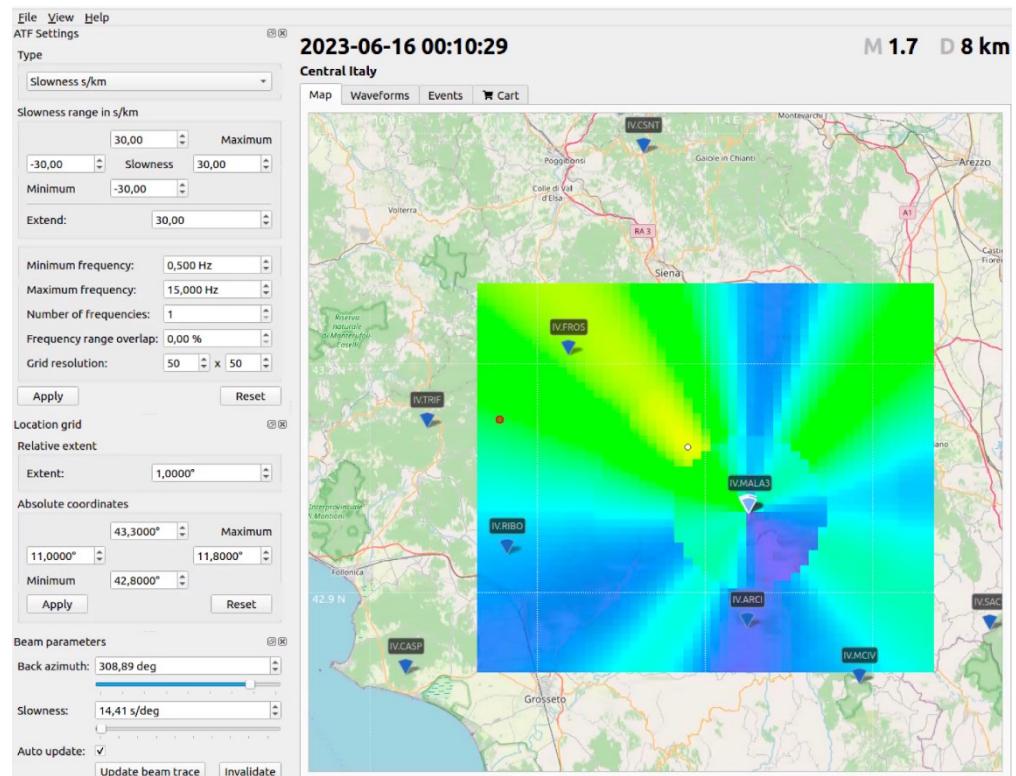
Figura 4.2. Registrazione di MALA dell'evento sismico di Figura 4.1.



Per effettuare l'analisi dei dati dell'array MALA con metodi di array, è stato acquistato il modulo SC_Lambda. La Figura 4.3 mostra l'apposita pagina di elaborazione con Lambda: è stato applicato il metodo f-k, utilizzando le stazioni MALA0 - MALA5 dell'array MALA (MALA1 non era disponibile). I dati sono stati filtrati tra 0.5 e 15 Hz. Per il *grid search* del massimo dell'energia è stata definita una griglia con i seguenti estremi (Figura 4.3, Figura 4.4):

LonMin 11, LonMax 11.8, LatMin 42.8, LatMax 43.3.

Figura 4.3. Scheda di analisi del modulo software SC_Lambda.



Il risultato dell'analisi array è il vettore di *slowness*, che indica sia la direzione (*backazimuth*) sia l'angolo di incidenza del fronte d'onda che raggiunge l'array. La retro-proiezione per il massimo dell'energia coerente permette di calcolare le coordinate ipocentrali (*backprojection*), assegnando un modello di velocità delle onde specifico per l'area. La Figura 4.3 indica l'energia coerente relativa per ogni cella della griglia predefinita con una scala di colori "arcobaleno" da blu (bassa coerenza) a giallo (alta coerenza). Il massimo (epicentro) è rappresentato da un cerchio bianco, mentre il cerchio rosso rappresenta la localizzazione automatica.

Aggiungendo all'array alcune delle stazioni della rete IV/EL (TRIF, FROS, RIBO, CASP, CSNT, OSSC) l'analisi classica effettuata con SC_scolv fornisce il risultato per le coordinate ipocentrali illustrato in Figura 4.4, che include anche il grafico delle dromocrone per gli arrivi Pg e Sg (palline verdi).

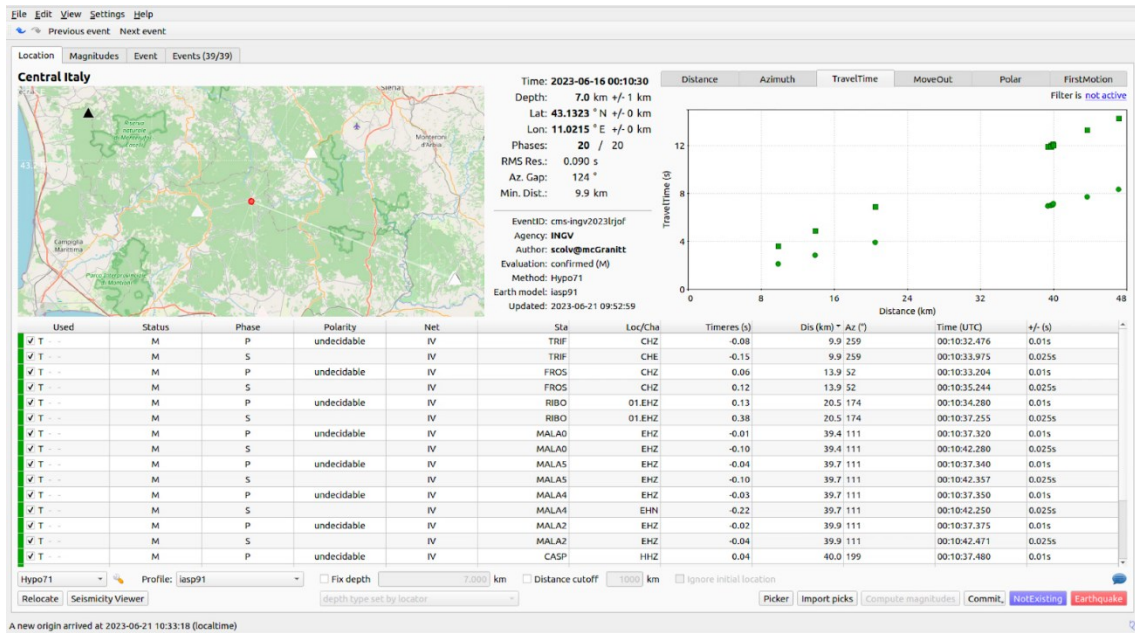


Figura 4.4. Scheda di localizzazione del modulo software SC_Scolv.

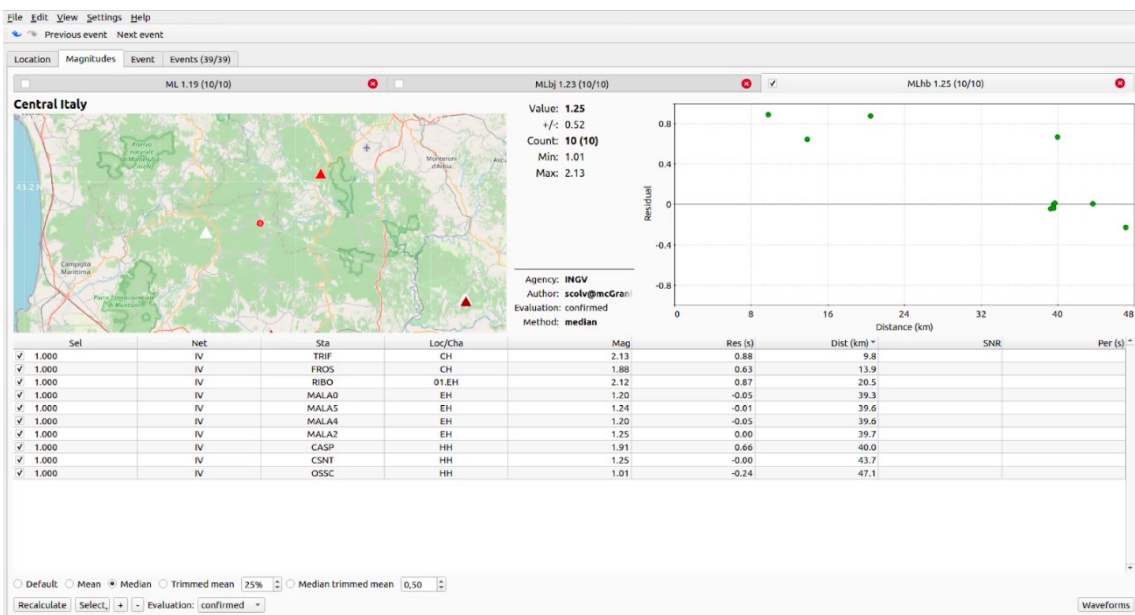


Figura 4.5. Scheda di calcolo della magnitudo del modulo software SC_Scolv.

La Figura 4.5 mostra il risultato del calcolo della magnitudo, applicando il modulo SC_scolv. Il miglior fit risulta con il modello di velocità regionale INGV. Uno dei futuri compiti è la definizione di un modello di velocità 3D del volume crostale delle aree geotermiche toscane. La magnitudo locale (secondo Hutton & Boore, 1987) risulta MLhb 1.25 +/- 0.5.

4.2 Organizzazione dei turni di monitoraggio/reperibilità.

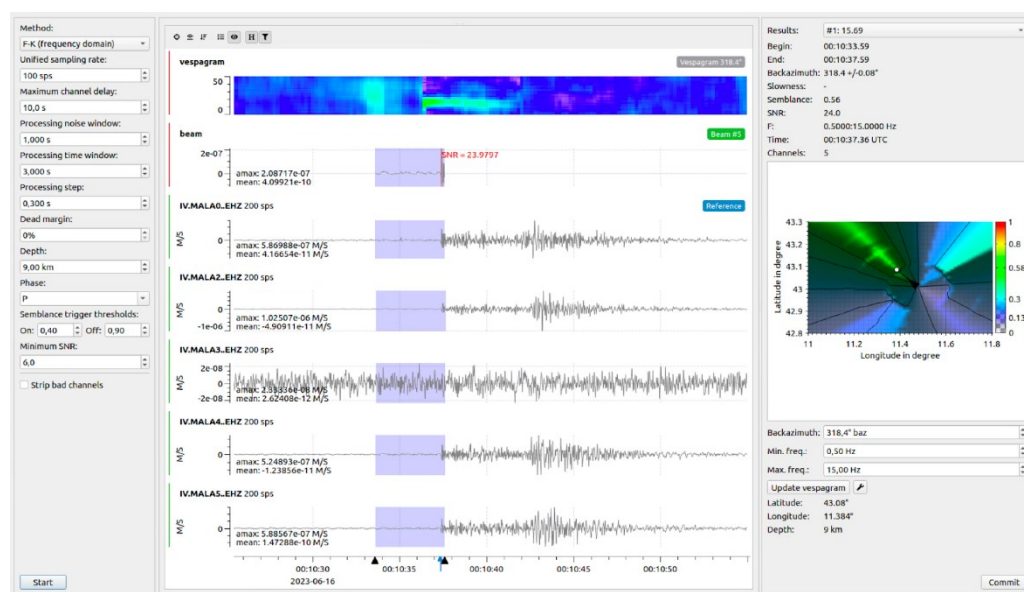
Dai primi mesi del 2021 la SPM ha istituito un sistema di sorveglianza della sismicità registrata entro le aree dei domini di interesse per le diverse sperimentazioni organizzato con turni settimanali di reperibilità di un sismologo addestrato all'elaborazione quotidiana dei dati acquisiti e alla compilazione di bollettini giornalieri.

E' stato redatto dal direttivo del CMS un mansionario del turnista, applicato e collaudato per la sperimentazione in Val d'Agri (concessione ENI) che da un paio di anni monitora il dominio di interesse nell'area, analizzando i dati di una rete sismica integrata composta di 57 stazioni tra pubbliche e private.

La rete integrata attuale che consiste in stazioni dell'INGV operative nell'area di interesse (IV), stazioni EGP condivise con INGV (vedi §3.4) e dell'array MALA è in grado di fornire i dati necessari per inserire la "geotermia Toscana" nei turni di monitoraggio e redigere un bollettino sismico, non appena collaudata la ricezione dei *datastream* dalle stazioni EGP.

La presenza dell'array MALA consente di individuare eventi sismici di bassa magnitudo nell'area geotermica oggetto di monitoraggio in quanto tramite algoritmi specifici delle analisi array si effettua in tempo reale una operazione di *shift* dei segnali registrati a ciascuna stazione che compone l'array per massimizzare la somiglianza delle forme d'onda. La successiva somma delle tracce così shiftate, consente infine di massimizzare le ampiezze del segnale "*beam*" che si costruisce, incrementando il rapporto segnale/rumore che è fondamentale per superare la soglia di *detection*. In Figura 4.6 è possibile osservare un SNR di 23.9, di gran lunga superiore alla soglia impostata.

Figura 4.6. Scheda di di analisi di retroproiezione delle forme d'onda finalizzata alla detection e localizzazione di un evento sismico utilizzando i dati registrati dall'array MALA.



Scheda di di analisi di retro-proiezione delle forme d'onda finalizzata alla detection e localizzazione di un evento sismico utilizzando i dati registrati dall'array MALA.

4.3 Bollettino sismico

A seguito della ricezione dei *datastream* da EGP presso il CAD-BO è prevista anche la redazione da parte del CMS di un bollettino sismico, che verrà periodicamente trasmesso alla Regione Toscana e ai Concessionari. La data ufficiale dell'inizio di monitoraggio sismico regolare da parte della SPM è prevista per il mese di Luglio 2023. Fino a tale data la parametrizzazione dell'attività sismica verificatasi nelle aree della Geotermia Toscana si basa sui dati acquisiti dalla RSN dell'INGV, pubblicati quotidianamente su web <http://terremoti.ingv.it>.

Come evidente dalla mappa in Figura 4.7 per il periodo dall'inizio del presente AC ad oggi (01/07/2020 - 05/06/2023), all'interno di un'area con raggio 50 km intorno alla coordinata centrale 43.0/11.3, l'ONT ha localizzato 608 eventi compresi tra $0 \leq ML \leq 3.7$, di cui l'evento più forte con epicentro a Siena, verificatosi in data 08/02/2023.

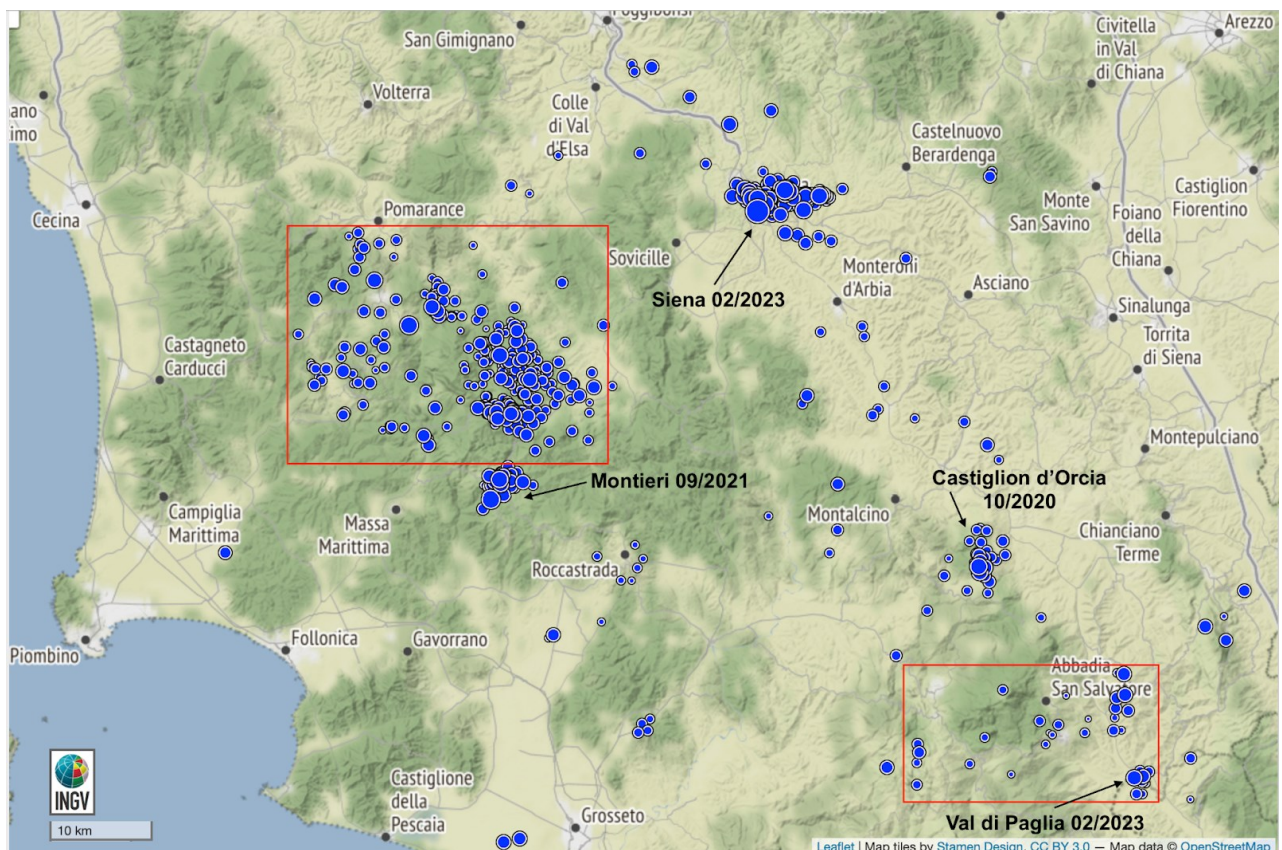


Figura 4.7. Localizzazioni ONT dal 01/07/2020 al 05/06/2023.

Prendendo in considerazione solamente le concessioni attualmente attive (vedi Figura 2.1) la sismicità osservata si riduce alle due aree delimitate da rettangoli rossi (Figura 4.7), con le seguenti coordinate (LLC=angolo a sudest; URC=angolo a nordovest)

Larderello: LLC: 10.7°E/43.1°N; URC=11.2°E/43.3°N

M. Amiata: LLC: 11.5°E/42.8°N; URC=11.8°E/42.9°N.

Tali aree si estendono intorno alle concessioni produttive di EGP a Larderello Travale con 305 eventi sismici, di cui 104 $M \geq 1.5$ (Tabella 4.1) e sul Mt. Amiata con 32 eventi sismici, di cui 10 con $M \geq 1.5$ (Tabella 4.2). Le piccole sequenze registrate a Castiglion d'Orcia (ottobre 2020), a Montieri (settembre 2021), a Siena (02/2023) e in Val di Paglia (02/2023) si trovano in aree con "permesso di ricerca" o "istanze di concessioni" (vedi Figura 8 nel Report 2: CMS, 2020b) e sono attualmente esterni ai domini di monitoraggio dell'EGP.

Data e Ora (Italia)	Magnitudo	Zona	Profondità	Latitudine	Longitudine
2021-04-11 02:55:53	ML 2.7	Castelnuovo di Val di Cecina (PI)	10	43.21	10.91
2021-04-17 17:45:53	ML 2.5	6 km N Montieri (GR)	11	43.18	11.02
2021-07-24 20:40:40	ML 2.3	6 km NW Castelnuovo di Val di Cecina (PI)	9	43.25	10.87
2020-09-20 05:15:46	ML 2.3	3 km W Chiusdino (SI)	7	43.16	11.05
2022-04-06 13:11:07	ML 2.3	3 km NE Castelnuovo di Val di Cecina (PI)	7	43.23	10.94
2022-12-02 07:21:51	ML 2.2	3 km E Castelnuovo di Val di Cecina (PI)	8	43.22	10.94
2023-04-10 03:57:35	ML 2.2	1 km E Montieri (GR)	10	43.13	11.03
2021-05-21 21:49:26	ML 2.1	1 km E Montieri (GR)	10	43.13	11.03
2022-12-12 09:55:38	ML 2.1	1 km E Montieri (GR)	10	43.13	11.04
2021-05-17 08:33:44	ML 2.1	1 km NW Montieri (GR)	9	43.13	11.01
2022-06-05 21:14:28	ML 2.1	Montieri (GR)	10	43.13	11.01
2021-05-07 19:18:36	ML 2.0	7 km N Montieri (GR)	9	43.20	11.01
2021-09-16 00:02:30	ML 2.0	1 km SE Montieri (GR)	9	43.13	11.03
2023-02-11 13:13:32	ML 2.0	3 km E Montieri (GR)	9	43.13	11.05
2021-03-19 00:53:56	ML 2.0	1 km W Montieri (GR)	9	43.13	11.01
2023-04-01 12:46:52	ML 2.0	7 km SE Monterotondo Marittimo (GR)	9	43.11	10.93
2022-07-24 02:25:58	ML 2.0	2 km W Montieri (GR)	7	43.14	10.99
2022-03-23 23:45:13	ML 2.0	1 km W Montieri (GR)	10	43.13	11.01
2021-12-04 16:45:40	ML 2.0	6 km S Radicondoli (SI)	6	43.20	11.04
2020-09-08 12:01:15	ML 2.0	3 km NW Monterotondo Marittimo (GR)	7	43.17	10.83
2023-01-03 18:30:47	ML 2.0	3 km E Chiusdino (SI)	10	43.16	11.13
2020-08-27 00:17:45	ML 1.9	9 km NE Monteverdi Marittimo (PI)	4	43.23	10.80
2022-09-16 21:04:00	ML 1.9	7 km NE Massa Marittima (GR)	9	43.11	10.93
2021-05-03 12:12:14	ML 1.9	4 km N Montieri (GR)	10	43.16	11.02
2021-02-23 13:15:17	ML 1.9	3 km E Castelnuovo di Val di Cecina (PI)	7	43.22	10.94
2021-04-23 04:42:00	ML 1.9	3 km NE Castelnuovo di Val di Cecina (PI)	7	43.23	10.94
2021-12-01 17:16:34	ML 1.9	2 km E Montieri (GR)	10	43.13	11.04

Tabella 4.1. Elenco degli eventi sismici più forti registrati dalla rete RSN (IV) nell'area di Larderello - Travale nel periodo 01/07/2020 - 05/06/2023.

Data e Ora (Italia) 🇮🇹 ⓘ	Magnitudo ↓🔍 ⓘ	Zona ⓘ	Profondità ↓🔍	Latitudine	Longitudine
2023-02-24 12:21:08	ML 2.3	8 km SE Piancastagnaio (SI)	5	42.82	11.77
2023-01-14 08:30:37	ML 2.1	1 km SW Radicofani (SI)	11	42.89	11.76
2023-02-24 09:00:45	ML 2.0	8 km NW Proceno (VT)	4	42.82	11.79
2020-09-08 17:15:20	ML 1.8	2 km SW Radicofani (SI)	7	42.89	11.75
2021-03-19 02:50:11	ML 1.7	4 km SW Arcidosso (GR)	6	42.84	11.52
2020-12-18 11:33:27	ML 1.6	3 km SW Radicofani (SI)	7	42.88	11.75
2020-12-12 03:13:56	ML 1.6	3 km S Radicofani (SI)	10	42.88	11.77
2023-02-24 09:01:59	ML 1.6	7 km NW Proceno (VT)	6	42.81	11.78
2022-02-12 06:21:03	ML 1.5	5 km E Piancastagnaio (SI)	11	42.86	11.75
2023-02-24 08:59:16	ML 1.5	7 km NW Proceno (VT)	8	42.80	11.78
2021-03-19 01:58:05	ML 1.4	4 km SW Arcidosso (GR)	7	42.84	11.52
2023-02-24 08:57:21	ML 1.4	8 km NW Proceno (VT)	8	42.82	11.79
2023-05-27 00:02:32	ML 1.4	2 km SW Abbadia San Salvatore (SI)	10	42.87	11.66
2023-02-10 12:29:00	ML 1.3	3 km N Roccalbegna (GR)	7	42.81	11.51
2023-02-24 11:59:44	ML 1.3	8 km E Piancastagnaio (SI)	7	42.82	11.78
2022-08-12 18:19:54	ML 1.3	2 km NW Piancastagnaio (SI)	7	42.86	11.68

Tabella 4.2. Elenco degli eventi sismici più forti registrati dalla rete RSN (IV) nell'area di Monte Amiata nel periodo 01/07/2020 - 05/06/2023.

Gli obiettivi posti nel WP4 del presente ACS possono essere considerati raggiunti.

5 WP5: Disseminazione/divulgazione risultati

Il presente paragrafo non presenta fondamentali aggiornamenti rispetto a quanto riportato nella precedente relazione (Braun et al., 2022).

Il CMS informa e divulga le informazioni che riguardano il monitoraggio oggetto di questo report mediante il suo sito internet cms.ingv.it, alla sezione sperimentazioni > Geotermia Toscana (<http://cms.ingv.it/sperimentazioni/geotermia-toscana>)

Figura 5.1. La pagina home del sito CMS e la sezione "Geotermia Toscana"



La sezione presenta una prima introduzione generale alla sperimentazione, ed è suddivisa in Atti, Monitoraggio sismico, Relazioni, Archivio e Informazioni aggiuntive (Figura 5.2).

Figura 5.2. Pagina introduttiva della sperimentazione ed il menù con i dettagli sulla destra



- **Atti:** raccoglie i documenti di fondazione e di contesto di attuazione (Accordo di collaborazione scientifica).
- **Monitoraggio sismico:** descrive i dettagli tecnici relativi alla "rete sismica", al "Monitoraggio Sismico" e alle "Concessioni, istanze di concessioni e permessi di ricerca".
- **Relazioni:** raccoglie la pubblicazione dei rapporti tecnici.
- **Archivio:** raccoglie l'atto e le relazioni tecniche relativi all'accordo precedente.

- **Informazioni aggiuntive:** informa su domande frequenti, sismicità storica e letteratura scientifica, in progressivo aggiornamento.

Inoltre, nella home page del CMS (<http://cms.ingv.it>), è possibile visionare i riferimenti normativi definiti dalle Linee Guida Geotermia 2016 e i contatti per interagire con il CMS stesso da parte della cittadinanza.

Accademia dei Lincei: 19/05/2023 XXXX Giornata dell'Ambiente

<https://www.lincci.it/it/videoteca/19052023-xxxx-giornata-dellambiente-parte-3>.

Gli obiettivi posti nel WP5 del presente ACS possono essere considerati conclusi.

6 Esempi nel mondo di sismicità indotta dalla produzione geotermica

Da parte del Ministero dello Sviluppo Economico, di seguito passato a Ministero per la Transizione Ecologica e 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 → un'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;
- incentivare la 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.

6.1 Le risorse geotermiche

La Figura 6.1 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.

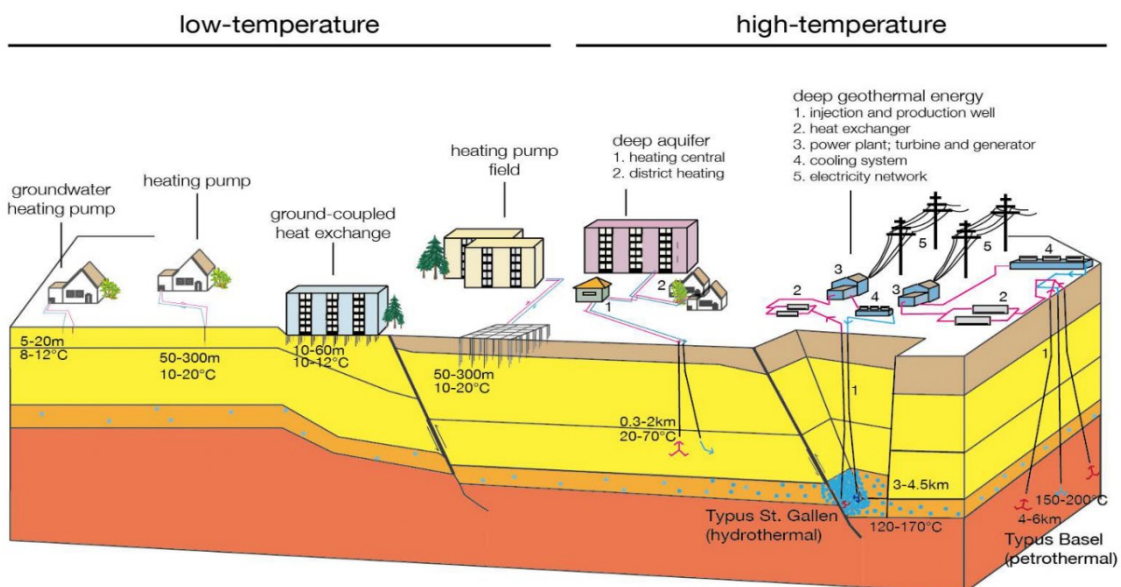


Figura 6.1. Differenti usi della risorsa geotermica in Svizzera [Hirschberg et al., 2015; Kraft et al., 2020].

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, geochemiche. È generalmente accettata la classificazione dei sistemi geotermici in “convenzionali” (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 Geothermal 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 Aquifer*).

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 6.2).

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).

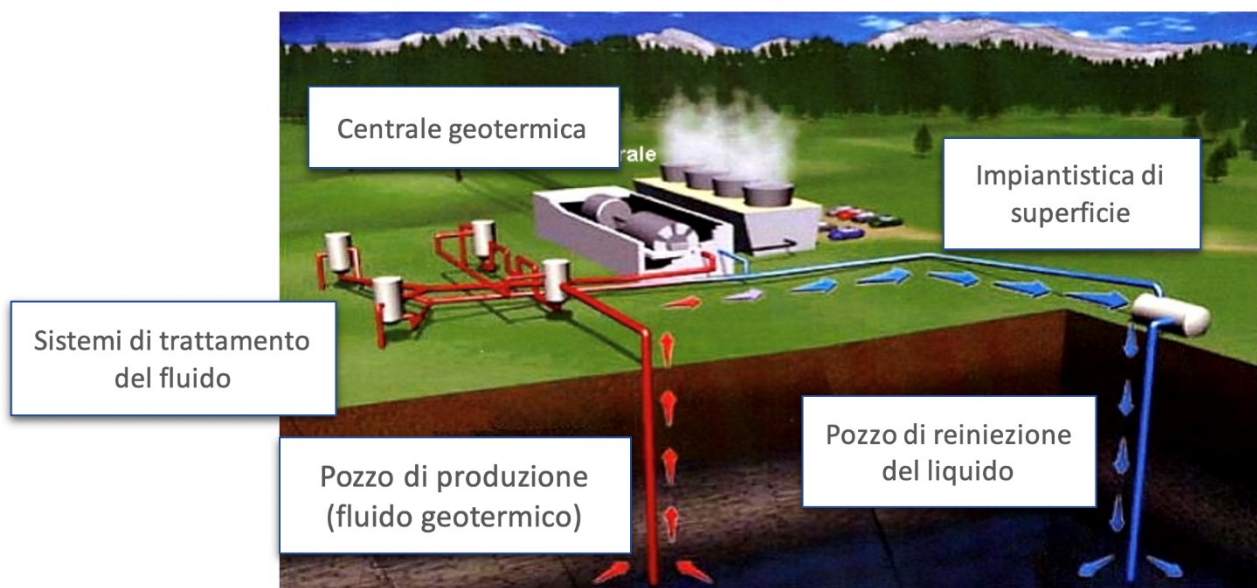


Figura 6.2. Schema di funzionamento di un impianto geotermico che utilizza un sistema idrotermale (fonte: EGP).

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 6.3).

- St. Gallen/CH (2012) † (§ 6.5.1)
- 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 microfrazture (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).

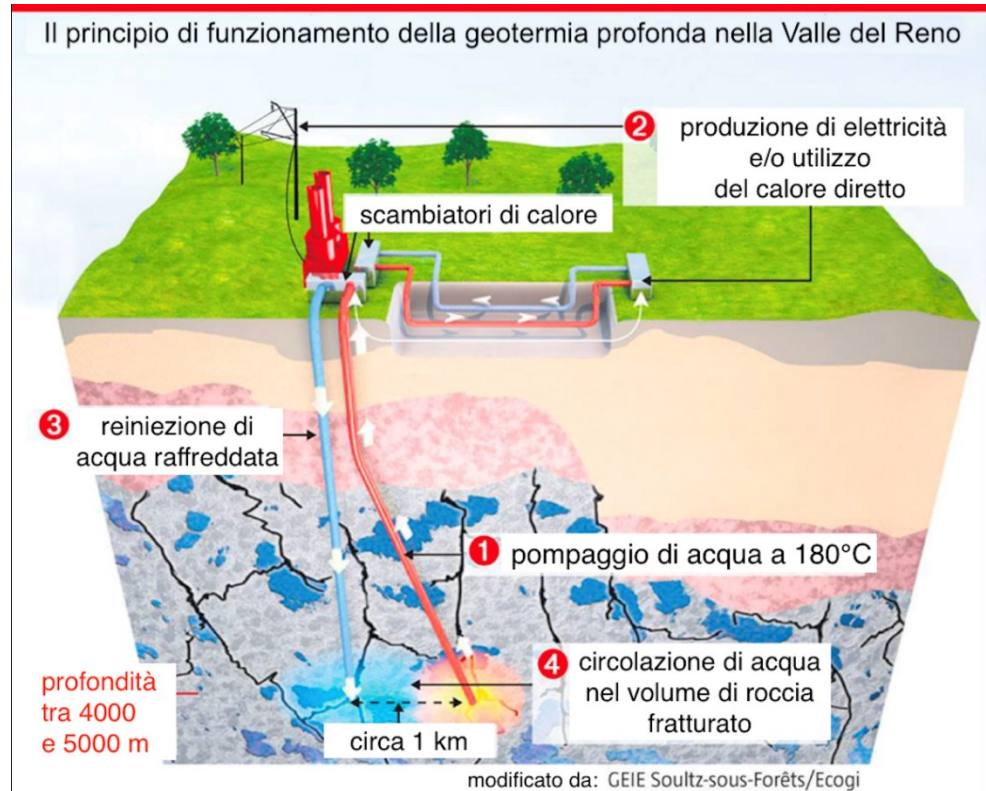
- Soultz-sous-forêts (FR) ✓ (§ 6.5.2)
- Basilea (CH) † (§ 6.5.5)
- Otaniemi (SF) ✓ (§ 6.5.6)

Hot Fractured Rock (HFR), Hot Wet Rock (HWR), Deep Geothermal 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°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°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 legato alla riattivazione di faglie esistenti.

- HWR: Landau ✓, Insheim ✓, Bruchsal ✓, Rittershofen ✓, Illkirch ✓ (§ 6.5.2)
- Vendenheim † (§ 6.5.3)
- Pohang (KR) † (§ 6.5.4)

Nel paragrafo (§ 6.5) verranno presentati ulteriori esempi sia di successo che di insuccesso, riscontrati in impianti geotermici operativi in altri paesi del mondo.

Figura 6.3. Schema di funzionamento di un impianto geotermico del tipo HWR [Vergne and Schmittbuhl, 2019].



6.2 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 6.4):

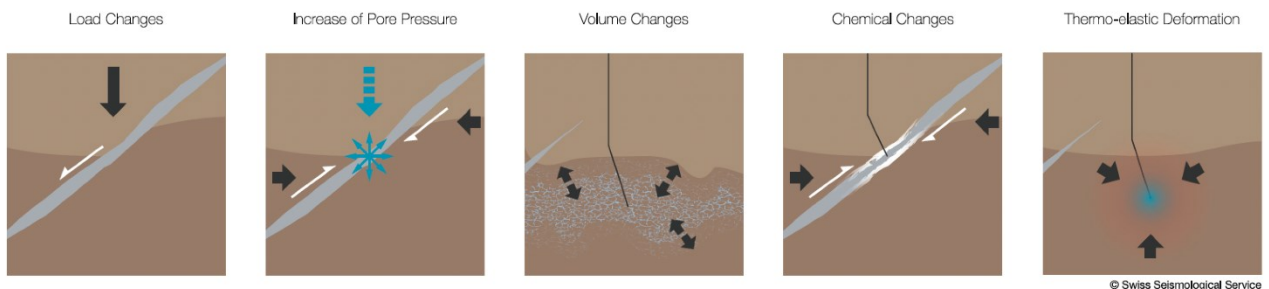


Figura 6.4. Meccanismi fisici, in grado di causare sismicità indotta [Kraft et al., 2020]

Variazioni delle pressioni di poro: 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 solido (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.

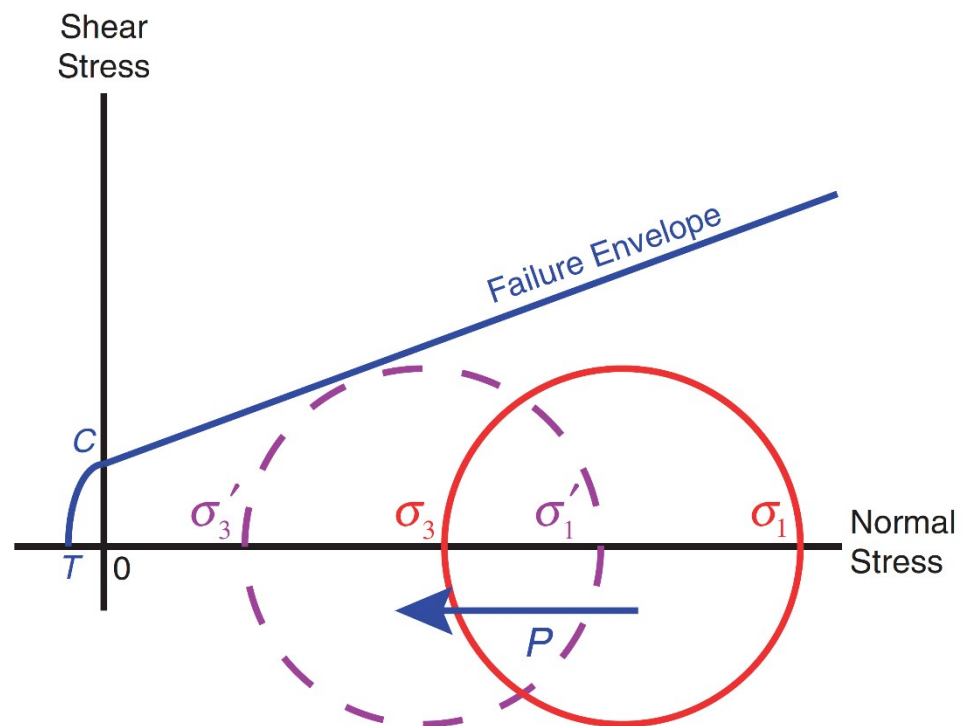
Alterazioni chimiche: Dovute alla presenza di fluidi idrotermali, deposizione di minerali o formazione di argille, possono essere causa di variazioni delle condizioni su faglie sottoposte ad uno stress tettonico. Se i legami chimici vengono indeboliti si possono innescare terremoti indotti, mentre in 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'innescamento 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 -> positivo, tensione T -> 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 6.5). 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 6.5. Diagramma di Mohr per l'iniezione dei fluidi ad elevata pressione [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 microfessure (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 6.1.

Concessione		Profondità	P _{idro} /bar	P _{total} /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 Illkirch (F)	✓	2700 m	270	305 (30.5)	35 (3.5)
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 <i>shut-in</i> fango perforazione

Tabella 6.1 Concessione: chiusa (†), operativa (✓), profondità, pressione idrostatica, totale e supplementare.

Uno studio di laboratorio realizzato da Kaiser [1950] riporta l'assenza di microfratture (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 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 (§ 6.5.7). 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 dello sforzo normale e a un incremento dello sforzo di taglio 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 § 6.5.3, § 6.5.4): 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 6.6).

Figura 6.6. Relazione tra volume iniettato e magnitudo [McGarr, 2014; modificato da Wiemer, 2018].

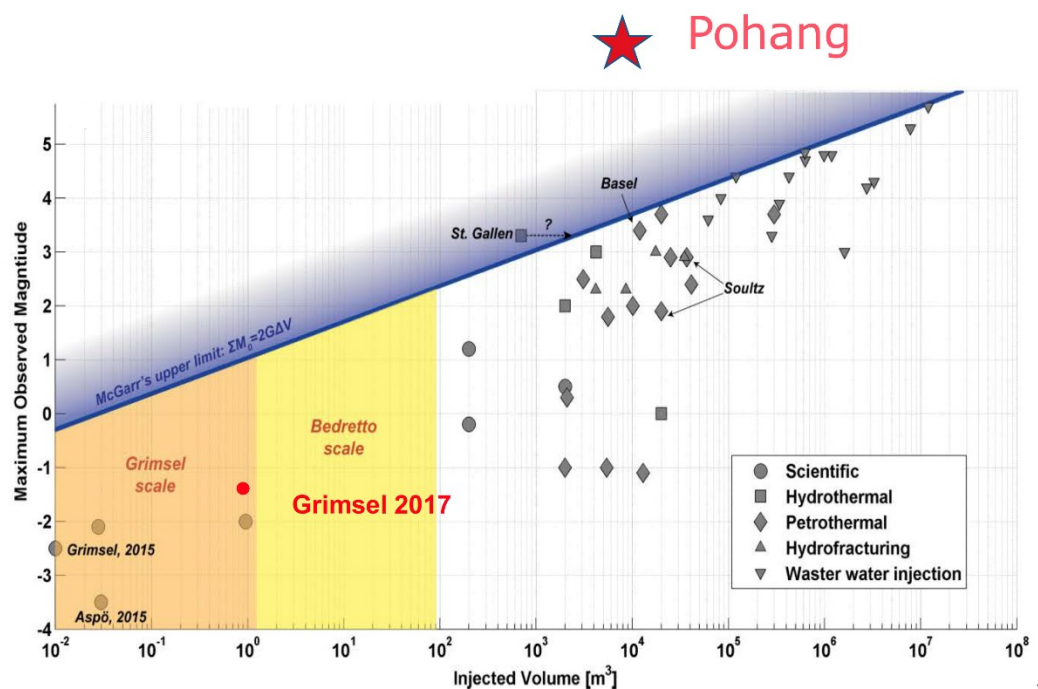
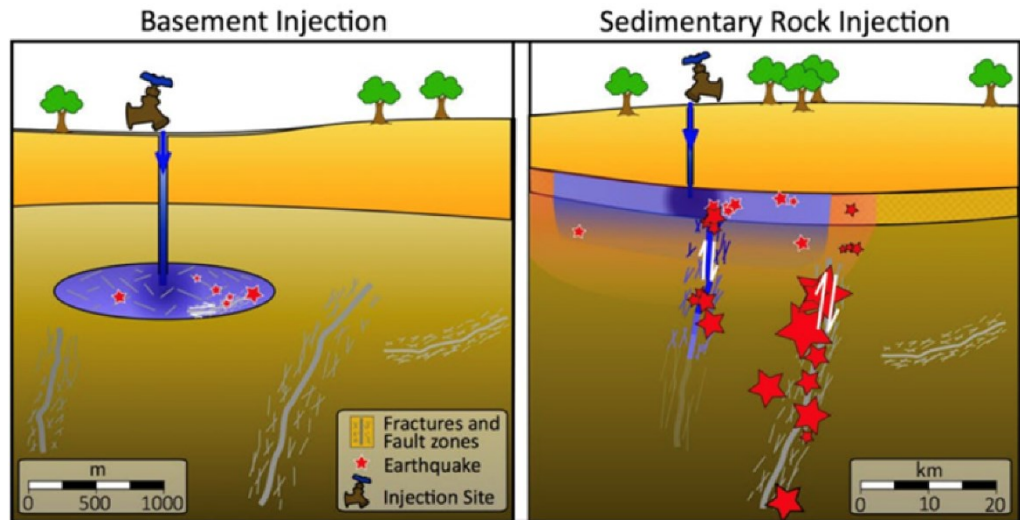


Figura 6.7. L'iniezione di fluidi in rocce sedimentarie, sovrastanti il basamento cristallino, può potenzialmente attivare un maggior numero di faglie, con eventi anche di magnitudo significative, rispetto all'iniezione diretta nel basamento cristallino stesso [Goebel and Brodsky, 2018].



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 un'elevata probabilità di attivare faglie sottostanti (Figura 6.7). La poro-elasticità, quindi, sembra essere la causa di induzione di terremoti nel basamento cristallino, anche se l'acqua viene iniettata dai sedimenti sovrastanti.

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

6.3.1 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:

- a) un rappresentante nazionale - DGS-UNMIG;
- b) un rappresentante regionale - Regione Toscana;
- c) un titolare della Concessione;
- d) un rappresentante della Struttura preposta al monitoraggio.

La composizione del COMITATO per impianti geotermici di competenza regionale non è attualmente definita. Considerando la rilevanza regionale, il rappresentante nazionale di DGS-UNMIG potrebbe essere eventualmente sostituito da (necessita un decreto RT):

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

Secondo gli ILG §9.4, le competenze dei singoli membri del comitato sono suddivise. 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.

La UNMIG, la Regione e il Concessionario, ciascuno per quanto di propria responsabilità e sulla base delle analisi della SPM, sono stati incaricati 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, M_L (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 M_L , 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.

6.3.2 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:

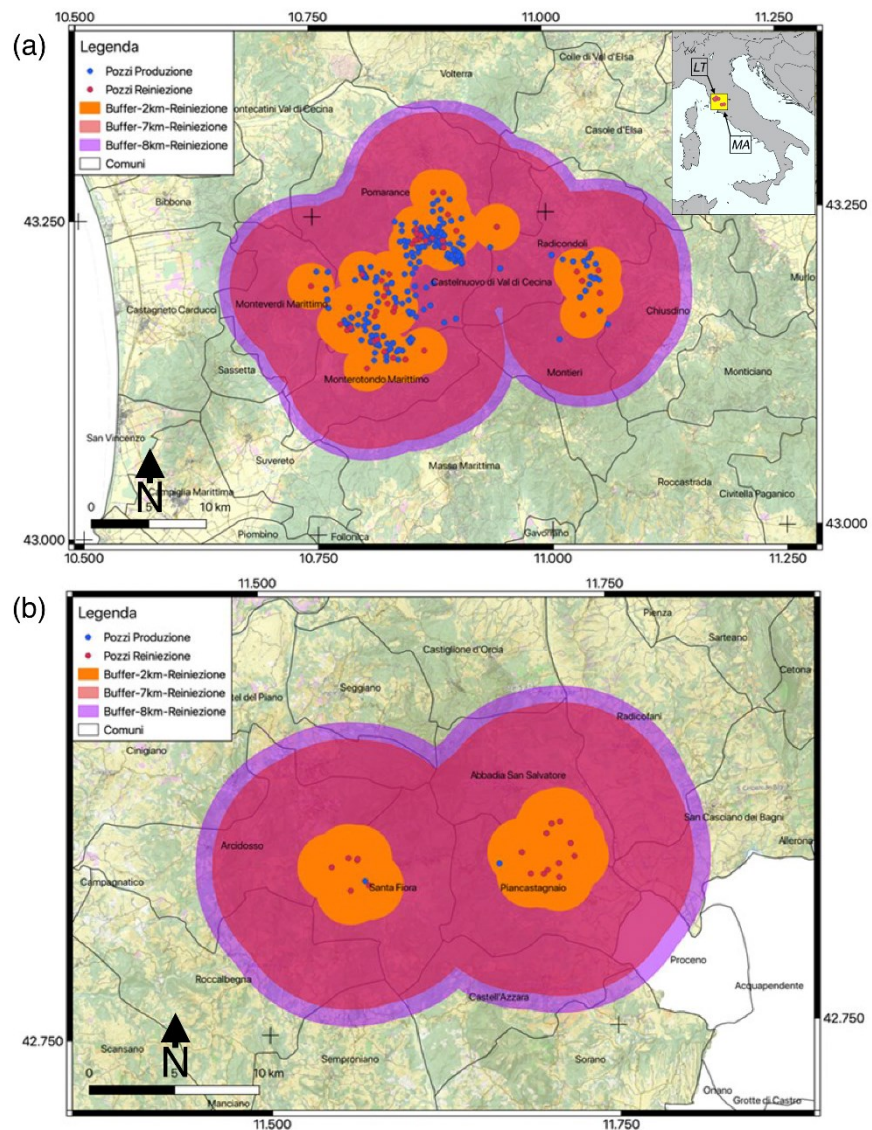
- soglie spaziali: ipocentro rispetto al dominio di monitoraggio e
- soglie parametriche: Magnitudo, PGV, PGA

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 6.8 illustra per le due aree di concessioni a Larderello-Travale e Monte Amiata, gestite da *ENEL Green Power*, i domini di monitoraggio, con un buffer di 2 km (arancione), 2+5 km (rosso) e 8 km intorno ai PRI.

Figura 6.8. 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);

<http://cms.ingv.it/sperimentazioni/geotermia-toscana>
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 6.9, Figura 6.10, Figura 6.11).

Figura 6.9. Livello di attivazione e stato corrispondente, definiti negli ILG [Dialuce et al., 2014, §9 Tab. 2].

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

Figura 6.10. Livelli di attivazione e parametri sismici definiti negli ILG [Dialuce et al., 2014, §9 Tab. 3].

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

Livello di attivazione	Azioni
0	Per il quadro complessivo delle azioni da intraprendere vedere il testo - par. 9.3 - 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 6.11. Livelli di attivazione e schema di intervento, definiti negli ILG [Dialuce et al., 2014, §9 Tab.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.

6.4 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 quando la sismicità indotta raggiunge un livello inaccettabile, in maniera tale da ridurre, fermare le operazioni EGS o 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 6.18), dove R rappresenta la distanza ipocentrale in chilometri).

$$\log PGV = -0.527 + 0.521 M_L - 1.058 \log(R) \quad \text{Eq. 6-1}$$

6.4.1 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.

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 Calibri) sono state tradotte SECONDO SCIENZA E COSCIENZA - e per maggiore funzionalità - 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 Competente (*) (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)

(*) L'UFFICIO COMPETENTE della Regione Toscana, l'equivalente della Bergbehörde, è L'UFFICIO MINIERE REGIONALE.

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

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 DIN 4150-3, 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
- 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 DIN 4150-3, 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.

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.

6.4.2 Regolamento Svizzera

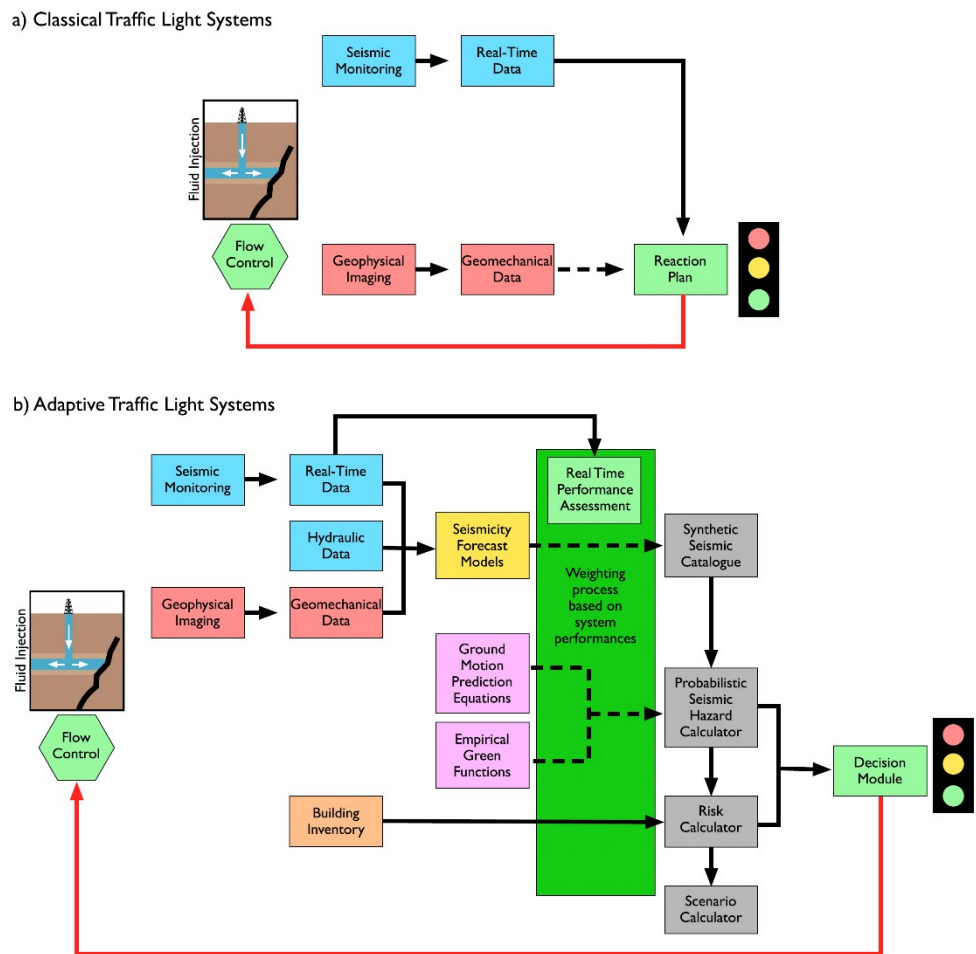
Come illustrato per esempio da Hirschberg et al. [2015] e Kraft et al. [2020] nella "Guida delle buone pratiche per la gestione della sismicità nei progetti di energia da geotermia profonda", in Svizzera vengono applicati e/o proposti due tipi di sistema a semaforo: (a) Sistemi TLS statici o tradizionali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

- a) L'applicazione di un *classical* TLS (tradizionali, Figura 6.12) 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 § 6.3.2, 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)

Figura 6.12. (a) TLS tradizionale (b) Advanced TLS [da Grigoli et al., 2017].



Il progetto EGS-Basilea adotta 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 (§ 6.5.5) 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 (§ 6.5.1) 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'imprevista 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 6.12). 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 pronosticano 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].

6.5 Esempi di sismicità indotta legati alla produzione geotermica

6.5.1 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 6.13). 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 idrocloridrico diluito, si è verificato un immediato aumento della microsismicità ($M \leq 1.2$) per una durata di 39 ore (Periodo 2; Figura 6.13). 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 6.13). 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* è terminata in data 25/07 con la chiusura definitiva del pozzo.

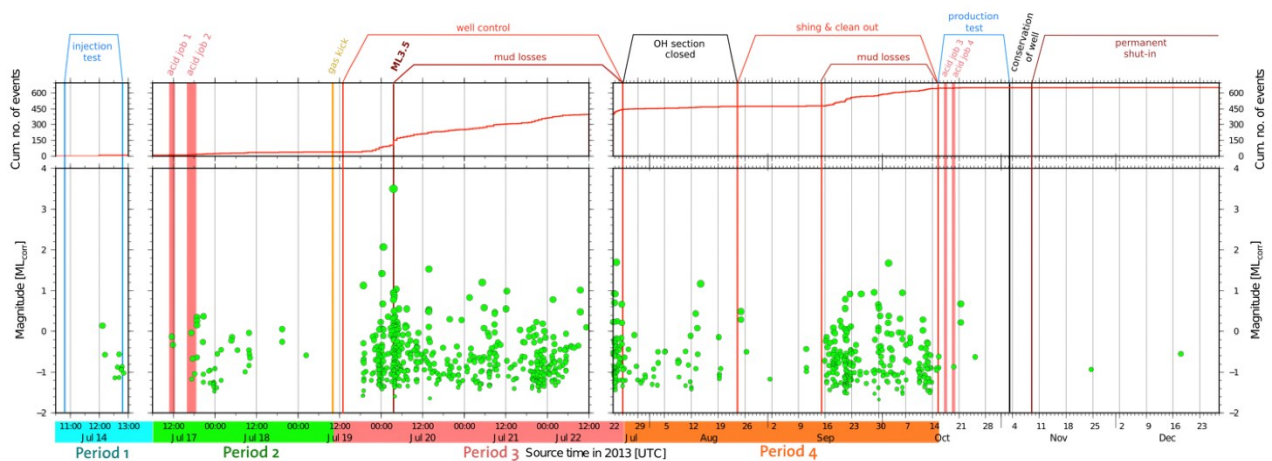


Figura 6.13. Evoluzione temporale (tempo in UTC) della sismicità indotta (magnitudo) in funzione della fase di operazione a St. Gallen [da Kraft et al., 2020].

In seguito, la continua osservazione di sismicità ha portato alla decisione di riaprire il pozzo per le operazioni di pulizia (periodo 4; Figura 6.13). 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].

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

Nella mappa delle anomalie geotermiche presenti in Francia (Figura 6.14), espresse come temperature (°C) a 5 km di profondità, evidenziano tre zone principali adatte per l'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 6.14) sono stati realizzati, avviati (✓) o fermati (†) i seguenti progetti operativi.

- HWR: Landau ✓, Insheim ✓, Bruchsal ✓, Rittershofen ✓, Illkirch ✓, Vendenheim † (§ 6.5.3)

- HDR: Sultz-sous-Forêts ✓, Basilea † (§ 6.5.5)

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

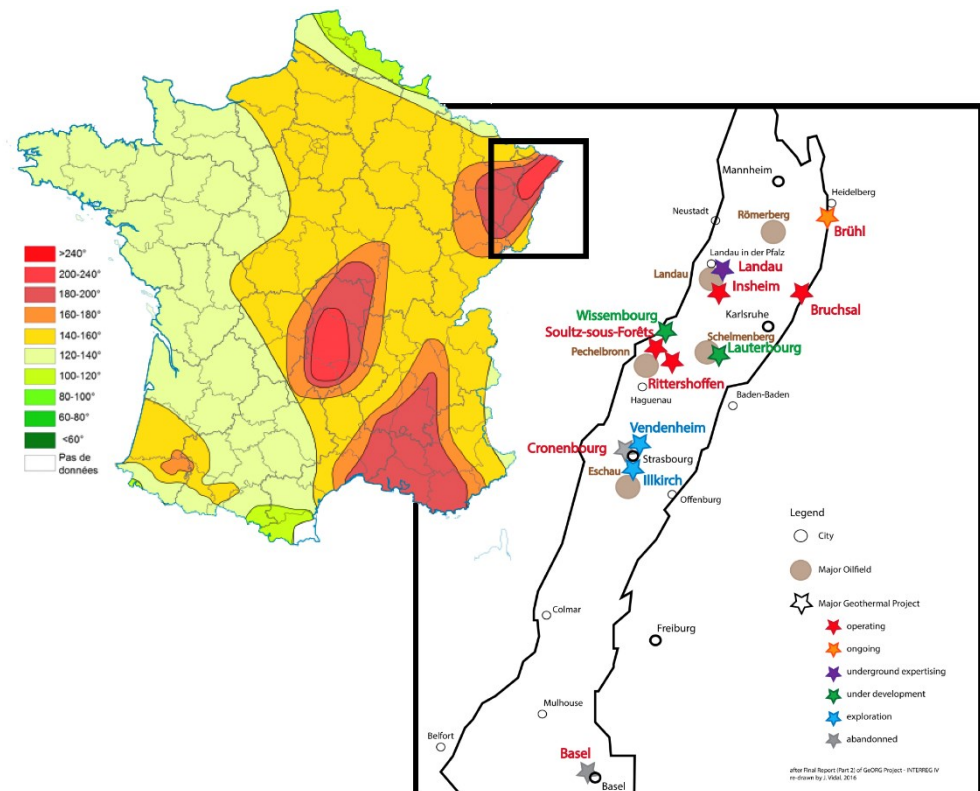
A Sultz-sous-Forêts (HDR) la centrale è diventata operativa a partire dal 2008, a seguito della perforazione di 3 pozzi fino nel basamento cristallino (5000 m) e una fase di stimolazione, in cui è stata registrata sismicità indotta in vicinanza dei pozzi [Calò et al., 2014]. I parametri operativi furono:

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 variano 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 6.14. 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].



6.5.3 Vendenheim (F) 26/06/2021 ML3.9

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 6.15). 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 6.15).

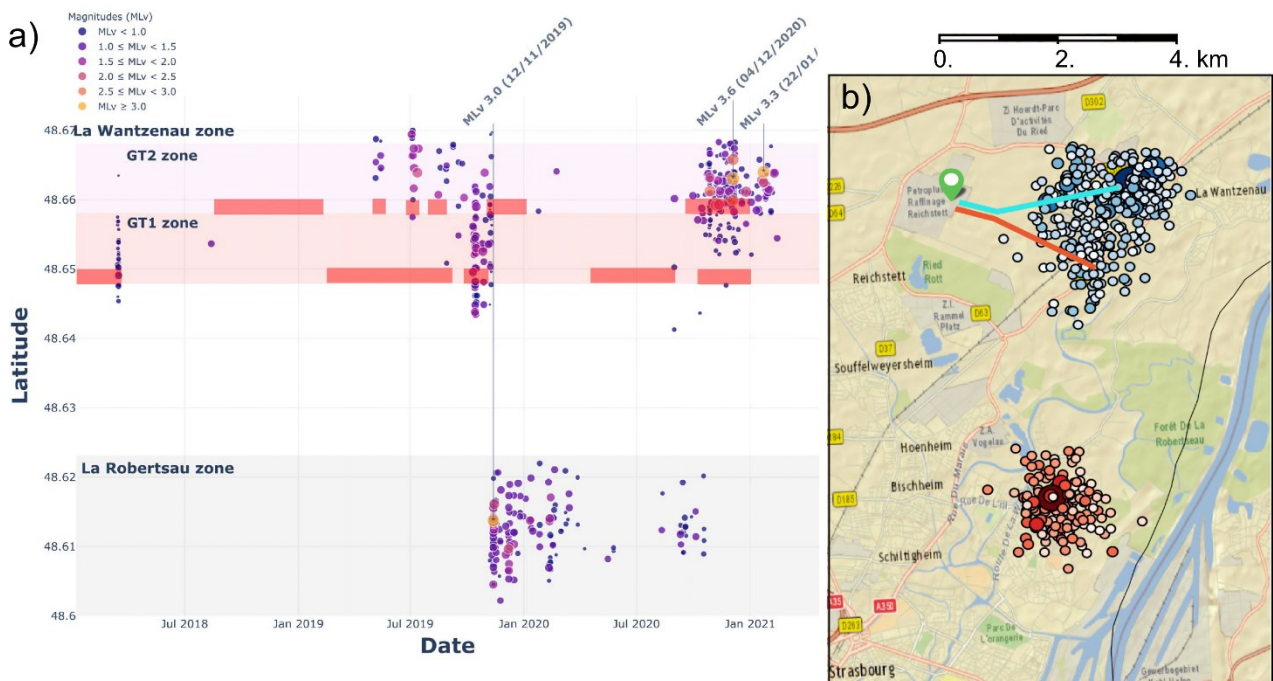


Figura 6.15. (a) Cronologia della sismicità registrata tra Marzo 2018 e Gennaio 2021 riportata in grafico rispetto alla latitudine geografica; (b) mappa epicentrale degli eventi registrati a seguito delle stimolazioni fatte al pozzo di iniezione GT-1 (rosso) e al pozzo di produzione GT-2 (azzurro) [da Schmittbuhl et al., 2021].

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.

6.5.4 Pohang (CR) 15/11/2017 $M_w5.4$

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 6.16) 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 6.16). 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 sviluppa 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 6.17), forse le condizioni non sarebbero state sufficienti per ridurre o sospendere le attività di iniezione.

Geotermia EGS in Hot Dry Rock ... in volume di roccia con presenza di faglie

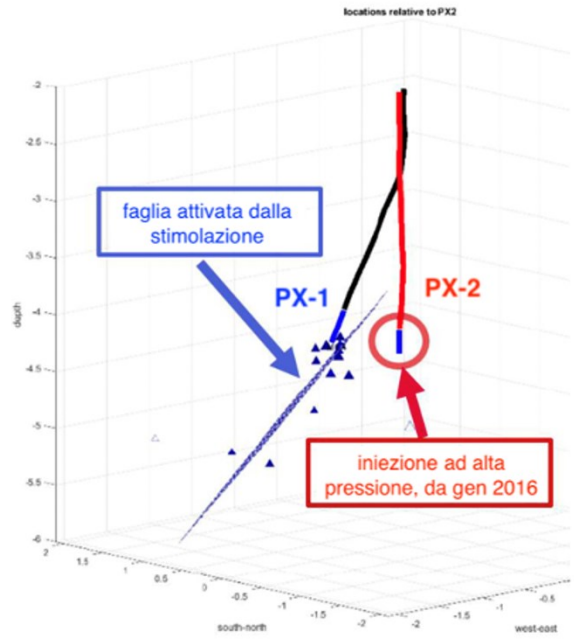
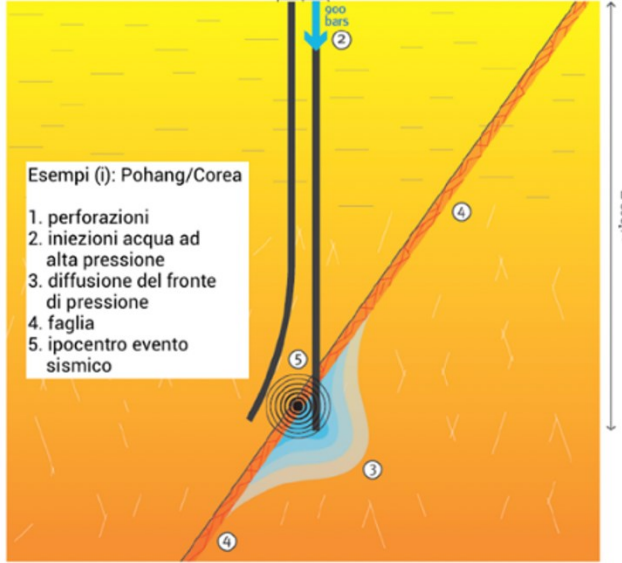


Figura 6.16. Schema di configurazione dei pozzi di produzione PX-1 (deviato) e di iniezione PX-2 (verticale), perforati fino ad una profondità di 4300 m, nell'ambito del progetto geotermico a Pohang (Corea del Sud) [Zingg and Meier, 2019].

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

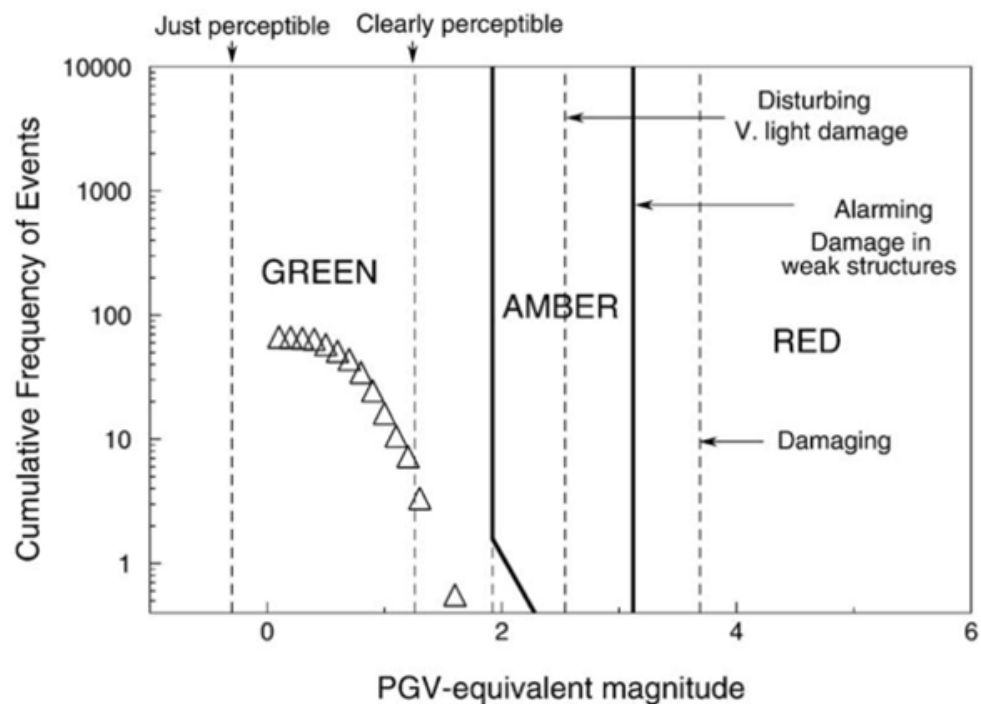
Figura 6.17. Sistema a semaforo usato durante le attività di stimolazione ciclica nel pozzo PX-1 a Pohang [Hofmann et al., 2019].

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*.

6.5.5 Basilea (CH) 2006

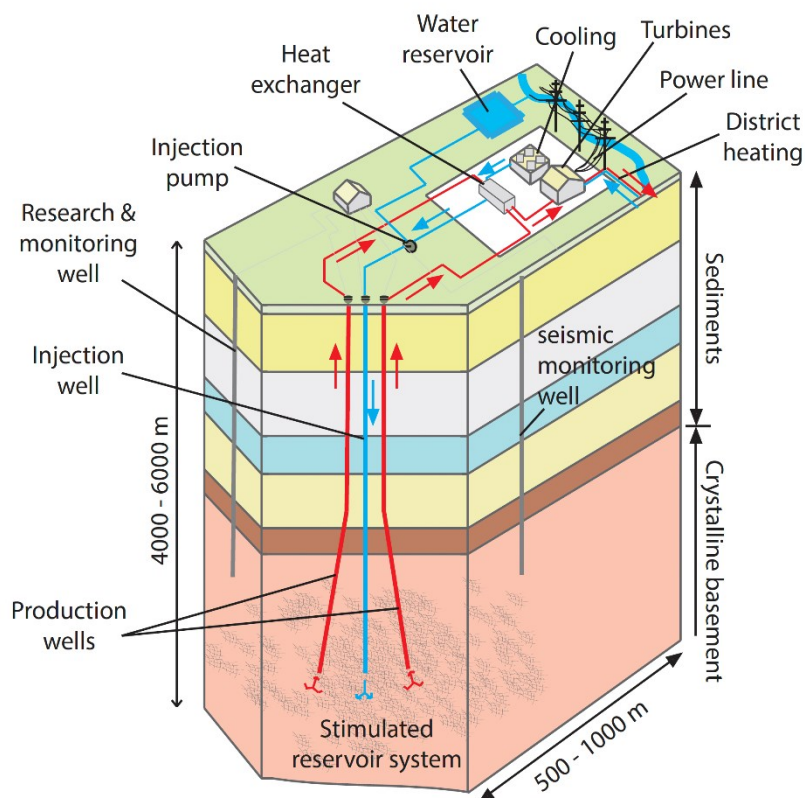
Un esempio di geotermia petrotermale (HDR) è il progetto *Deep Heat Mining* a Basilea (CH) (Figura 6.19). Era previsto di aumentare la permeabilità del *reservoir* all'interno del basamento cristallino, iniettando fluidi ad alta pressione per un lasso di tempo di almeno due settimane. A Febbraio del 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 6.18. TLS proposto in funzione di magnitudo, derivato da PGV [da 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 stato osservato 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.

Figura 6.19. Schema del sito geotermico di Basilea.
(Hirschberg et al., 2015)



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 (IEMS=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.

6.5.6 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 6.20). 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 6.20b). 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.

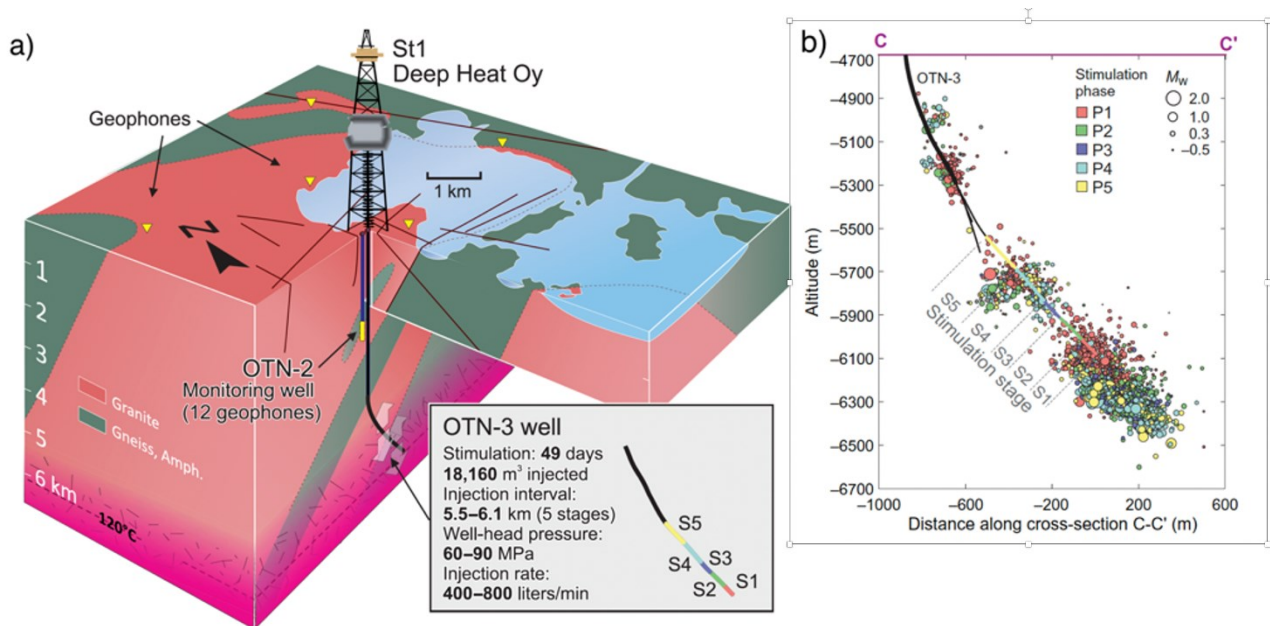


Figura 6.20. (a) Schema della perforazione del pozzo OTN-3; (b) ipocentri della sismicità indotta durante le 5 fasi di stimolazione (P1 – P5), da (Kwiatek et al., 2019).

La Figura 6.21 mostra per ogni fase (P1 – P5) l'evoluzione temporale dei seguenti parametri:

- 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).
- 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 $M_w > -0.5$
- Magnitudo locale M_L e magnitudo momento M_w . Eventi sismici 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 $M=2.0$.

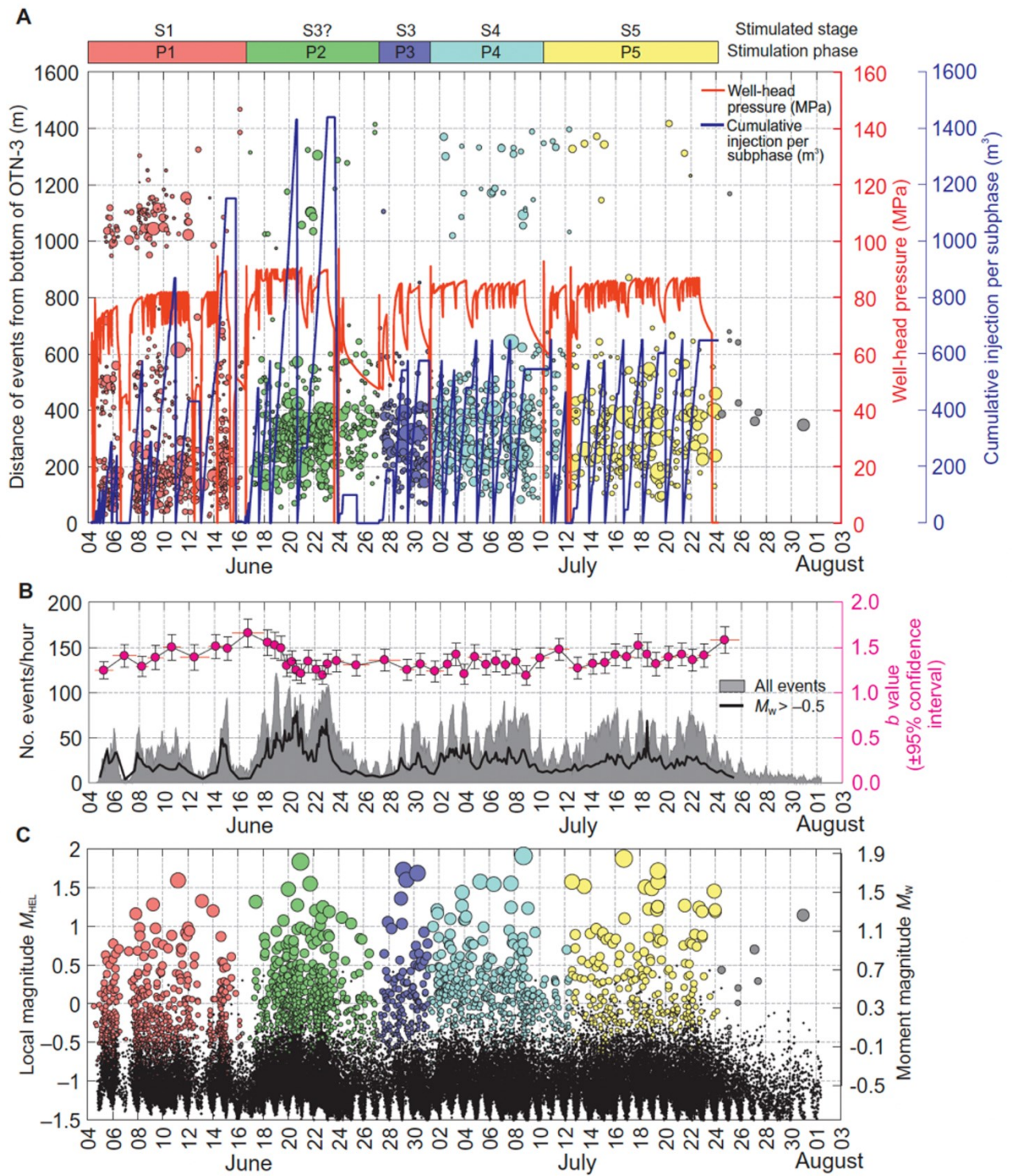
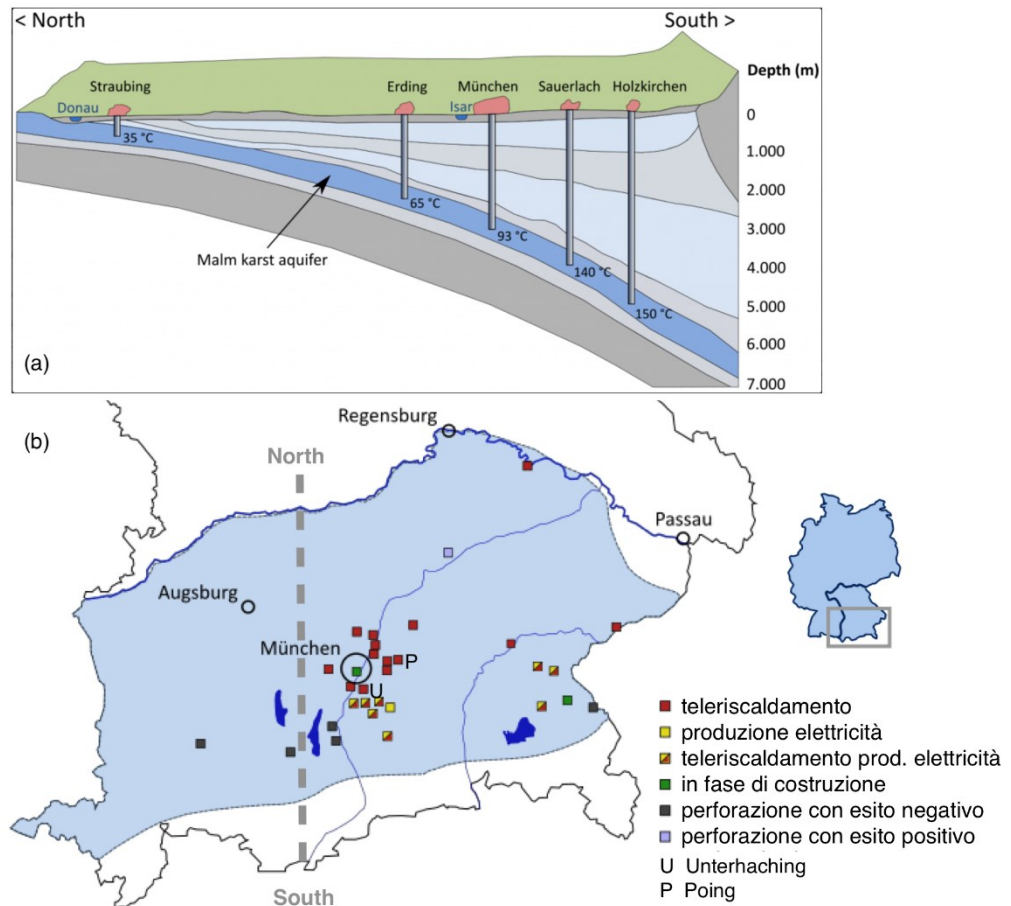


Figura 6.21. Evoluzione temporale per ogni fase (P1 – P5) dei parametri caratteristici descritti nel testo [Kwiatek et al., 2019].

6.5.7 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 6.22a 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 6.22b mostra con simboli colorati gli impianti geotermici che rappresentano il tipo di utilizzo.

Figura 6.22 (a) Profilo di profondità N-S della crosta superiore in Baviera; (b) mappa dei siti geotermici <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 ML2.4 (2008) durante i primi anni di esercizio, mentre a Poing (P) si sono verificati varie sequenze con magnitudo massima comprese tra $1.8 \leq ML \leq 2.1$ 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.

7 Considerazioni e proposte di monitoraggio sismico

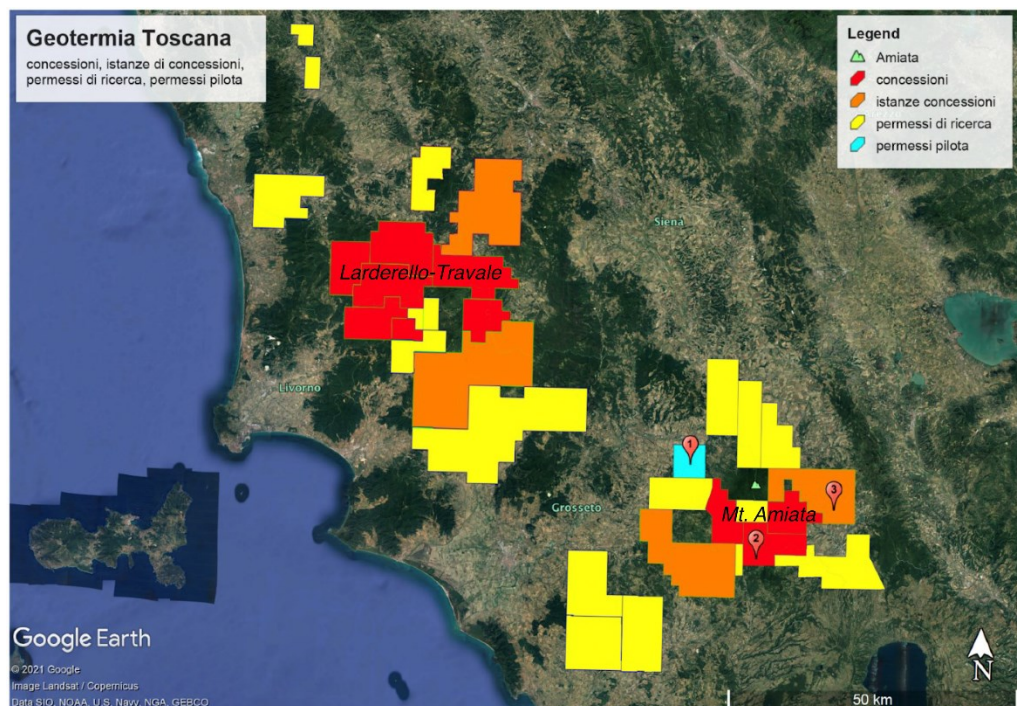
7.1 Implicazioni per le aree geotermiche di Larderello-Travale del Monte Amiata

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 7.1 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 Green Power*. Le concessioni dove è prevista ulteriore produzione di energia geotermoelettrica si trovano tutte nei dintorni del M. Amiata (Figura 7.1) 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 7.1 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].



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 dai 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.

7.1.1 Larderello - Travale

Senza entrare nel 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 EGP riportano i seguenti parametri ipocentrali:

Data	ora	min	sec	Lat (°N)	Lon (°E)	Prof (km)	Magnitudo
05/01/2018	05	16	58	43.23	10.93	7 km	$M_w 3.7$
05/01/2018	05	16	58	43.23729	10.94821	4.56 km	$M_L 3.87$

Tabella 7.1 Parametri ipocentrali del terremoto del 01-Mag-2018 a Castelnuovo di Cecina; M_w = Magnitudo Momento.

Per quanto riguarda la sismicità storica dell'area epicentrale delle Colline Metallifere il CPTI15 (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 EGP 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	Me
03/21/1925	7	33	40	43.227	10.871		5-6	4.29
10/19/1933	13	29	45	43.166	10.864		4-5	3.93
04/29/1946	0	6		43.267	10.879		6	4.63
08/19/1970	12	19		43.252	10.788		6	4.68
06/24/1990	5	52	31	43.186	10.815	0.5	4-5	3.56
08/06/1993	7	51	48	43.291	10.944	2.3	5-6	4.03
05/20/1998	11	7	42	43.081	10.81	7.5	4-5	4.19

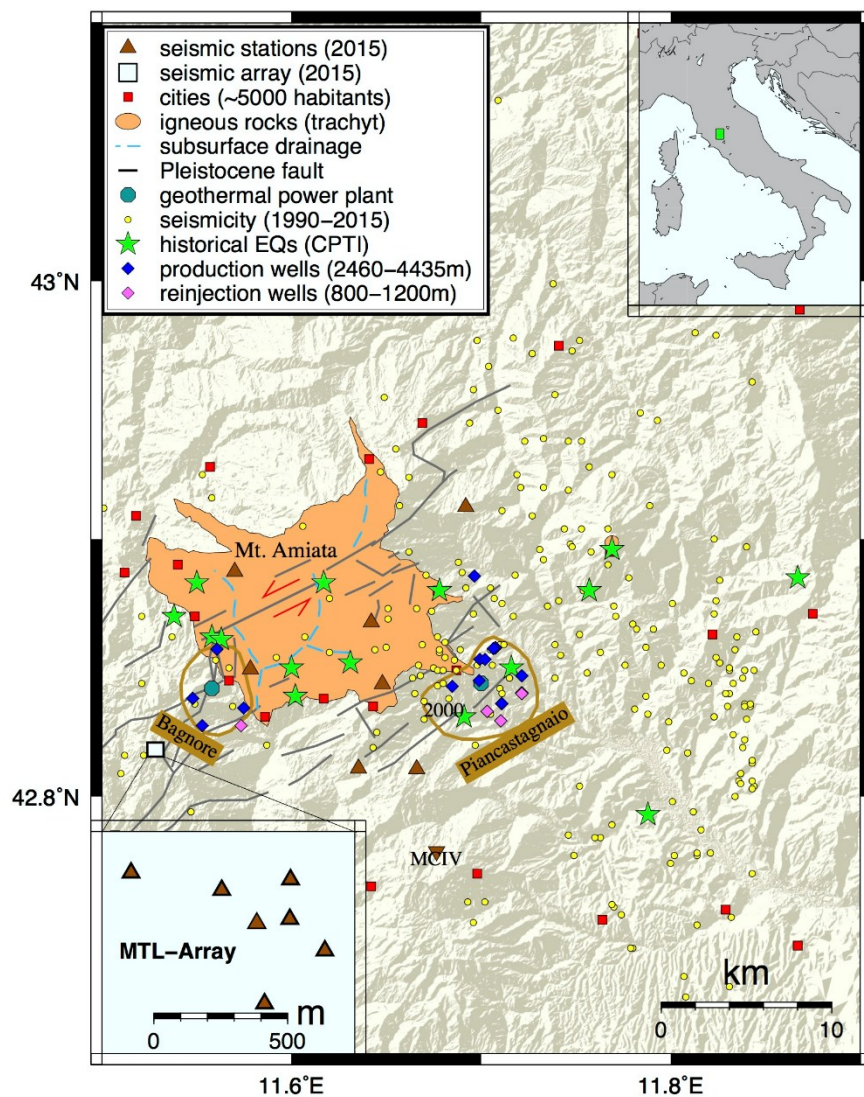
Tabella 7.2 Riepilogo degli eventi storici significativi nelle Colline Metallifere (CPTI15, Rovida et al., 2021).

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 7.2) 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>.

7.1.2 Monte Amiata

Nell'area del Mt. Amiata è prevista una prossima messa in esercizio di centrali geotermiche realizzate da operatori non-EGP (segnaposti 1, 2, 3, Figura 7.1). Questa futura estensione delle attività richiede un attento monitoraggio di eventuali variazioni dei parametri registrati, come per esempio la sismicità.

Figura 7.2 Mappa della sismicità registrata nell'area del Monte Amiata (1990 - 2015) [Braun et al. 2016].



Come evidente dalla Figura 7.2 la distribuzione areale della sismicità dal 1982 ad oggi, registrata tramite la rete sismometrica EGP 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].

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 7.3), 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 7.3 Elenco degli eventi estratti dal CPTI15_v3.0 per l'area orientale del M. Amiata. M_e = magnitudo equivalente.

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 7.2) sono considerate potenzialmente attive [es. Brogi and Fabbrini, 2009; Brogi et al., 2015; Piccardi et al., 2017].

7.2 “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 § 6.5) 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] (§ 6.3), 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 § 6.5.2).

Un esempio efficace di gestione reattiva (feedback) durante la fase di stimolazione è stata applicata nell'esplorazione del sito geotermico OTN-3 ad Otaniemi (§ 6.5.6). 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 (§ 6.5.3 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 (§ 6.5.3 Vendenheim, § 6.5.4 Pohang) che causa microsismicità lontana dal punto d'iniezione.
- Eventi straordinari di rischio di *blow-out*: entrata laterale nel pozzo di gas (§ 6.5.1, St. Gallen) o acqua (§ 6.5.5, 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 § 6.3) [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 attenzionati 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 (§ 6.3.2)
- 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 e rimane compito dei restanti componenti del COMITATO, in quanto è una decisione politica.

7.3 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 di 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 7.4 Esempio di relazione tra intensità macrosismica, PGV e PGA., tradotto da 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 7.3). Tale schema si basa su una combinazione tra un TLS in uso a Monaco in Baviera e la norma tedesca DIN 4150-3, 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.

Figura 7.3 Proposta di uno "schema di comunicazione" da applicare al monitoraggio Geotermia Toscana.

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

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 DIN 4150-3, 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 $M < 2$; $I_{EMS98} = I$; $PGV < 0.17 \text{ mm/s}$
2 - <u>Attenzione</u> con segnalazione al Concessionario, eventi percepiti con $M < 2$; $I_{EMS98} = \text{II-III}$; $PGV \geq 1 \text{ mm/s}$
3 - <u>Attenzione con</u> segnalazione al Comitato/UC, eventi percepiti con $M \geq 2$; $I_{EMS98} \geq \text{IV}$; $PGV \geq 1.4 \text{ mm/s}$
4 - <u>Allerta DIN 4150-3</u> con segnalazione al Comitato/UC, eventi percepiti $M \geq 2$; $I_{EMS98} > \text{V}$; $PGV > 5 \text{ mm/s}$
5 - <u>Allerta Rossa con</u> segnalazione al Comitato/UC eventi percepiti $M \geq 2$; $I_{EMS98} \geq \text{VII}$; $PGV > 9.2 \text{ mm/s}$

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.

8 Conclusioni e raccomandazioni

8.1 Conclusioni

Gli obiettivi dell'accordo di collaborazione scientifica tra la RT e INGV dal titolo "Costituzione di un sistema di monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane", sono suddivisi nei seguenti 5 *work packages* (WP), illustrati in Figura 1.1.

WP1 - Management

WP2 - Pianificazione e realizzazione della rete sismica

WP3 - Acquisizione dati sismici

WP4 - Monitoraggio e analisi dati

WP5 - Disseminazione/divulgazione dei risultati

Alla data di conclusione del presente ACS sono attualmente tre reti contribuenti a costituire la rete sismica integrata: (i) da stazioni sismiche della RSN dell'INGV, (ii) dell'array sismico MALA installato nei pressi di Montalcino e (iii) delle stazioni appartenenti alla rete sismica di EGP. Dovuto a problemi di disponibilità dell'hardware, è necessario completare l'aggiornamento della strumentazione di MALA, appena ricevuta la fornitura della strumentazione ordinata. Con questo, il WP2 può essere considerato concluso.

Per quanto riguarda il WP3, i dati attualmente acquisiti presso CAD-BO, provenienti dalle stazioni RSN (IV) e dall'array MALA, come anche i *datastream* provenienti dalla rete EGP, vengono regolarmente archiviati, secondo gli standard protocollo CAPS. Tale protocollo di archiviazione garantisce una gestione di dati sensibili non-pubblici, provenienti da reti differenti, rispettando la privacy. Gli obiettivi del WP3 sono stati raggiunti.

Relativo al WP4, l'infrastruttura presso il CAD-BO è pronta per avviare, con l'inizio della prosecuzione dell'ACS tra Regione Toscana e INGV, il monitoraggio sismico standard attraverso dei turni di sorveglianza giornalieri (vedi §4.2), completo di invio del bollettino sismico (entro 48 ore), come previsto dagli ILG. Per ciò che concerne il WP5, la divulgazione e la disseminazione delle attività e dei risultati, è consultabile una pagina WEB dedicata cms.ingv.it/sperimentazioni/geotermia-toscana che è in progressivo aggiornamento.

In previsione della futura applicazione del monitoraggio che implica la definizione di un cosiddetto Comitato, composto da Concessionari, SPM, Regione Toscana ed eventuali amministratori locali (§6.3.1), sono stati proposti dei domini di monitoraggio

(§6.3.2) per le aree di Larderello Travale e Monte Amiata e delle soglie per un sistema di comunicazione (§7.3).

A partire da gennaio 2023, EGP, l'attuale unico concessionario operativo nelle aree geotermiche toscane, ha iniziato a trasmettere i dati dei pozzi di produzione e di reiniezione.

Conclusione: Tutti gli obiettivi definiti nel diagramma Gantt (Figura 1.1) sono stati raggiunti.

8.2 Attività di ricerca finalizzata al monitoraggio

Al fine di migliorare le capacità analitiche di questa SPM si prevede l'attivazione di una linea di ricerca finalizzata al miglioramento delle conoscenze geologiche di sottosuolo delle aree interessate dall'attività di sfruttamento della risorsa geotermica. L'attività sarà svolta per migliorare le conoscenze sia dal punto di vista stratigrafico che strutturale, in particolare per quanto riguarda la presenza di potenziali strutture tettoniche attive.

La conoscenza di potenziali sorgenti sismogenetiche e la definizione delle loro relazioni con il serbatoio geotermico, il campo di stress in atto e l'assetto geologico superficiale rappresenta un presupposto fondamentale per le valutazioni di pericolosità geologiche, ed in particolare di sismicità indotta da variazioni del campo di stress dovute alle diverse fasi operative dell'attività di sfruttamento della risorsa geotermica. In particolare, la reiniezione di fluidi rappresenta una delle cause più comuni di sismicità indotta, soprattutto per fenomeni legati all'aumento della pressione di poro, che causa una diminuzione dello sforzo normale efficace su faglie preesistenti promuovendone il movimento (Hubbert and Rubey, 1959; Husen et al., 2007; McGarr, 2014). Un altro fenomeno dominante per la generazione di sismicità indotta nel caso di centrali geotermiche ad alta entalpia (es. Larderello e Monte Amiata) che non necessitano di particolari sovrappressioni per la reiniezione dei fluidi è la deformazione termo-elastica. In questo caso il contrasto di temperatura dovuto ai fluidi freddi immessi nel sottosuolo provoca infatti uno stress termico che influenza la stabilità meccanica del mezzo attraversato (Ghassemi, 2012; Jeanne et al., 2014). Durante la stimolazione idraulica di sistemi geotermici profondi, un altro meccanismo che può indurre sismicità durante e dopo le operazioni di iniezione di fluidi è la redistribuzione dello stress dovuto al movimento lungo faglie e fratture (De Simone et al., 2017). In questi casi, il flusso preferenziale dei fluidi immessi nel sottosuolo lungo fratture conduttive o zone di faglia provoca perturbazioni di pressione e temperatura

che determinano variazioni fortemente anisotrope del tensore di stress locale, che tende a stabilizzare alcune faglie/fratture e a destabilizzare altre.

La definizione e la caratterizzazione dei sistemi di faglia e fratture presenti nel sottosuolo risulta dunque un presupposto fondamentale per lo studio della sismicità indotta, sia per il rischio di possibili rotture lungo faglie pre-esistenti, sia perché possono rappresentare zone ad alta trasmissività idraulica che promuovono la migrazione laterale e verticale delle perturbazioni di pressione (Evans et al., 2012). L'esempio recente più eclatante di sismicità indotta legata allo sfruttamento geotermico è il terremoto di M_w 5.4 avvenuto a Pohang, in Corea del Sud nel 2017 (e.g. Grigoli et al., 2018; §6.5.4), a seguito di iniezione di fluidi ad elevate pressioni in fase di stimolazione del serbatoio che ha provocato la riattivazione di una faglia pre-esistente nel basamento sottostante. Tuttavia, l'esperienza avuta nell'utilizzo idrotermale di un acquifero naturale profondo nel bacino di avampaese Alpino nord-orientale, ha dimostrato che anche campi geotermici non stimolati in pressione possono generare terremoti poco profondi (in tal caso con $M_l < 2$), anche in ambienti a bassa pericolosità sismica (Megies e Wassermann, 2014; §6.2, §6.5.7). Studi di dettaglio condotti per meglio investigare il volume di crostale interessato dalla microsismicità registrata (reinterpretazione di profili sismici 2D e acquisizione di sismica 3D ad alta risoluzione), hanno permesso di evidenziare la presenza di una faglia sepolta favorevolmente orientata all'interno dell'attuale campo di stress.

In zone sismicamente attive, come l'Italia, risulta quindi ancor più necessaria una conoscenza approfondita degli elementi strutturali presenti in profondità e in particolare, dei sistemi di faglia attivi e delle loro caratteristiche sismogenetiche al fine di valutare il potenziale innesco di terremoti.

La definizione delle caratteristiche geometriche del *reservoir* (volume, compartimentalizzazione, e campo di fratturazione) e le proprietà petrofisiche degli orizzonti stratigrafici attraversati (ad es., porosità e permeabilità primaria e secondaria) risultano inoltre propedeutici per simulazioni del flusso del fluido e per elaborare un modello geomeccanico che consenta di stimare l'estensione e l'entità delle perturbazioni dello stress prodotte dalle possibili azioni di sfruttamento geotermico (ad es., variazioni del campo di pressione e temperatura) e gli effetti di tali perturbazioni sulle eventuali faglie presenti. In diverse aree sottoposte a sfruttamento (sia petrolifero che geotermico), tali simulazioni sono state applicate per valutare il potenziale sismogenetico durante le fasi di estrazione/iniezione e/o per distinguere la sismicità indotta da quella naturale (Juanes et al., 2016; Schiavone et al., 2020).

Le recenti esperienze di questa SPM raccolte nell'ambito del monitoraggio del campo a olio della Val d'Agri in Basilicata (concessione Val d'Agri) evidenziano come il

monitoraggio/studio dei fenomeni di sismicità indotta necessita non solo di reti sismiche locali ad alta densità che permettono la registrazione e localizzazione accurata di eventi anche di bassissima magnitudo ($M_L < 1$), ma anche di una approfondita conoscenza della geologia di sottosuolo che evidenzia la presenza di faglie pre-esistenti, il cui movimento può essere favorito dalle operazioni di iniezione e che possono interagire con le strutture tettoniche attive dell'area. Gli studi dell'INGV in Val d'Agri hanno dimostrato infatti, che l'intensa sismicità di bassa magnitudo ($M_L < 2.7$) registrata dalla RSN (INGV) nell'area a partire dal 2006 è prevalentemente di origine indotta, riconducendola sia alle variazioni dell'invaso artificiale del Pertusillo (Valoroso et al. 2009; Improta et al., 2017) sia alla re-iniezione di acque di strato dei giacimenti di idrocarburi nel pozzo Costa Molina 2, presso Montemurro (Buttinelli et al., 2016). In quest'ultimo caso, l'analisi congiunta della micro-sismicità e la ricostruzione dell'assetto stratigrafico-strutturale del sottosuolo avvenuto attraverso l'interpretazione di dati geofisici messi a disposizione dal concessionario (in particolare profili sismici a riflessione e dati di pozzo) hanno consentito di discriminare e delineare tra 2 e 5.5 km di profondità una faglia pre-esistente "*critically stressed*" all'interno del *reservoir* carbonatico che presumibilmente agisce come via preferenziale per la migrazione dei fluidi e la diffusione differenziale della pressione di poro. Inoltre, l'analisi dello *slip-tendency* eseguita sui principali sistemi di faglia coinvolti nella sismicità indotta attraverso modelli numerici geo-meccanici e di flusso del fluido, ha consentito di evidenziare le faglie più suscettibili ai cambiamenti di stress indotti dall'iniezione e il ruolo delle diverse faglie nella compartimentalizzazione del *reservoir* e quindi nella redistribuzione dello stress (Vadacca et al., 2020). Proieguo del progetto è quello di capire la relazione tra la struttura illuminata e i sistemi di faglie normali Quaternari che bordano il bacino della Val d'Agri per una valutazione dell'*hazard* sismico.

Nell'ambito del monitoraggio delle aree geotermiche Toscane, l'intento di questa SPM è quello di integrare la propria attività con una analisi sismotettonica e geomeccanica delle aree di studio che potrà essere effettuata mediante l'analisi e l'interpretazione di dati pubblici e privati, messi a disposizione del concessionario, quali dati geofisici di sottosuolo (profili sismici a riflessione e dati di pozzo), dati microsismici, deformazioni superficiali e dati di produzione e re-iniezione. L'analisi congiunta di questi dati consentirebbe di investigare le relazioni esistenti tra attività di iniezione, migrazione dei fluidi e sismogenesi delle aree studiate.

Va ricordato a tale proposito che le aree geotermiche oggetto di studio, sono localizzate in zone tettonicamente attive, interessate da una prolungata attività vulcanica con risalita di magma lungo zone di trasferimento orientate NE-SW, con strutture vulcano-tettoniche sovrapposte a più complesse e meno note strutture

tettoniche attive, alcune delle quali responsabili della formazione di depressioni tettoniche riempite di depositi continentali e marini Plio-Quaternari (Liotta et al., 2015; Brogi et al., 2020).

La ricostruzione dell'assetto stratigrafico-strutturale, ed in particolare la ricostruzione delle relazioni esistenti tra le potenziali strutture sismogenetiche e il *reservoir* geotermico, risulta dunque di fondamentale importanza sia in termini di *hazard* sismico che per l'elaborazione di un modello di velocità 3D utile ad una più accurata stima delle localizzazioni ipocentrali degli eventuali eventi registrati nell'area.

8.3 Outlook

Per quanto riguarda la geotermia, l'iniezione dei fluidi all'interno di un volume crostale può indurre sismicità, in funzione delle pressioni e delle portate in gioco. Specialmente processi di stimolazione con l'obiettivo di creare connessioni idrauliche lungo zone di alta permeabilità (faglie) meritano un attento monitoraggio

Come accennato nel §2.1, in Italia, le attuali concessioni per l'utilizzo delle risorse geotermiche scadranno nel 2024. Alla prossima aggiudicazione parteciperanno - oltre *ENEL Green Power* - anche soggetti del mercato libero, che potrebbero 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, con reti sismiche integrate molto dense inclusi sismometri in pozzo (messe a disposizione da tutti gli operatori), 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. Specialmente nella fase di apertura di nuovi impianti è indispensabile realizzare l'analisi in tempo reale della sismicità insieme ai dati di produzione/iniezione (volumi, pressioni, portate),

Su iniziativa della Regione Toscana, nel 2020 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, incarico con durata triennale rinnovato a seguito delle ratifiche delle rispettive amministrazioni della RT e INGV.

Considerando che alcuni degli impianti di produzione geotermica sono di competenza nazionale (progetti pilota) e quindi regolamentati dagli ILG nazionali (Dialuce et al., 2014) e LGEO (Terlizzese, 2016) alla Regione Toscana si presenta la necessità di dover definire le linee Guida da applicare al monitoraggio delle concessioni di propria competenza. Tale necessità concerne sia la composizione dei componenti del

comitato, che lo sviluppo di un protocollo di reazione utile all'implementazione delle future linee guida regionali per il monitoraggio delle attività geotermiche.

Glossario

ACS:	Accordo di Collaborazione Scientifica
CAD-BO:	Centro Acquisizione Dati - Bologna
CMS:	Centro di Monitoraggio per le attività di Sottosuolo
CPTI15:	Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (2015_v3, Rovida et al., 2021):
DIR:	Dominio Interno di Rilevamento
EGP:	Enel Green Power
GB:	GigaByte
ILG:	Indirizzi e Linee Guida per il Monitoraggio della sismicità delle Deformazioni del Suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche
INGV:	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
IV:	Sigla rete RSN
MATTM:	Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio del Mare
MiSE:	Ministero dello Sviluppo Economico
ML:	Magnitudo locale
PGA:	Peak Ground Acceleration
PGV:	Peak Ground Velocity
PRI:	Pozzo di Reiniezione
RT:	Regione Toscana
RSN:	Rete Sismica Nazionale (INGV)
SC:	SeisComP
SPM:	Struttura Preposta al Monitoraggio
TB:	TeraByte
Bundesberggesetz BBergG:	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:	L'UFFICIO MINIERE REGIONALE - 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
LLC: Lower Left Corner (angolo a SW)
MASE: Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica
MISE: Ministero dello Sviluppo Economico
MITE: Ministero per la Transizione Ecologica
MATM: 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
URC: Upper Right Corner (angolo a NE)

Bibliografia

Atkinson B.K., (1984). Subcritical crack growth in geological materials. *J. Geophys. Res.: Solid Earth* (1978–2012), 89(B6), 4077–4114, doi: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), 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.*, 152:160–170

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*, p. 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), 287–306.

Bosman K., Baig A., Viegas G., and Urbancic T., (2016). Towards an improved understanding of induced seismicity associated with hydraulic fracturing. *First Break*, 34, July 2016 special topic Passive Seismic 1 ESG Solutions.

Braun T., Caciagli M., Carapezza M., Famiani D., Gattuso A., Lisi A., Marchetti A., Mele G., Pagliuca NM, Ranaldi M, Sortino F, Tarchini L, Kriegerowski M, 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* 359:21–36. <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., Kuhn D., Martirosian-Janssen A., Dahm T. (2018b): Anthropogenic seismicity in Italy and its relation to tectonics: state of the art and perspectives. *Anthropocene* 21: 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, 1–91. <https://doi:10.1007/s10950-019-09901-7>

Braun T., Famiani D., Caciagli M., Cesca S., Heimann S. & 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.

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>.

- Brogi A. and Fabbrini L. (2009): Extensional and strike-slip tectonics across the Monte Amiata - Monte Cetona transect (northern Apennines, Italy) and seismotectonics implications. *Tectonophys.*, 476, 195-209.
- Brogi 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, 219-236, doi: 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, B11301, doi: 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 (2014) 50–58.
- 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. unmig.mise.gov.it/unmig/agenda/upload/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*, doi:10.1002/2017 JB014473.
- Fortinet (2023): <https://www.fortinet.com/resources/cyberglossary/>
- Gibowicz S.J., and Lasocki S., (2001). Seismicity induced by mining: Ten years later. *Advances in Geophysics*, 44, 39–181.
- 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, 310–340. doi: <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, 469–495. doi:10.1016/j. geothermics.2008.06.002
- Hill D.P. and Prejean S.G., (2007). Dynamic triggering. In: *Treatise on Geophysics*, 4, Earthquake Seismology, Schubert G. (Ed.), 257–292, Elsevier, Amsterdam.
- Hirschberg S., Wiemer S., and Burgherr P. (2015). *Energy from the Earth Deep Geothermal as a Resource for the Future? A-SWISS Study TA/CD 62/2015*, vdf Hochschulverlag AG, Zurich, Switzerland. Editor: Stefan Hirschberg, Stefan Wiemer, Peter Burgherr. ISBN: 978-3-7281-3654-1.
- Hofmann H., Zimmermann G., Farkas M., Huenges E., Zang A., Leonhardt M., Kwiatak 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, 926–949 doi: 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, 1126– 1134.
- Hutton, L.K., & M. Boore (1987). The ML scale in Southern California. *Bull. Seism. Soc. Am.* 77, 2074-2094. Richter C.F. (1935): An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. Seism. Soc. Am.* 25, 1–31.

- INGV (2018a): Supporto scientifico per la valutazione del monitoraggio sismico operato dalle reti ENEL - GREEN POWER nelle aree geotermiche di Larderello – Travale ed Amiata. T. Braun & D. Famiani: Prima relazione (7 Luglio 2018) nell'ambito della convenzione RT-INGV del 13 Giugno 2018; 6 pp.
- INGV (2018b): Supporto scientifico per la valutazione del monitoraggio sismico operato dalle reti ENEL - GREEN POWER nelle aree geotermiche di Larderello – Travale. T. Braun & D. Famiani: Seconda relazione (28 Novembre 2018) nell'ambito della convenzione RT-INGV del 13 Giugno 2018; 14 pp.
- INGV (2019): Supporto scientifico per la valutazione del monitoraggio sismico operato dalle reti ENEL - GREEN POWER nelle aree geotermiche di Larderello – Travale. T. Braun & D. Famiani: Terza Relazione (29 Novembre 2019) nell'ambito della convenzione RT-INGV del 13 Giugno 2018; 20 pp.
- INGV (2021): Supporto scientifico per la valutazione del monitoraggio sismico operato dalle reti ENEL - GREEN POWER nelle aree geotermiche di Larderello – Travale. T. Braun & D. Famiani: relazione finale (14 Giugno 2021) nell'ambito della convenzione RT-INGV del 13 Giugno 2018; 25 pp
- 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, 102577, 13pp. <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. 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. DOI: 10.1126/sciadv.aav7224).
- Lisi A., Marchetti A., Frepoli A., Pagliuca N.M., Mele G., Carapezza M.L., Caciagli M., Famiani D., Gattuso A. & Braun T. (2019): Microseismicity analysis in the geothermal area of Torre Alfina, Central Italy. *J. Seismology*; <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), 643–696.
- Megies T., and Wassermann J., (2014). Microseismicity observed at a non-pressure stimulated geothermal power plant. *Geothermics*. 52, 36-49. Doi 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, 867 – 882. DOI: 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.
- Peterson, J. R. (1993): Observations and modeling of seismic background noise. U.S. Geological Survey Open-File Report. 93-322. Doi: 10.3133/ofr93322.
- 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 Tusciana Province (southern Tuscany - northern Latium, Italy). *Quat. Int.*, 451, 11-36.

- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P., Antonucci A. (eds) (2021): Italian Parametric Earthquake Catalogue (CPTI15), version 3.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.3>.
- 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).
- 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. Sciences de la Planète.* doi.org/10.5802/crgeos.71. Special Issue: Seismicity in France.
- Seed Manual (2012): Standard for the Exchange of Earthquake Data, SEED Format Version 2.4, August, 2012. Ahern and Dost (eds.). http://www.fdsn.org/pdf/SEEDManual_V2.4.pdf
- Segall P., (1989). Earthquakes triggered by fluid extraction. *Geology*, 17(10), 942–946.
- 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/>

Elenco delle figure

Figura 1.1. Pianificazione temporale delle attività previste nei singoli WP.	8
Figura 2.1. Stazioni sismiche della prima configurazione della rete sismica integrata.	10
Figura 2.2. Stazioni della prima configurazione della rete sismica integrata. Il triangolo arancione indica la posizione di MALA installato nei pressi di Montalcino; il rettangolo rosso illustra un ingrandimento dell'array.	12
Figura 2.3. Configurazione dell'array MALA.	12
Figura 3.1. Esempio di grafico per il controllo del funzionamento delle singole stazioni IV della prima configurazione della rete sismica integrata.	16
Figura 3.2. Esempi dei plot della PSD per monitorare la qualità dei dati registrati dalle stazioni dell'array.	16
Figura 3.3. Esempi dei plot della PSD per monitorare la qualità dei dati registrati dalle stazioni delle reti IV e IV/EL.	18
Figura 3.4. Esempi dei plot della PSD per monitorare la qualità dei dati registrati dalle stazioni delle reti IV e IV/EL.	19
Figura 3.5. Architettura del Centro Acquisizione Dati (CAD-BO) presso l'INGV di Bologna.	20
Figura 3.6 Mappa delle stazioni sismiche della rete IV e dell'array MALA operative nelle aree geotermiche tra Larderello e Amiata (vedi Tabella 3.1).	22
Figura 3.7. Topologia della connettività tra il <i>datacenter</i> EGP e le infrastrutture informatiche del Cms.	25
Figura 4.1. Screenshot localizzazione evento fornito dalla sala sismica di Roma. http://terremoti.ingv.it/event/35319151?timezone=UTC .	27
Figura 4.2. Registrazione di MALA dell'evento sismico di Figura 4.1.	27
Figura 4.3. Scheda di analisi del modulo software SC_Lambda.	28
Figura 4.4. Scheda di localizzazione del modulo software SC_Scolv.	29
Figura 4.5. Scheda di calcolo della magnitudo del modulo software SC_Scolv.	29
Figura 4.6. Scheda di analisi di retroproiezione delle forme d'onda finalizzata alla detection e localizzazione di un evento sismico utilizzando i dati registrati dall'array MALA.	30
Figura 4.7. Localizzazioni ONT dal 01/07/2020 al 05/06/2023.	31
Figura 5.1. La pagina home del sito CMS e la sezione "Geotermia Toscana"	34
Figura 5.2. Pagina introduttiva della sperimentazione ed il menù con i dettagli sulla destra	34
Figura 6.1. Differenti usi della risorsa geotermica in Svizzera [Hirschberg et al., 2015; Kraft et al., 2020].	37
Figura 6.2. Schema di funzionamento di un impianto geotermico che utilizza un sistema idrotermale (fonte: EGP).	39
Figura 6.3. Schema di funzionamento di un impianto geotermico del tipo HWR [Vergne and Schmittbuhl, 2019].	41
Figura 6.4. Meccanismi fisici, in grado di causare sismicità indotta [Kraft et al., 2020]	41
Figura 6.5. Diagramma di Mohr per l'iniezione dei fluidi ad elevata pressione [Rubinstein and Mahani, 2015].	43
Figura 6.6. Relazione tra volume iniettato e magnitudo [McGarr, 2014; modificato da Wiemer, 2018].	45
Figura 6.7. 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].	46
Figura 6.8. 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);	48
Figura 6.9. Livello di attivazione e stato corrispondente, definiti negli ILG [Dialuce et al., 2014, §9 Tab. 2].	49
Figura 6.10. Livelli di attivazione e parametri sismici definiti negli ILG [Dialuce et al., 2014, §9 Tab. 3].	49
Figura 6.11. Livelli di attivazione e schema di intervento, definiti negli ILG [Dialuce et al., 2014, §9 Tab.4].	50
Figura 6.12. (a) TLS tradizionale (b) Advanced TLS [da Grigoli et al., 2017].	54
Figura 6.13. Evoluzione temporale (tempo in UTC) della sismicità indotta (magnitudo) in funzione della fase di operazione a St. Gallen [da Kraft et al., 2020].	56
Figura 6.14. 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].	57
Figura 6.15. (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].	58
Figura 6.16. 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].	60
Figura 6.17. Sistema a semaforo usato durante le attività di stimolazione ciclica nel pozzo PX-1 a Pohang [Hofmann et al., 2019].	60
Figura 6.18. TLS proposto in funzione di magnitudo, derivato da PGV [da Bommer et al., 2006].	61
Figura 6.19. Schema del sito geotermico di Basilea. (Hirschberg et al., 2015)	62
Figura 6.20. (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).	63
Figura 6.21. Evoluzione temporale per ogni fase (P1 – P5) dei parametri caratteristici descritti nel testo [Kwiatek et al., 2019].	64
Figura 6.22 (a) Profilo di profondità N-S della crosta superiore in Baviera; (b) mappa dei siti geotermici https://geothermie-allianz.de/geothermieanlagen-in-bayern/ .	65
Figura 7.1 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].	67
Figura 7.2 Mappa della sismicità registrata nell'area del Monte Amiata (1990 - 2015) [Braun et al. 2016].	69
Figura 7.3 Proposta di uno "schema di comunicazione" da applicare al monitoraggio Geotermia Toscana.	74

Elenco delle tabelle

Tabella 3.1. Elenco delle stazioni sismiche della rete IV e dell'array MALA operative nelle aree geotermiche toscane. Le stazioni elencate con font blu sono in condivisione con la rete sismica EL di EGP.	21
Tabella 4.1. Elenco degli eventi sismici più forti registrati dalla rete RSN (IV) nell'area di Larderello - Travale nel periodo 01/07/2020 - 05/06/2023.	32
Tabella 4.2. Elenco degli eventi sismici più forti registrati dalla rete RSN (IV) nell'area di Monte Amiata nel periodo 01/07/2020 - 05/06/2023.	33
Tabella 6.1 Concessione: chiusa (†), operativa (✓), profondità, pressione idrostatica, totale e supplementare.	44
Tabella 7.1 Parametri ipocentrali del terremoto del 01-Mag-2018 a Castelnuovo di Cecina; M_w = Magnitudo Momento.	68
Tabella 7.2 Riepilogo degli eventi storici significativi nelle Colline Metallifere (CPTI15, Rovida et al., 2021).	68
Tabella 7.3 Elenco degli eventi estratti dal CPTI15_v3.0 per l'area orientale del M. Amiata. M_e = magnitudo equivalente.	70
Tabella 7.4 Esempio di relazione tra intensità macrosismica, PGV e PGA., tradotto da https://en.wikipedia.org/wiki/Peak_ground_acceleration .	74