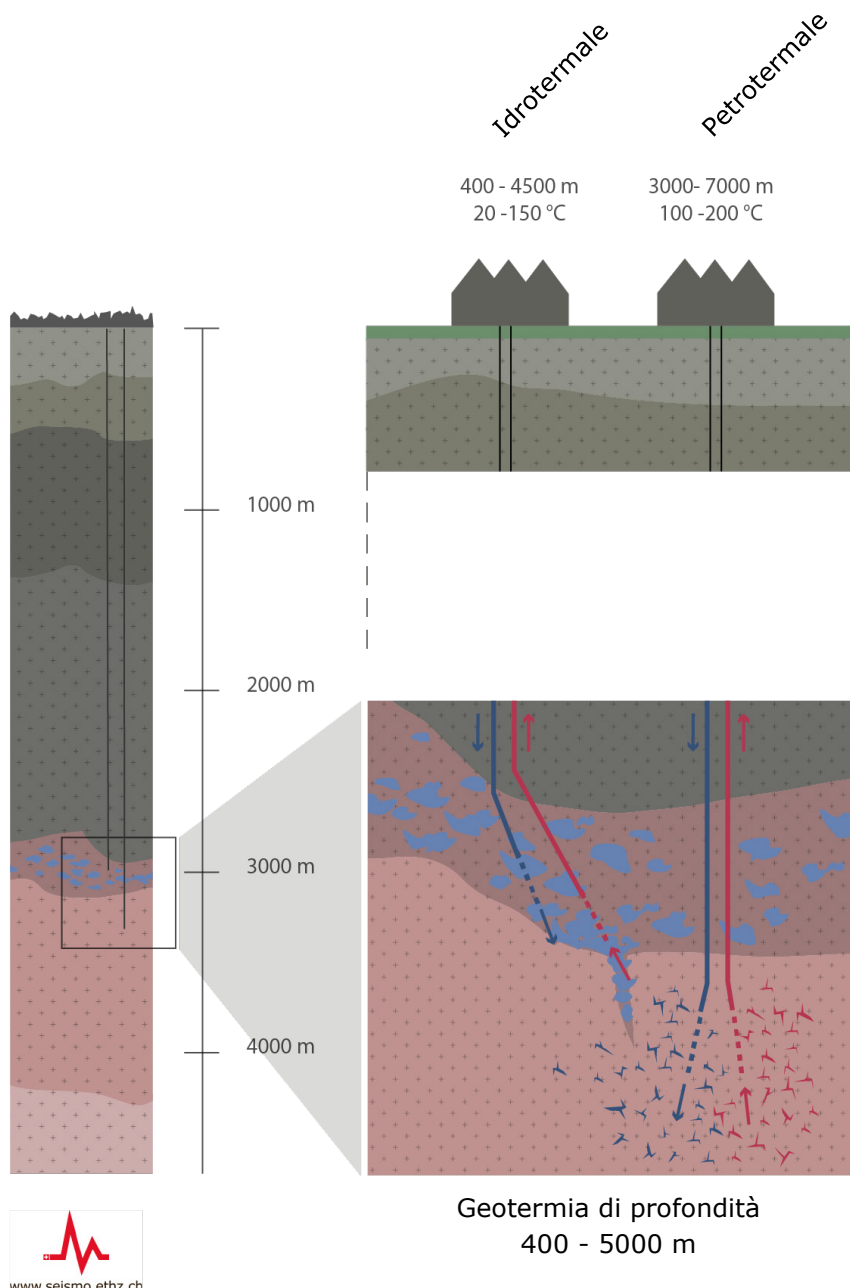


Terremoti indotti nella geotermia profonda: aspetti da considerare

Sintesi della relazione "Good Practice Guide for Managing Induced Seismicity in Deep Geothermal Energy Projects in Switzerland (V2.0)"
(Kraft et al., 2020)



Introduzione

I progetti di geotermia profonda hanno l'obiettivo di realizzare e successivamente sfruttare un sistema chiuso di circolazione con sufficiente permeabilità per lo scambio di fluidi e calore. Una delle maggiori sfide consiste nel non innescare un terremoto di intensità indesiderata. Uno studio pubblicato dal Servizio Sismico Svizzero (SED) con sede all'ETH di Zurigo illustra le strategie di successo (buone pratiche) nella gestione della sismicità indotta nel quadro dei progetti di geotermia profonda. L'obiettivo di questo studio è fornire – in primo luogo alle autorità cantonali competenti per rilasciare le autorizzazioni, ma anche ai gestori degli impianti – utili informazioni per valutare i rischi dei terremoti antropogenici e limitarli il più possibile a una misura tollerabile.

Il presente documento è una sintesi. Lo studio completo può essere scaricato in lingua inglese all'indirizzo <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000453228>. La ricerca è stata finanziata per la maggior parte dal programma SvizzeraEnergia dell'Ufficio federale dell'energia (UFE) nel quadro dei progetti GEOBEST, GEOBEST-CH e GEOBEST2020+.

Sismicità naturale in Svizzera

I terremoti in Svizzera sono, in prima approssimazione, il risultato della collisione tra la placca litosferica europea e quella africana. Rispetto ad altri paesi europei, la Svizzera ha una pericolosità sismica media che varia a seconda delle regioni: il Vallese rimane la regione con la più alta pericolosità, seguito da Basilea, dai Grigioni, dalla valle del Reno nel Cantone di San Gallo, dalla Svizzera centrale e dal resto della Svizzera. Nel nostro paese non esistono regioni completamente prive di pericolosità sismica.

Con la sua rete di oltre 200 sismometri, il SED registra mediamente in Svizzera e nei paesi limitrofi da tre a quattro terremoti al giorno e da 1'000 a 1'500 terremoti all'anno (Fig. 1). I terremoti percepiti effettivamente dalla popolazione di solito sono quelli di magnitudo 2.5 o superiore. Nel lungo periodo questi terremoti si verificano in media 23 volte all'anno. La probabilità che il prossimo anno si verifichi un terremoto catastrofico di magnitudo pari a circa 6 o più è dell'uno per cento. In media si prevede un simile evento ogni 50 - 150 anni. Un terremoto di questa intensità avvenne l'ultima volta nell'anno 1946 a Sierre, nel Vallese. Un terremoto simile potrebbe verificarsi in Svizzera in qualsiasi momento e in un qualsiasi luogo. L'ultimo terremoto che ha provocato gravi danni in Svizzera si è verificato nel 1991 a Vaz, nel Cantone dei Grigioni, con una magnitudo di 5. Il più forte terremoto storicamente documentato in Svizzera, con una magnitudo di circa 6.6, è avvenuto a Basilea nel 1356.

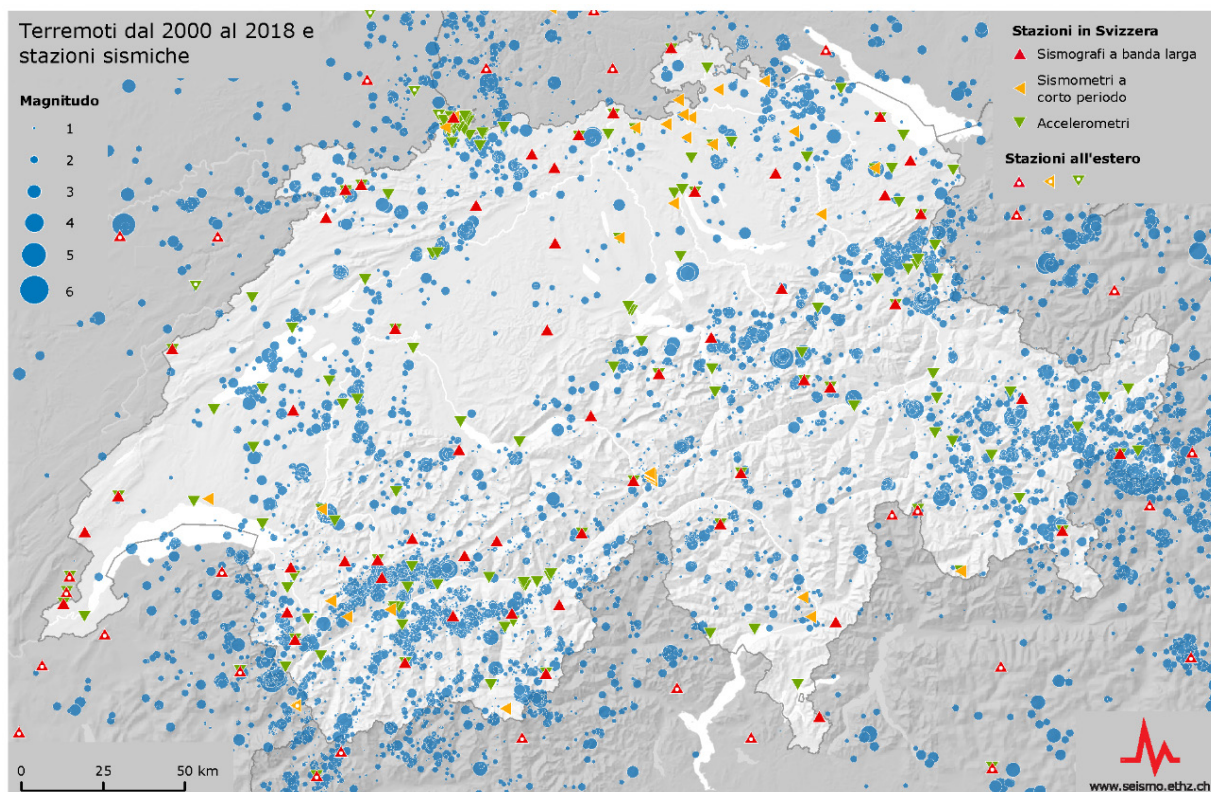


Figura 1: I terremoti registrati strumentalmente dal 2000 al 2018 e la rete sismica della Svizzera.

La distribuzione in profondità dei terremoti nelle Alpi si distingue nettamente da quella nella Svizzera settentrionale e nella zona prealpina. Mentre sotto alle Alpi l'attività sismica si limita alla parte superiore della crosta terrestre, i terremoti nella zona prealpina settentrionale si verificano nell'intera crosta terrestre fino al confine con il mantello terrestre (discontinuità di Mohorovičić, «Moho»), a una profondità compresa tra 30 e 50 km (Fig. 2).

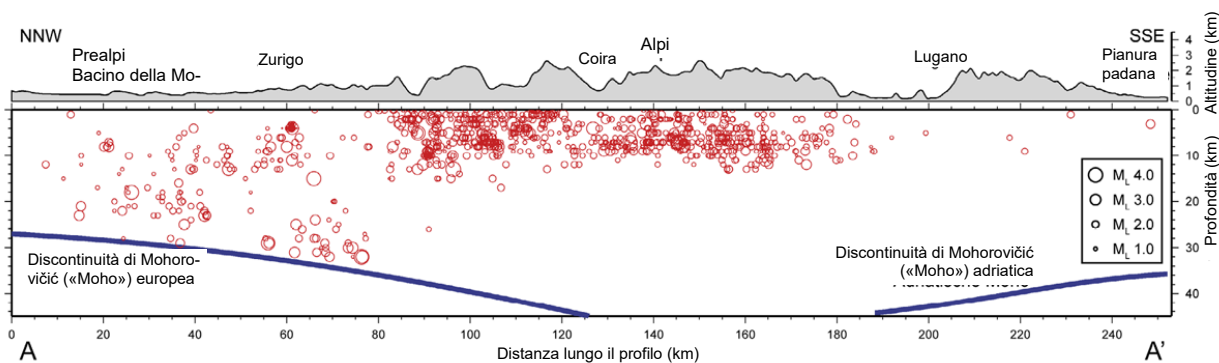


Figura2: Distribuzione in profondità dei terremoti naturali in Svizzera lungo un profilo NNW-SSE. I terremoti con distanza inferiore a 50 km dal profilo sono stati proiettati nel piano del profilo. La grandezza dei cerchi corrisponde alla magnitudo locale (M_L) dei terremoti. Il confine crosta-mantello (discontinuità di Mohorovičić, «Moho») è contrassegnato dalla linea blu.

Mappa di pericolosità sismica della Svizzera

Al momento non è possibile prevedere i terremoti. Per ciascuna località della Svizzera è tuttavia possibile calcolare la probabilità con cui gli stessi possono verificarsi, o meglio, la probabilità che una determinata accelerazione del suolo provocata dai terremoti stessi superi un valore soglia in un determinato arco di tempo. La mappa di pericolosità sismica della Svizzera fornisce una visione completa di questa conoscenza (Fig. 3). Il modello stima l'occorrenza di possibili terremoti e dei relativi movimenti del terreno nei prossimi cinquant'anni. Il modello si basa su nozioni di tettonica e geologia, sui terremoti storici in Svizzera, sulle descrizioni dei danni e sui modelli di propagazione delle onde sismiche. Specialisti e rappresentanti delle autorità lo utilizzano come punto di partenza per prendere decisioni nel settore della mitigazione e della gestione del rischio da terremoto. Anche le norme antisismiche svizzere sono basate sul modello di pericolosità.

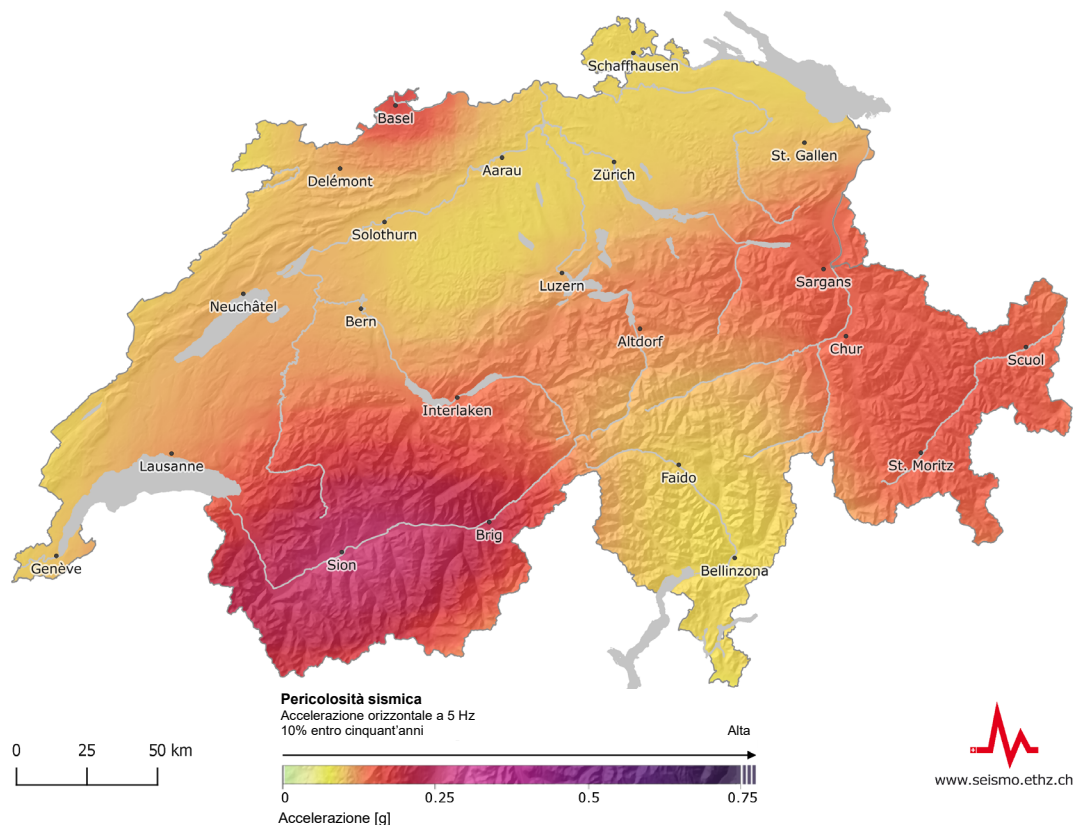


Figura 3: Mappa di pericolosità sismica della Svizzera. Accelerazione orizzontale nella gamma di frequenza intorno ai 5 Hz prevista per un edificio su suolo roccioso entro un periodo di cinquant'anni con una probabilità del 10% (ogni 500 anni).

La stima della pericolosità sismica è il primo passo per valutare e limitare il rischio sismico. Per calcolare il rischio complessivo di danneggiamenti occorre tenere conto del sottosuolo locale, della vulnerabilità degli edifici e della concentrazione dei valori. Nonostante la loro moderata pericolosità, i terremoti sono considerati il pericolo naturale con il maggiore potenziale di danno per la Svizzera.

Aspetti importanti per la geotermia di profondità

L'intera Svizzera è sottoposta a sforzo tettonico e attraversata da numerose faglie. Anche se esistono regioni con basso tasso sismicità (Fig. 1), i terremoti possono verificarsi ovunque. Come ha ad esempio dimostrato il progetto di geotermia presso San Gallo, anche le zone di faglia nelle quali negli ultimi anni o decenni non si è verificato nessun terremoto, o solo pochi, possono eventualmente continuare a rimanere attive o essere nuovamente attivate.

Nel mondo scientifico vengono discussi due modelli tettonici per le Prealpi settentrionali: tettonica «thin-skinned» e tettonica «thick-skinned». Il primo presuppone che la deformazione causata

dalla formazione della Alpi sia stata trasmessa alla zona prealpina prevalentemente in uno strato di roccia sottile superficiale e che la crosta terrestre non sia stata e non sia interessata da questa deformazione. A dimostrazione di questo modello viene citata anche la struttura geologica del Giura. Per contro, il modello «thick-skinned» presuppone che anche la crosta terrestre sia stata e sia coinvolta in questa deformazione. A dimostrazione di questo modello viene citata, tra le altre cose, la distribuzione in profondità dei terremoti nella zona prealpina. Una recente interpretazione combina i due modelli: la fase iniziale della tettonica di un bacino di avampaese viene spiegata come il risultato del modello «thin-skinned» e la fase successiva (fino a oggi) come risultato del modello «thick-skinned». A causa di questa controversia scientifica irrisolta, per analizzare la pericolosità e i rischi di un progetto di geotermia di profondità nella zona prealpina occorre quindi sempre considerare entrambi i modelli tettonici.

Contrariamente all'opinione largamente diffusa (anche tra gli specialisti) secondo cui a causa della resistenza troppo bassa della roccia è praticamente impossibile che si verifichino terremoti in zone molto superficiali raggiungibili dalle trivellazioni in profondità, in Svizzera sono noti numerosi esempi di simili terremoti. Ad es. il terremoto di magnitudo 4.3 a Friburgo nel 1999 a una profondità di appena 2 km o quello di magnitudo 3.8 nei pressi del lago di Walenstadt nel 1997 a una profondità di 1 km. Questa circostanza non deve essere ignorata durante un'analisi della pericolosità e dei rischi di un progetto di geotermia di profondità.

Terremoti indotti

Nella letteratura specializzata non esiste una definizione univoca del termine «terremoto indotto». Il SED si orienta alla definizione dell'agenzia scientifica degli USA (USGS), che definisce come indotti tutti i terremoti provocati o innescati dall'uomo (cioè antropogeni). Tale definizione non cerca di distinguere in che misura un le attività antropiche accelerino o meno il contributo degli sforzi tettonici primari esistenti («triggering»).

Differenza rispetto ai terremoti naturali

La sismicità indotta viene spesso provocata da consistenti operazioni tecniche nel sottosuolo (ad es. costruzione di gallerie, oleodotti o gasdotti) o sulla superficie terrestre (ad es. riempimento di bacini idrici). I terremoti provocati dall'uomo sono stati osservati già più di 100 anni fa in combinazione con l'estrazione di carbone, ad es. in Germania o in Inghilterra. Di norma i terremoti indotti sono più deboli rispetto a quelli naturali di intensità maggiore a livello regionale. Dal punto di vista puramente fisico, i terremoti indotti (provocati dall'uomo) non si distinguono però da quelli naturali (tettonici). Una classificazione, anche se spesso non conclusiva, è possibile solo sulla base del luogo della scossa, del momento, del meccanismo focale e delle relazioni temporali con le operazioni effettuate.

Cause dei terremoti indotti

La sismicità indotta si ha quando, nel corso di operazioni geotecniche, vengono alterate le caratteristiche di tensione e di resistenza del sottosuolo, causando un ulteriore sforzo o un indebolimento delle zone di faglia preesistenti. Le cause possono essere numerose. Una descrizione dettagliata di queste ultime si trova nello studio completo, così come nella relativa bibliografia. Le cause principali sono le seguenti:

- **Variazioni di carico**
Grandi variazioni di carico causate dall'aggiunta o dalla rimozione di masse molto grandi in superficie possono causare alterazioni dello stato di sforzo in profondità. In determinate circostanze queste possono provocare una riattivazione delle faglie esistenti. Esempi tipici sono l'industria mineraria o la costruzione di gallerie, così come il riempimento di bacini idrici.
- **Variazioni di volume (effetto poroelastico)**
A causa dell'iniezione o dell'estrazione di fluidi o di gas nel sottosuolo, varia il volume negli interstizi (pori) della roccia. Questa variazione influisce a sua volta sullo stato di sforzo nella roccia circostante, eventualmente causando una riattivazione delle fratture/faglie pre-esistenti.
- **Variazione della pressione interstiziale (effetto di pressione interstiziale diretto)**
L'iniezione o il prelevamento di fluidi o gas nel sottosuolo causa una variazione della pressione interstiziale (o di poro). L'aumento di pressione interstiziale nella formazione rocciosa causa una riduzione dell'effetto stabilizzante dell'attrito, che solitamente contrasta un cedimento a taglio per le faglie. Simili processi si verificano ad es. nell'ambito dell'estrazione di gas naturale, durante lo smaltimento di acque di strato o il prelevamento di calore terrestre.
- **Indebolimento chimico delle zone di faglia**
Le stimolazioni chimiche e idrauliche possono causare un'alterazione delle caratteristiche di attrito della roccia dovuta agli effetti chimici e in parte anche meccanici. Di conseguenza, se da ciò deriva una riduzione complessiva dell'attrito, gli sforzi creati naturalmente possono rilasciati con maggiore facilità.

Particolarità dei progetti di geotermia di profondità

La sismicità indotta non è un fenomeno esclusivo dei progetti di geotermia profonda, ma riguarda anche l'industria di estrazione del petrolio, del gas e quella mineraria. Tuttavia, i progetti di geotermia di profondità presentano alcune peculiarità:

- I progetti di geotermia profonda si trovano spesso nelle vicinanze delle città. In caso di scossa, aumenta il rischio che vengano coinvolte anche la popolazione, gli edifici e le infrastrutture.
- Nel quadro dei cosiddetti «Enhanced Geothermal Systems (EGS)», attraverso speciali tecniche di stimolazione vengono innescati consapevolmente piccoli terremoti per intensificare la circolazione di fluidi. Dato il considerevole numero delle scosse così provocate aumenta anche la probabilità di scosse indotte più forti.
- I progetti idrotermali puntano spesso a sistemi di faglie tettoniche dove è prevista una circolazione di fluidi ancora maggiore rispetto alla falda acquifera di destinazione. In questi casi sussiste il rischio che questi sistemi di faglie siano più grandi e possano essere attivati più facilmente di quanto supposto, causando una pericolosità sismica maggiore del previsto.
- Nei progetti di geotermia profonda, soprattutto quelli di tipo EGS, è disponibile una quantità relativamente ridotta di esempi con valori empirici. In questi casi, il rischio che questi sistemi si comportino in modo diverso da quanto previsto è quindi più alto.

Il ruolo del SED nei progetti di geotermia di profondità

Il SED è l'istituto della Confederazione competente in materia di terremoti e, secondo l'ordinanza sull'allarme, l'ufficio della Confederazione responsabile per gli annunci di terremoto. Per conto della Confederazione, il SED monitora l'attività sismica sia in Svizzera che nei paesi limitrofi e redige le analisi nazionali di pericolosità e dei rischi sismici. In caso di terremoto, il SED informa il pubblico, le autorità e i media su luogo, magnitudo e possibili effetti, fornendo indicazioni orientative sulla probabilità di ulteriori scosse. Di conseguenza, il SED assume un ruolo ufficiale nei progetti di geotermia profonda al più tardi nel momento in cui vengono rilevati terremoti indotti.

Tradizionalmente, il SED non svolge analisi della pericolosità e dei rischi sismici per un progetto di geotermia specifico per conto dei gestori. Ciò consente non solo di ridurre al minimo i conflitti di interesse, ma anche di affidare questo compito a organismi privati nazionali e internazionali in grado di svolgerlo con la massima competenza. Il SED considera come suo ruolo principale il sostegno ai Cantoni nel loro obbligo di sorveglianza. Ciò include, quando richiesto, che il SED garantisca un monitoraggio e un allarme sismico ottimali, fornisca una consulenza alle autorità cantonali e locali e verifichi per conto dei Cantoni, in qualità di servizio specialistico, le analisi della pericolosità e dei rischi sismici.

Attualmente, nel quadro del progetto GEOBEST2020+ finanziato dall'UFE, il SED è in grado di svolgere gratuitamente per conto delle autorità cantonali il monitoraggio sismologico di base dei progetti di geotermia profonda. Inoltre, su richiesta di un Cantone, il SED è in grado di offrire un servizio gratuito di supporto e consulenza a tutti gli uffici cantonali in tutte le fasi di un progetto di geotermia di profondità, ad es. durante la valutazione della parte sismologica dell'esame d'impatto ambientale che deve redigere il gestore.

Monitoraggio sismico dei progetti di geotermia di profondità

Negli anni passati il SED ha ricevuto diversi mandati di monitoraggio sismico dei progetti di geotermia di profondità. Le principali conoscenze emerse da questi mandati sono riassunte qui di seguito:

- Una rete locale di monitoraggio sismico dovrebbe essere progettata in modo professionale e messa in esercizio almeno sei mesi prima dell'inizio del progetto, per garantire che il sistema funzioni senza problemi e testare anticipatamente il funzionamento degli allarmi. La rete deve essere progettata in modo che sia possibile localizzare in modo affidabile anche le scosse sismiche più piccole. In ogni caso, le esigenze precise di ciascun progetto dovrebbero essere valutate singolarmente.
- Si è rivelato opportuno integrare senza soluzione di continuità il sistema di monitoraggio sismico locale nella rete sismica esistente del SED (Fig.1). Ciò consente da un lato di aumentare la precisione del monitoraggio e, dall'altro, di garantire un'analisi e una comunicazione senza problemi in caso di un terremoto di intensità indesiderata.
- Le registrazioni sismiche, inclusi cataloghi e mappe dei terremoti, dovrebbero essere liberamente accessibili in tempo reale su un sito web ufficiale del progetto. Questo aumenta la trasparenza e garantisce la verificabilità, entrambi aspetti fondamentali dal punto di vista dell'accettazione sociale. In uno scenario ideale, i dati vengono messi a disposizione da parte di un'istituzione indipendente, come ad es. il SED.
- Prima di iniziare il progetto, occorre creare un sistema di allarme nel caso si verificino scosse di intensità indesiderata. Ciò garantisce che il gestore, le autorità e se possibile anche la popolazione vengano informati in tempo reale.

Sistemi sismici a semaforo

I sistemi sismici a semaforo usati come sistemi di monitoraggio della sismicità hanno l'obiettivo di evitare o di arginare il più possibile gli effetti negativi della sismicità indotta. I sistemi a semaforo tradizionali si basano su un fitto monitoraggio della sismicità indotta e prevedono diverse misure in funzione della massima magnitudo registrata. Simili sistemi tradizionali, che sono stati utilizzati a Basilea e San Gallo, lavorano in modo puramente reattivo.

Attualmente il SED sta testando un sistema a semaforo previdente e adattivo in cui non viene usata solo la massima magnitudo osservata come indicatore delle misure, ma vengono formulate anche delle previsioni sul possibile andamento. Inoltre, vengono inclusi anche i parametri d'esercizio (ad es. tasso e pressione di iniezione). Con l'aiuto di modelli statistici e fisici dovrebbe essere possibile fare previsioni sulla probabilità di terremoti indotti di maggiore intensità, sulla base degli effetti che si presume esercitino le previste iniezioni, della permeabilità della roccia osservata e di ulteriori fattori. Quando questa probabilità supera una soglia prestabilita dagli organismi di vigilanza, è possibile adottare in anticipo le necessarie contromisure per delimitare il verificarsi di un terremoto.

Valutazione dei previsti progetti di geotermia di profondità tramite GRID

Per ogni progetto di geotermia profonda pianificato è indispensabile valutare la possibile attività sismica, così come la pericolosità e i rischi ad essa legati. Sulla base di questa valutazione occorre sviluppare, se necessario, tutte le misure che tengano conto sia della protezione della popolazione, dell'ambiente, delle merci e delle costruzioni, sia delle condizioni geologiche locali e della configurazione dell'impianto. Come strumento per elaborare una simile analisi della situazione per un determinato progetto di geotermia e per classificare grossolanamente i progetti in classi di rischio, il SED consiglia di utilizzare la griglia di valutazione «Geothermal Risk of Induced Seismicity Diagnosis (GRID)» (Trutnevyte & Wiemer, 2017) con leggere modifiche. Le raccomandazioni e i processi di lavoro ivi consigliati, aggiornati da Kraft et al. (2020), prevedono misure idonee per tutte le fasi di un progetto. Le raccomandazioni comprendono aspetti tecnici come le analisi della pericolosità e dei rischi, il tipo di monitoraggio sismico e dei sistemi semaforici ecc., così come gli aspetti comunicativi quali ad es. l'inclusione delle persone interessate e delle autorità.

È importante tenere presente che GRID non è o non sostituisce uno studio di rischio, ma uno strumento che struttura solamente la discussione in una fase anticipata di un progetto e che propone soluzioni per l'ulteriore procedura. GRID è inoltre rilevante solo per sistemi aperti e per la fase di trivellazione di sistemi chiusi profondi. Nei progetti di geotermia che vengono gestiti come sistemi chiusi, non avviene uno scambio di liquidi con la roccia circostante. Con queste sonde geotermiche piatte o profonde, i meccanismi che causano una sismicità indotta sono inefficaci, fatta eccezione per gli effetti di raffreddamento locali.

Con l'aiuto della griglia di valutazione GRID le parti coinvolte assegnano dei punti per i vari fattori di rischio. A questo processo dovrebbero partecipare almeno tre parti: il gestore dell'impianto, le autorità competenti a rilasciare le autorizzazioni così come uno o due esperti indipendenti. In una prima fase ciascuna parte assegna i suoi punti GRID. Successivamente vengono discussi i risultati. Alla fine ciascuna parte controlla i suoi punti ed eventualmente li modifica. Questo processo dovrebbe essere documentato dalle parti, in modo da garantire una procedura di analisi dei rischi trasparente. Infine, le autorità competenti a rilasciare le autorizzazioni decidono le fasi successive e le eventuali misure da adottare.

Il SED mette a disposizione qui ([DOI: 10.3929/ethz-b-000453301](https://doi.org/10.3929/ethz-b-000453301)) un file Excel che voi e i vostri esperti potete utilizzare per assegnare e visualizzare i punti GRID.

Anche se prima dell'inizio del processo sono solitamente disponibili solo degli indicatori generalizzati sul comportamento medio dei sistemi, usati in combinazione permettono un'analisi di massima del previsto rischio di sismicità indotta. I vari indicatori rilevanti per l'analisi del rischio di sismicità indotta vengono descritti qui di seguito.

Indicatori di pericolosità sismica

- Profondità della sorgente prevista
Si suppone che i sistemi più profondi, a causa del profilo di sforzo della crosta terrestre, causino più terremoti indotti.
- Volume iniettato o trasportato
Più è alto il volume della roccia interessata dalle variazioni di sforzo, più aumenta la probabilità che si verifichi un terremoto.
- Tipo di roccia della sorgente prevista
Tenendo conto dei valori empirici e in considerazione delle proprietà meccaniche della roccia, nei sistemi situati nel basamento cristallino si prevede una maggiore sismicità indotta rispetto a quella dei sistemi situati nella roccia sedimentaria.
- Pressioni di iniezione
In generale, la probabilità che si verifichino terremoti indotti aumenta con l'aumentare delle variazioni della pressione interstiziale alle quali è esposto il sottosuolo.
- Sismicità naturale nella regione
L'ipotesi intuitiva che le zone con un'attività sismica naturale più bassa a livello regionale reagiscano anche con una minore sismicità indotta (in riferimento al numero e all'intensità) alle operazioni geotecniche, non è stata fino ad oggi statisticamente documentata e neanche considerata convincente dal punto di vista geo-meccanico. Gli studi dimostrano che perfino nelle regioni con bassa pericolosità sismica, il numero e l'intensità dei terremoti possono raggiungere livelli identici a quelli di altre regioni. Tuttavia, nelle regioni con una maggiore sismicità naturale è più difficile distinguere tra terremoti naturali e indotti.
- Vicinanza a zone di faglie attive
Le iniezioni effettuate nelle vicinanze di sistemi di faglia notoriamente attivi aumentano di molto la probabilità di terremoti indotti. I campi di sforzo e le reti di fratture locali, che di norma sono estremamente complessi ed eterogenei, hanno un forte impatto sul comportamento sismico del sottosuolo. Solo in rari casi sono noti con sufficiente precisione, tale da permettere di fare previsioni affidabili.

Indicatori di rischio sismico

- Effetti di amplificazione locali
A seconda delle proprietà, il sottosuolo locale può amplificare i movimenti sismici del terreno causati dai terremoti. L'entità di questo effetto può essere stimata sulla base delle classi di terreno contenute nella norma SIA 261 (SIA, 2013) o, se non disponibili, della figura 15 dello studio completo.
- Esposizione e vulnerabilità
Le possibili conseguenze di un terremoto indotto dipendono da un lato dal numero di persone e di elementi coinvolti (esposizione) e, dall'altro, dalla loro vulnerabilità.
- Rischi secondari
Oltre agli effetti diretti causati dal movimento sismico del terreno, le persone e i beni materiali possono subire danni anche in seguito ad altri fenomeni scatenati da terremoti indotti. Ad esempio, nelle zone sensibili un terremoto può causare frane oppure onde anomale.

Indicatori di accettazione sociale

- Accettazione da parte della popolazione della geotermia profonda
Gli elementi determinanti per il successo o il fallimento di un progetto non sono solo i pericoli e i rischi sismici, ma anche l'accettazione sociale.
- Fiducia negli attori
Più è alta la fiducia della popolazione nelle autorità competenti a rilasciare le autorizzazioni e nel gestore, più tende ad aumentare l'accettazione di un progetto di geotermia.
- Utilità per la popolazione locale
L'utilità diretta o indiretta di un progetto di geotermia per la popolazione locale ha un impatto fondamentale sull'accettazione sociale.

Griglia di valutazione GRID

Fattori di pericolosità sismica	0 (poco preoccupante)	1 (preoccupante)	2 (molto preoccupante)
Profondità della sorgente	< 1 km	1 - 3 km	> 3 km
Volume totale di iniezione durante la stimolazione	< 1'000 m ³	≤ 10'000 m ³	> 10'000 m ³
Volume giornaliero iniettato o estratto durante il progetto	< 1'000 m ³ /giorno iniettati o < 5'000 m ³ /giorno estratti	≤ 10'000 m ³ /giorno iniettati o ≤ 50'000 m ³ /giorno estratti	> 10'000 m ³ /giorno iniettati o > 50'000 m ³ /giorno estratti
Tipo di roccia	Sedimenti	500 m nel raggio intorno a basamento cristallino	Basamento cristallino
Discriminazione tra sismicità naturale e indotta	Zona sismica 1a/1b in SIA (2020)*	Zona sismica 2 in SIA (2020)*	Zona sismica 3a/3b in SIA (2020)*
Pressione iniezione di fluido	< 0.3 MPa	0.3 - 10 MPa	> 10 MPa
Distanza da possibili faglie note e attive	> 5 km	≤ 5 km	< 2km
Fattori di rischio sismico (nel raggio di 5 km)	0 (poco preoccupante)	1 (preoccupante)	2 (molto preoccupante)
Effetti di amplificazione locali** <i>Terreni morbidi= classi di terreno di costruzione D, E, F in SIA (2020)</i>	Nessun edificio o infrastruttura su terreno morbido	< 10% degli edifici o delle infrastrutture su terreno morbido	≥ 10% degli edifici o delle infrastrutture su terreno morbido
Popolazione esposta	Zona isolata (< 100 abitanti)	Zona di campagna (< 20'000 abitanti)	Zona urbana (> 20'000 abitanti)
Attività industriale o commerciale	Bassa attività	Media attività ≥ 1 società con 100 - 499 dipendenti o ≥ 1 impianto industriale di particolare valore	Alta attività ≥ 5 società con 100-499 dipendenti o > 2 società con > 500 dipendenti o ≥ 2 impianti industriali di particolare valore
Importanza degli edifici e delle infrastrutture	Nessun edificio di classe SIA II o III (SIA, 2020)	Nessun edificio o infrastruttura di classe III (SIA, 2020)	Edifici e infrastrutture di classe III (SIA, 2020)
Infrastrutture con notevole rischio ambientale	Nessuno	-	Uno o più
Patrimonio culturale strutturalmente non rinforzato	< 5% degli edifici classificati come importante patrimonio locale, regionale o nazionale	≤ 10% degli edifici classificati come importante patrimonio locale, regionale o nazionale	> 10% degli edifici classificati come importante patrimonio locale, regionale o nazionale; o almeno un edificio classificato come patrimonio culturale internazionale
Predisposizione ai rischi secondari	Molto bassa	Moderata	Alta
Fattori sociali	0 (poco preoccupante)	1 (preoccupante)	2 (molto preoccupante)
Potenziale di rischio per la popolazione	Nessuno	Presente	Significativo
Gruppi di interesse vulnerabili o fortemente contrari	Nessuno	Presente	Significativo
Esperienze negative con progetti simili	Nessuno	Presente	Significativo
Assenza di fiducia nel gestore del progetto o nelle autorità	Nessuno	Presente	Significativo
Vantaggi per la popolazione locale	Vantaggi diretti con o senza indennizzo finanziario	Solo indennizzo finanziario	Nessuno

* <https://s.geo.admin.ch/8cb9c5fc86> (map.geo.admin.ch → Zone sismiche SIA 261)

** Quando la classe di terreno non è definita, è possibile utilizzare la Fig. 15 dello studio completo.

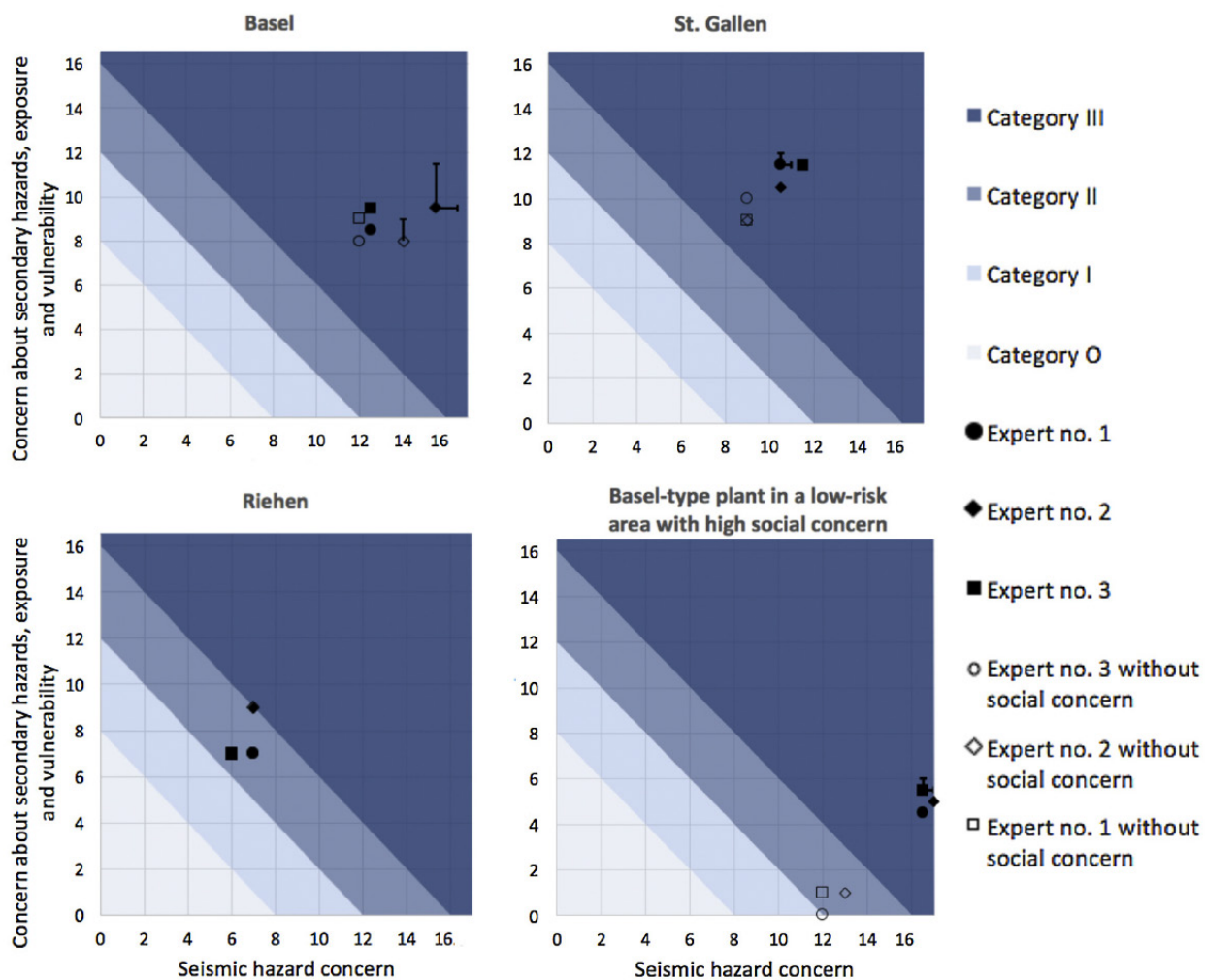


Figura 4: Risultati della valutazione GRID per il progetto di geotermia di Basilea, di San Gallo e di Riehen così come per un ipotetico progetto simile a quello di Basilea in una regione con basso rischio sismico ma elevato scetticismo sociale.

Strategie di gestione dei rischi per le categorie GRID

A seconda dei punti GRID assegnati ai vari fattori di rischio, il progetto da valutare rientra in una delle seguenti categorie:

Categoria 0

In questa categoria è molto improbabile o escluso che si verifichi sismicità indotta. Tipicamente rientrano nella categoria 0 i sistemi chiusi, come ad es. le sonde geotermiche profonde o le trivellazioni esplorative senza stimolazioni idrauliche.

Misure consigliate

In questo caso non sono necessari un'analisi del rischio e della pericolosità né un monitoraggio sismico speciale. Se però l'accettazione sociale verso il progetto è bassa, il gestore o le autorità possono adottare misure di monitoraggio spontanee.

Categoria I

È improbabile che si verifichi sismicità indotta. Tipicamente rientrano in questa categoria i progetti idrotermali in falde acquifere esistenti situati in una profondità fino a 3 km e in regioni con basso rischio sismico e alta accettazione sociale (Fig. 5).

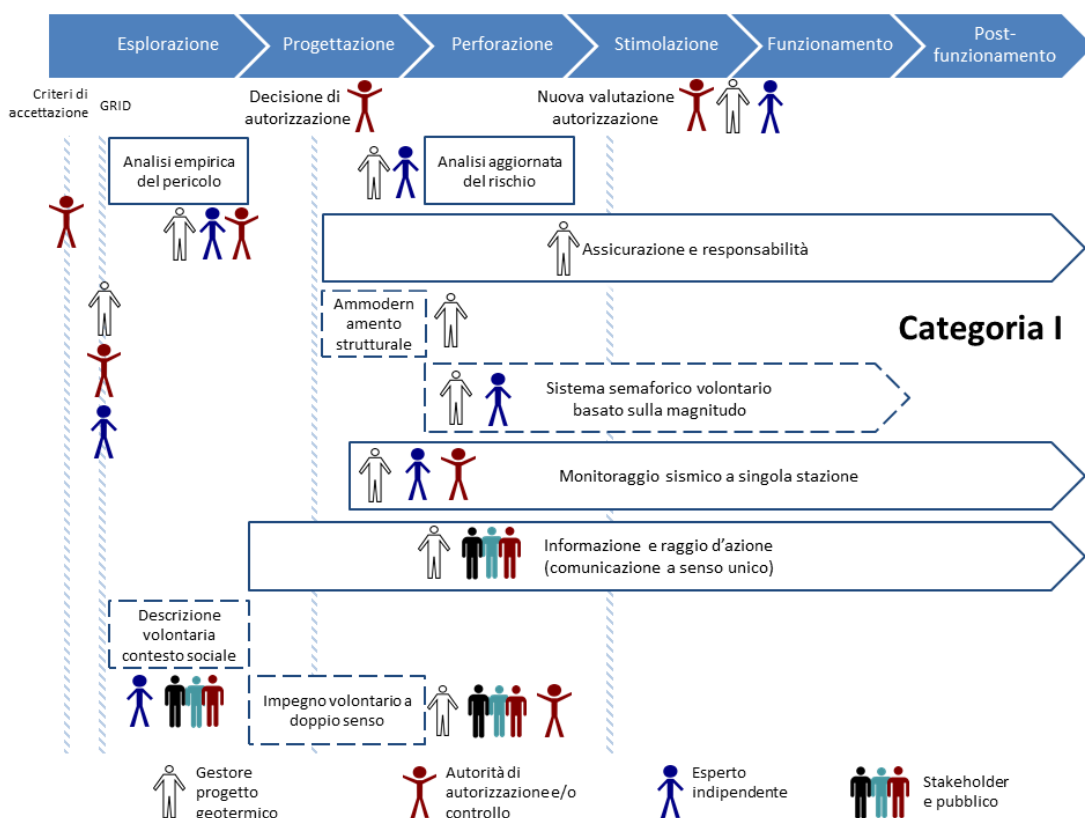


Figura 5: Panoramica schematica delle misure consigliate per la categoria GRID I.

Misure consigliate

- Analisi della pericolosità e dei rischi
 - Un'analisi della pericolosità di sismicità indotta dovrebbe essere effettuata sulla base di dati empirici derivanti da progetti simili e di semplici calcoli di scenario. A tal fine è necessario considerare la sismicità naturale nel raggio di 10 Km e le variazioni sollecitanti in prossimità del foro di trivellazione. La probabilità media annua di un terremoto indotto di magnitudo 2.0 (ML), calcolata in base ai dati empirici e a simili progetti, non dovrebbe superare l'uno per cento, altrimenti il progetto dovrebbe essere spostato nella categoria II.
 - Per gli edifici e le infrastrutture della classe III (SIA, 2020) così come per i beni culturali situati nel raggio di almeno 5 chilometri intorno al sito del progetto dovrebbe essere effettuata una speciale analisi qualitativa dei rischi.
 - Anche se non è obbligatorio utilizzare un sistema semaforico sismico, è opportuno definire e documentare delle contromisure e dei canali di comunicazione per eventi imprevisti.
 - La reinterpretazione dei dati di riflessione sismica non è obbligatoria.
- Monitoraggio e meccanismi di controllo
 - Anche se una sismicità percepita è improbabile, dovrebbe essere costantemente monitorata e comunicata apertamente. Inoltre, una stazione sismica dovrebbe registrare continuamente i movimenti del terreno almeno tre mesi prima dell'inizio del progetto e fino a sei mesi dopo la fine dello stesso.
 - Prima di una stimolazione idraulica dovrebbe essere documentato lo stato degli edifici e delle infrastrutture di classe III (SIA, 2020) così come dei beni culturali situati nel raggio di almeno 5 chilometri.
 - Inoltre, occorre monitorare i movimenti sismici del terreno presso edifici e infrastrutture di classe III (SIA, 2020) selezionati, così come dei beni culturali situati nel raggio di almeno 5 chilometri.
- Copertura assicurativa
 - È opportuno stipulare una polizza assicurativa per la sismicità indotta.

Categoria II

Possibile sismicità indotta fino a scosse rovinose. Tipicamente rientrano in questa categoria i progetti idrotermali in falde acquifere esistenti a più di 3 km di profondità. I sistemi di faglie, che tuttavia non vengono stimolati, si trovano possibilmente nelle vicinanze della trivellazione. La sismicità indotta deve essere considerata e comunicata francamente in tutte le fasi operazionali (Fig. 6).

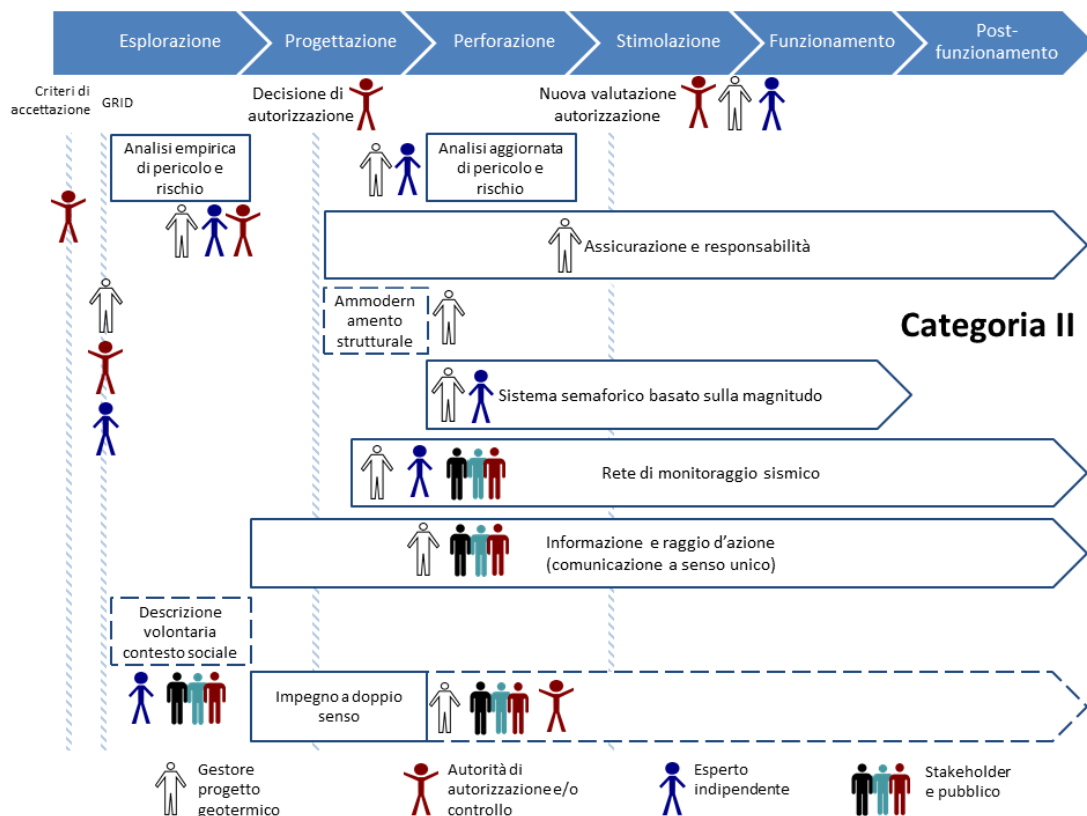


Figura 6: Panoramica schematica delle misure consigliate per la categoria GRID II.

Misure consigliate

- Analisi della pericolosità e dei rischi
 - In aggiunta all'analisi deterministica della pericolosità della categoria I è necessario quantificare le incertezze tenendo conto di modelli e meccanismi d'azione alternativi. Inoltre dovrebbe essere calcolato uno scenario «worst-case». Nel caso in cui la probabilità media annua, stimata in base a modellazioni, dati empirici e progetti simili, di un terremoto indotto di magnitudo 3.0 (ML) o superiore sia superiore all'uno per cento, il progetto dovrebbe essere spostato nella categoria di rischio III.
 - Per gli edifici e le infrastrutture delle classi II e III (SIA, 2020) così come per i beni culturali situati nel raggio di almeno 5 chilometri intorno al sito del progetto dovrebbe essere effettuata una speciale analisi dei rischi.
 - È consigliato l'uso di un classico sistema semaforico. A tal fine dovrebbero essere definite e documentate le necessarie contromisure e i necessari canali di comunicazione.
 - Può rivelarsi opportuno rilevare dati 2D rappresentativi o eventualmente anche dati 3D o reinterpretare i dati esistenti.
- Monitoraggio e meccanismi di controllo
 - È consigliabile definire una strategia di monitoraggio, incluso il caso in cui si verifichi della sismicità indotta.
 - La rete sismica di monitoraggio dovrebbe consentire la localizzazione delle scosse percepite e l'uso di un classico sistema semaforico. A tal fine è necessaria una rete sismica in grado di localizzare bene tutti i terremoti di magnitudo uguale o superiore a 1.0 (ML) in un raggio di almeno 5 km intorno al sito del progetto. La campagna di misure dovrebbe iniziare sei mesi prima dell'inizio del progetto.
 - Dopo la fine del progetto, è importante continuare a monitorare la sismicità per ulteriori sei mesi.
 - Quando durante la fase di test e di stimolazione idraulica si verifica una scossa di magnitudo uguale o superiore a 1.0 (ML) in un raggio di 2.5 km intorno al sito del progetto, quest'ultimo dovrebbe essere interrotto e la pericolosità sismica analizzata nuovamente.
 - Durante la fase di esercizio dovrebbero intervenire i primi meccanismi di controllo del sistema semaforico quando si verifica una scossa di magnitudo uguale o superiore a 1.5 (ML) in un raggio di 2,5 km intorno al sito del progetto.
 - Prima di una stimolazione idraulica dovrebbe essere documentato lo stato degli edifici e delle infrastrutture di classe III (SIA, 2020) così come dei beni culturali situati nel raggio di almeno 5 chilometri.
 - Inoltre, occorre monitorare i movimenti sismici del terreno presso edifici e infrastrutture di classe III (SIA, 2020) selezionati, così come dei beni culturali situati nel raggio di almeno 5 chilometri.
- Copertura assicurativa
 - È opportuno stipulare una polizza assicurativa per la sismicità indotta.

Categoria III

In questo caso sono possibili terremoti rovinosi, così come un atteggiamento contrario della popolazione. Il rischio di scosse indotte dovrebbe quindi essere analizzato e monitorato con precisione. In questa categoria rientrano tipicamente i progetti EGS che prevedono la stimolazione di rocce cristalline situate a oltre 3 km di profondità e probabilmente in prossimità di sistemi di faglie. Tuttavia possono rientrare in questa categoria anche i progetti idrotermali in aree ad alto rischio e ad alta preoccupazione sociale. Si consiglia di far controllare l'analisi della pericolosità e dei rischi di sismicità indotta non solo dalle competenti autorità che rilasciano le autorizzazioni, ma anche da esperti indipendenti come ad es. il SED (Fig. 7).

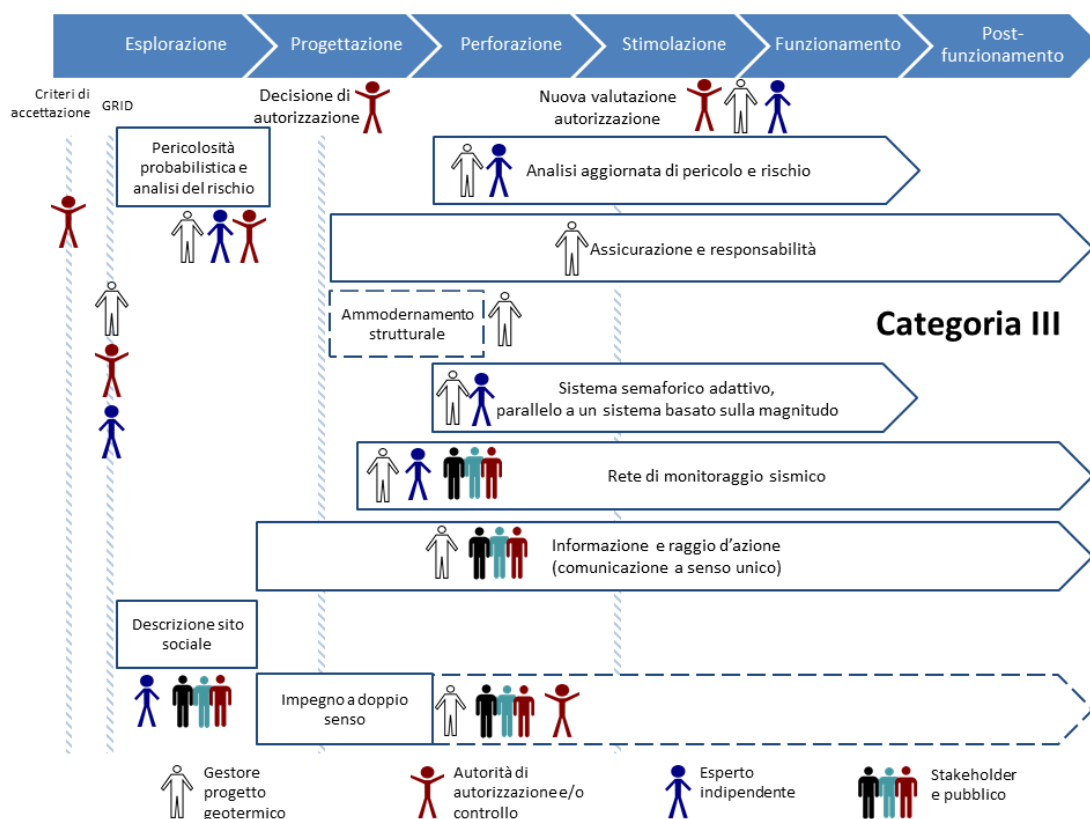


Figura 7: Panoramica schematica delle misure consigliate per la categoria GRID III.

Misure consigliate

- Analisi della pericolosità e dei rischi
 - Per questa categoria è necessaria un'analisi della pericolosità e dei rischi dettagliata e probabilistica. Quest'ultima deve includere anche gli eventi che possono verificarsi con una probabilità molto bassa ma provocare danni ingenti.
 - Per gli edifici e le infrastrutture delle classi I, II e III (SIA, 2020) così come per i beni culturali situati nel raggio di almeno 5 chilometri intorno al sito del progetto dovrebbe essere effettuata una speciale analisi dei rischi.
 - Parallelamente al classico sistema semaforico si consiglia di allestire – come meccanismo di controllo – anche un sistema semaforico adattivo. A tal fine dovrebbero essere definite e documentate le necessarie contromisure e i necessari canali di comunicazione.
 - I criteri di accettazione per la sismicità indotta dovrebbero essere scelti e documentati in accordo con tutti i gruppi di interessati.
 - Occorre comunicare in modo più veloce e trasparente possibile, anche alla popolazione, tutti i fenomeni di sismicità indotta che vengono rilevati.
 - Si consiglia di includere nella fase di stimolazione diversi test di convalida dei modelli di previsione e delle ipotesi dell'analisi della pericolosità e dei rischi. Eventualmente questa dovrà essere poi adeguata.
 - Per i progetti all'interno o nelle vicinanze di pacchi di rocce sedimentarie, può risultare opportuno rilevare dati 3D di riflessione sismica di alta qualità. In ogni caso è consigliabile una reinterpretazione dei dati 2D e 3D esistenti.
 - Una commissione di esperti indipendenti dovrebbe supportare le autorità e il gestore in caso di eventi imprevisti.
- Monitoraggio e meccanismi di controllo
 - È necessario definire una strategia di monitoraggio che includa anche la possibilità di forti scosse.
 - La rete sismica di monitoraggio dovrebbe consentire la localizzazione delle scosse percepite e l'uso di un sistema semaforico adattivo. A tal fine è necessaria una rete sismica che permetta di localizzare tutti i terremoti di magnitudo uguale o superiore a 0.5 (ML) in un raggio di 5 km intorno al sito del progetto. La campagna di misure dovrebbe iniziare sei mesi prima dell'inizio del progetto.
 - Dopo la fine del progetto, il monitoraggio sismico dovrebbe continuare – senza ridurre il numero delle stazioni – fino a quando la sismicità avrà nuovamente raggiunto il livello precedente alla stimolazione idraulica.
 - Quando durante la fase di test e di stimolazione idraulica si verifica una scossa di magnitudo uguale o superiore a 1.5 (ML) in un raggio di 2,5 km intorno al sito del progetto, quest'ultimo dovrebbe essere interrotto e la pericolosità sismica analizzata nuovamente.
 - Il sistema semaforico classico e quello adattivo dovrebbero funzionare in modo automatico.
 - Prima di una stimolazione idraulica dovrebbe essere documentato lo stato degli edifici e delle infrastrutture delle classi II e III (SIA, 2020) così come dei beni culturali situati nel raggio di 5 chilometri.
 - Inoltre occorre monitorare i movimenti sismici del terreno presso edifici e infrastrutture delle classi II e III (SIA, 2020) selezionati, così come dei beni culturali situati nel raggio di 5 chilometri.
 - Sul rilevamento dello stato e il monitoraggio dei movimenti del terreno presso edifici della classe I (SIA, 2020) occorre riflettere se includere la popolazione.
- Copertura assicurativa
 - È opportuno stipulare una polizza assicurativa per la sismicità indotta.

Documenti e informazioni complementari

File Excel per l'assegnazione dei punti GRID: doi.org/10.3929/ethz-b-000453301

Informazioni sull'indipendenza e la trasparenza del SED:

<http://www.seismo.ethz.ch/it/about-us/portrait/independence-and-transparency/>

Informazioni di contesto sui temi geotermia e terremoti:

- [Geotermia in breve](#)
- [Forme di energia geotermica](#)
- [Geotermia e terremoti indotti](#)
- [Misure per mitigare la sismicità indotta](#)
- [Ulteriori informazioni sul monitoraggio dei progetti di geotermia da parte del SED](#)

Bibliografia

Kraft, T., Roth P., & S. Wiemer (2020). Good Practice Guide for Managing Induced Seismicity in Deep Geothermal Energy Projects in Switzerland. Bericht des Schweizerischen Erdbebendienstes, pp. 68, <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000453228>

SIA (2020). SIA 261:2020 Einwirkung auf Bauwerke. Swiss Society of Engineers and Architects, Zurich. (German: <http://shop.sia.ch/normenwerk/ingenieur/sia%20261/d/2020/D/Product>
French: <http://shop.sia.ch/normenwerk/ingenieur/sia%20261/d/2020/F/Product>
Italian: <http://shop.sia.ch/normenwerk/ingenieur/sia%20261/d/2020/I/Product>)

Trutnevyte, E. & Wiemer, S. (2017). Tailor-made risk governance for induced seismicity of geothermal energy projects: An application to Switzerland. *Geothermics*, 65, 295–312, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.10.006>.