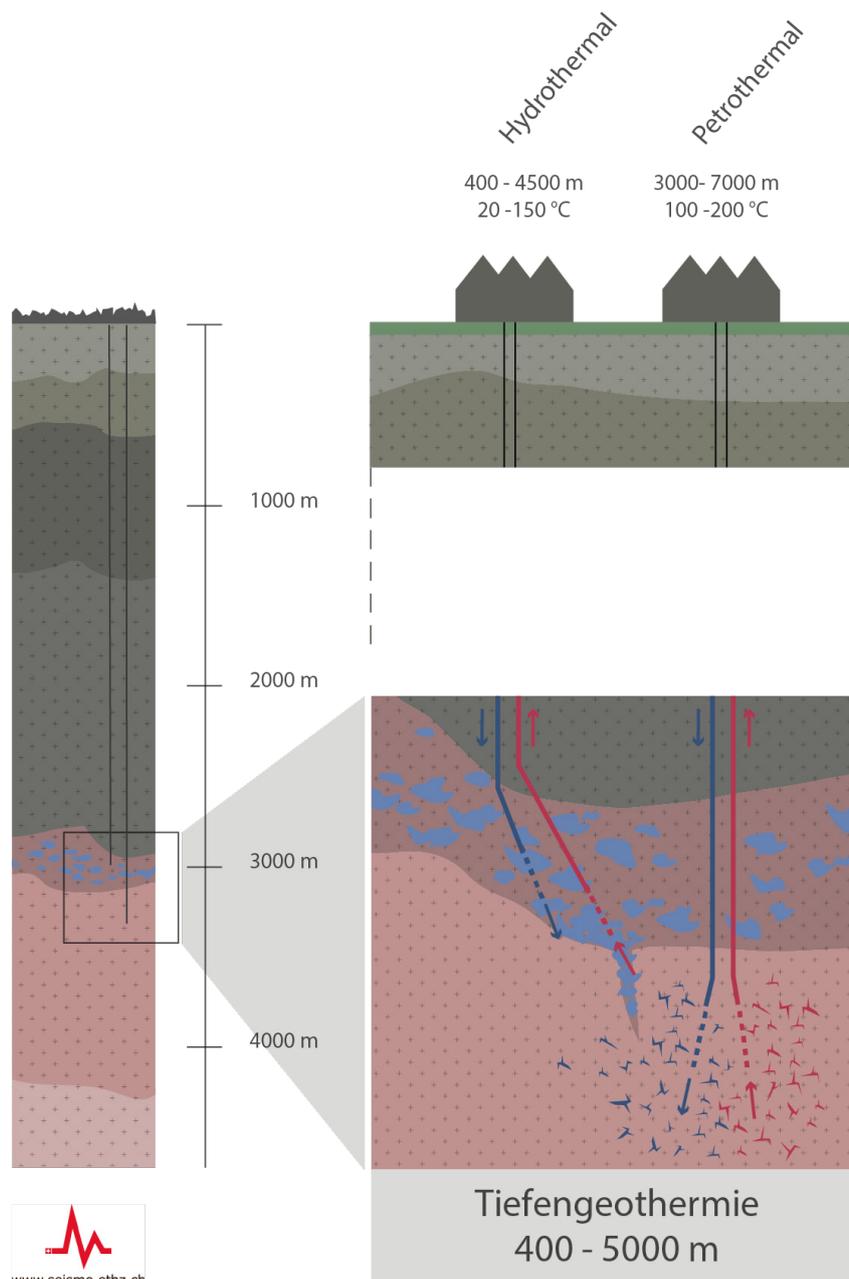


Induzierte Erdbeben bei der Tiefengeothermie – was es zu beachten gilt

Kurzfassung des Berichts „Good Practice Guide for Managing Induced Seismicity in Deep Geothermal Energy Projects in Switzerland (V2.0)“
(Kraft et al., 2020)



Einführung

Tiefengeothermieprojekte haben zum Ziel, im Untergrund einen Wärmetauscher mit ausreichender Durchlässigkeit zu erzeugen und zu nutzen. Eine der grossen Herausforderungen besteht darin, keine unerwünscht starken Erdbeben auszulösen. Ein vom Schweizerischen Erdbebendienst (SED) an der ETH Zürich erstellter Bericht beleuchtet erfolgreiche Strategien („good practices“) im Umgang mit induzierter Seismizität bei Tiefengeothermieprojekten. Er soll insbesondere den kantonalen Bewilligungsbehörden, aber auch den Betreibern von Anlagen, nützliche Hinweise geben, um die Risiken menschengemachter Erdbeben abzuschätzen und soweit möglich auf ein verträgliches Mass zu begrenzen.

Dieses Dokument ist eine Kurzfassung. Der vollständige Bericht kann in englischer Sprache unter <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000453228> heruntergeladen werden. Die Studie wurde zu einem grossen Teil vom Programm EnergieSchweiz des Bundesamts für Energie (BFE) im Rahmen der Projekte GEOBEST, GEOBEST-CH und GEOBEST2020+ gefördert.

Natürliche Seismizität in der Schweiz

Die Erdbeben in der Schweiz sind in erster Näherung die Folge des Aufeinanderprallens der europäischen und der afrikanischen Lithosphärenplatten. Im Vergleich zu anderen europäischen Ländern weist die Schweiz eine mittlere Erdbebengefährdung auf, wobei regionale Unterschiede bestehen: Das Wallis ist die Region mit der höchsten Gefährdung, gefolgt von Basel, Graubünden, dem St. Galler Rheintal, der Zentralschweiz und der übrigen Schweiz. Regionen ganz ohne Erdbebengefährdung gibt es in der Schweiz nicht.

Mit seinem Netzwerk von mehr als 200 Seismometern registriert der SED in der Schweiz und im nahen benachbarten Ausland durchschnittlich drei bis vier Erdbeben pro Tag beziehungsweise 1'000 bis 1'500 Erdbeben pro Jahr (Abb. 1). Von der Bevölkerung tatsächlich verspürt werden etwa 10 bis 20 Beben jährlich. Diese weisen in der Regel Magnituden von 2.5 oder mehr auf. Im langjährigen Durchschnitt ereignen sich pro Jahr 23 Beben mit einer Magnitude von 2.5 oder grösser. Die Wahrscheinlichkeit für ein katastrophales Beben mit einer Magnitude von etwa 6 oder mehr liegt bei einem Prozent im nächsten Jahr. Im Schnitt ist alle 50 bis 150 Jahre mit einem solchen Ereignis zu rechnen. Ein Erdbeben dieser Stärke ereignete sich zum vorerst letzten Mal im Jahr 1946 bei Sierrre im Wallis. Ein solches Beben kann aber überall und jederzeit in der Schweiz auftreten. Das letzte Erdbeben, das in der Schweiz grössere Schäden verursacht hat, ereignete sich 1991 bei Vaz im Kanton Graubünden mit einer Magnitude von 5. Das stärkste historisch dokumentierte Erdbeben in der Schweiz mit einer Magnitude von ungefähr 6.6 ereignete sich 1356 bei Basel.

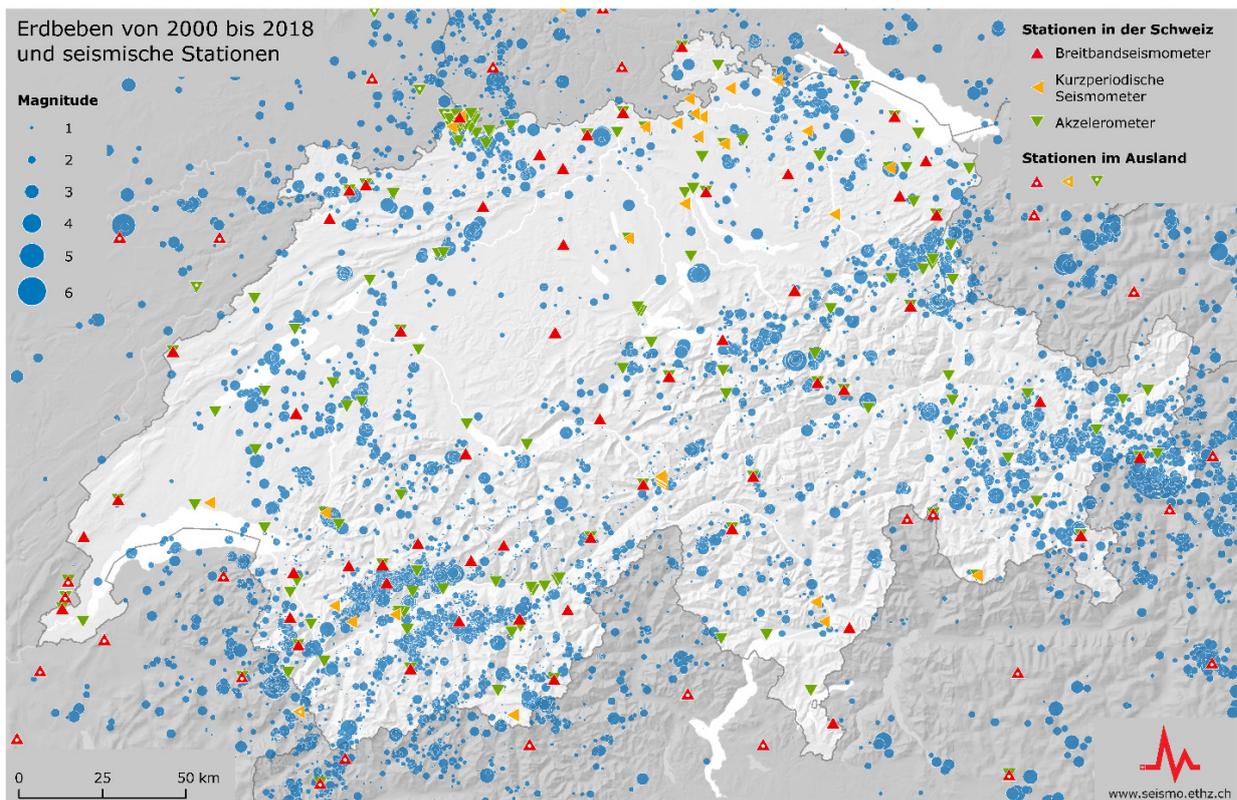


Abbildung 1: Instrumentell aufgezeichnete Erdbeben von 2000 bis 2018 sowie seismisches Netzwerk der Schweiz.

Die Tiefenverteilung der Erdbeben in den Alpen unterscheidet sich markant von der in der Nordschweiz und dem Alpenvorland. Unter den Alpen beschränkt sich die seismische Aktivität auf den oberen Teil der Erdkruste. Erdbeben im nördlichen Alpenvorland treten hingegen in der gesamten Erdkruste bis hinab zur Grenze zum Erdmantel (Moho) in 30 bis 50 km Tiefe auf (Abb. 2).

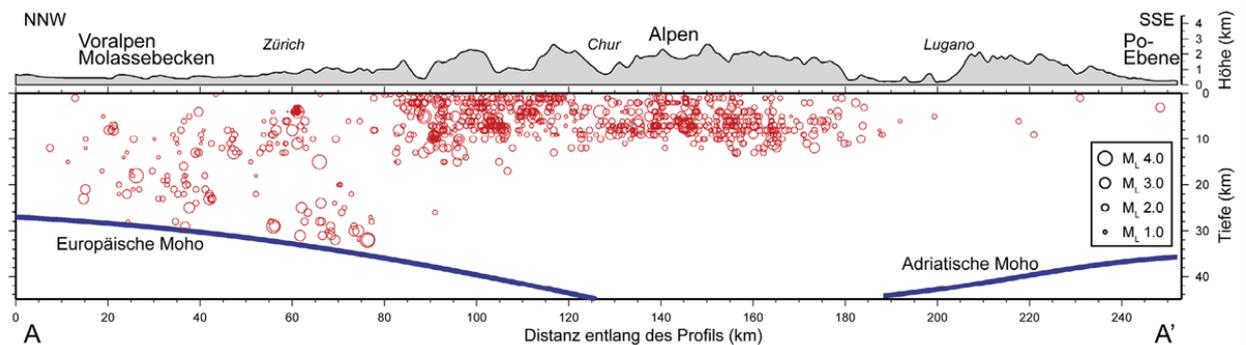


Abbildung 2: Tiefenverteilung der natürlichen Erdbeben in der Schweiz entlang eines NNW-SSE Profils. Erdbeben im Abstand von weniger als 50 km vom Profil wurden in die Profilebene projiziert. Die Größe der Kreise entspricht der Lokalmagnitude (M_L) der Erdbeben. Die Krusten-Mantel-Grenze (Moho) ist als blaue Linie gekennzeichnet.

Erdbebengefährdungsmodell der Schweiz

Erdbeben lassen sich derzeit nicht vorhersagen. Allerdings besteht die Möglichkeit, für jeden Ort der Schweiz die Wahrscheinlichkeit zu berechnen, mit der Erdbeben auftreten beziehungsweise, dass eine davon ausgelöste, gewisse Bodenbeschleunigung innerhalb einer bestimmten Zeitspanne überschritten wird. Das Erdbebengefährdungsmodell der Schweiz bildet dieses Wissen umfassend ab (Abb. 3). Es macht eine Aussage über möglichen Erdbeben und damit einhergehenden Bodenbewegungen in den nächsten fünfzig Jahren. Das Modell basiert auf Kenntnissen der Tektonik und Geologie, Informationen über die Erdbebengeschichte, Schadensbeschreibungen sowie Modellen der Wellenausbreitung. Fachpersonen und Behördenvertreter nutzen es als Ausgangspunkt, um Entscheide im Bereich der Erdbebenvorsorge und des integralen Risikomanagements zu treffen. Zudem gründen darauf die Erdbebenbaunormen.

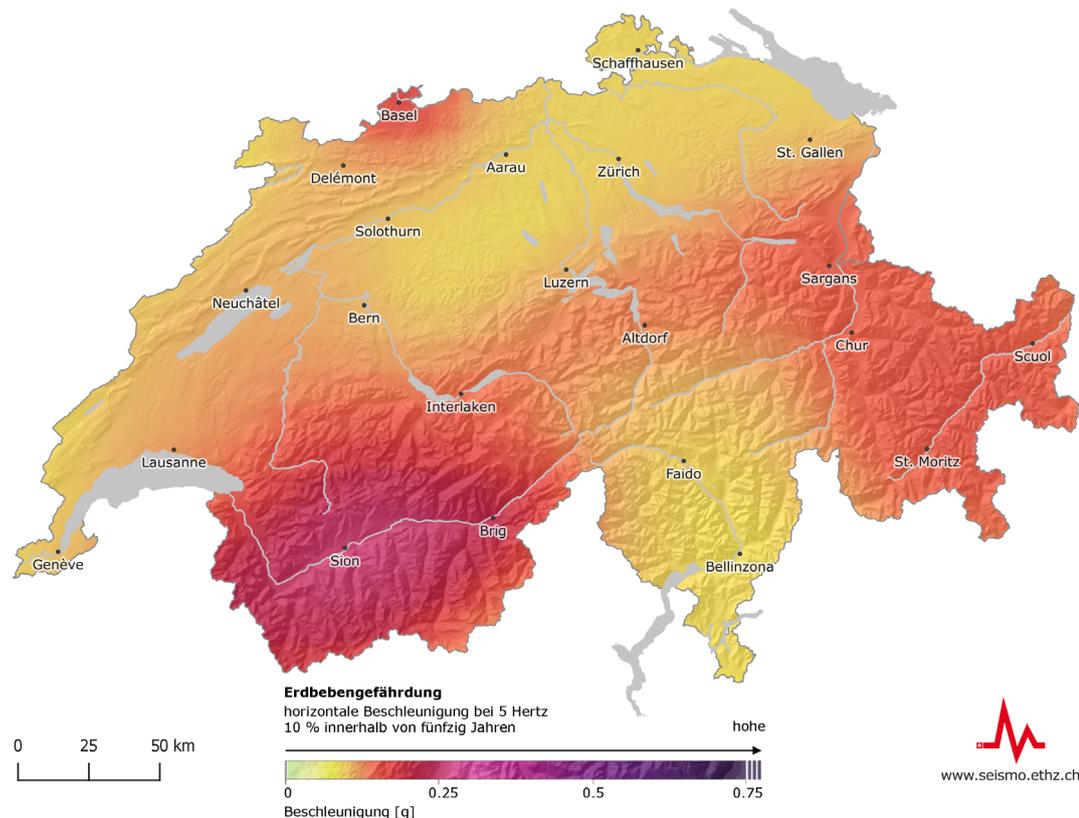


Abbildung 3: Erdbebengefährdungskarte der Schweiz. Horizontale Beschleunigung im Frequenzbereich um 5 Hz, die für ein Gebäude auf felsigem Untergrund innerhalb von fünfzig Jahren mit einer Wahrscheinlichkeit von 10 % (alle 500 Jahre) zu erwarten ist.

Die Abschätzung der seismischen Gefährdung ist der erste Schritt, um das seismische Risiko zu beurteilen und zu begrenzen. Zur Berechnung des gesamten Schadensrisikos werden zusätzlich der lokale Untergrund, die Verletzbarkeit von Gebäuden sowie die Wertekonzentration berücksichtigt. Trotz der moderaten Gefährdung gelten Erdbeben als Naturgefahr mit dem grössten Schadenspotential für die Schweiz.

Wichtige Aspekte für die Tiefengeothermie

Die ganze Schweiz ist tektonisch vorgespannt und von zahlreichen Verwerfungen durchzogen. Es gibt zwar Gebiete mit geringerer Seismizität (Abb. 1), Erdbeben können aber überall auftreten. Wie das Beispiel des Geothermieprojekts bei St. Gallen gezeigt hat, sind auch Verwerfungszonen, auf denen in den letzten Jahren oder Jahrzehnten keine oder wenige Erdbeben aufgetreten sind, unter Umständen weiterhin aktiv oder können erneut aktiviert werden.

Für das nördliche Alpenvorland werden in der Fachwelt zwei tektonische Modelle diskutiert: „thin-skinned“ kontra „thick-skinned“ Tektonik. Ersteres geht davon aus, dass die durch die Alpenbildung verursachte Deformation vorwiegend in einer dünnen, oberflächennahen Schicht in das Alpenvorland übertragen wurde und wird und die Erdkruste kaum von dieser Deformation betroffen war und ist. Als Beleg für dieses Modell wird nicht zuletzt der geologische Bau des Juras angeführt. Im Gegensatz dazu geht das thick-skinned Modell davon aus, dass auch die Erdkruste an dieser Deformation beteiligt war und ist. Als Beleg für dieses Modell wird unter anderem die Erdbebentiefenverteilung im Alpenvorland angeführt. Eine neuere Interpretation kombiniert beide Modelle, in dem sie die Frühphase der Vorlandtektonik als thin-skinned erklärt und die Spätphase (bis heute) als thick-skinned. Für die Gefährdungs- und Risikobewertung von Tiefengeothermieprojekten im Alpenvorland müssen aufgrund dieses ungelösten Expertenstreits daher immer beide tektonischen Modelle berücksichtigt werden.

Entgegen der auch unter Fachpersonen weit verbreiteten Meinung, dass starke Erdbeben aufgrund der zu geringen Gesteinsfestigkeit kaum in sehr oberflächennahen, durch Tiefbohrungen erreichbaren Bereichen auftreten können, sind mehrere Beispiele solcher Erdbeben in der Schweiz bekannt. So ereignete sich beispielsweise 1999 ein Erdbeben mit einer Magnitude von 4.3 in Freiburg in nur 2 km Tiefe oder 1997 eines am Walensee mit einer Magnitude von 3.8 in 1 km Tiefe. Diese Tatsache darf bei der Gefährdungs- und Risikoanalyse eines Tiefengeothermieprojektes nicht ausser Acht gelassen werden.

Induzierte Erdbeben

In der Fachliteratur gibt es keine einheitliche Definition des Begriffs „induzierte Erdbeben“. Der SED orientiert sich an der Definition des geologischen Dienstes der USA (USGS), der alle vom Menschen verursachten oder ausgelösten (d.h. anthropogenen) Erdbeben als induziert bezeichnet. Dabei wird nicht versucht zu unterscheiden, inwieweit ein Beben primär existierende tektonische Vorspannungen vorzeitig freisetzt oder nicht („triggering“).

Unterschied zu natürlichen Erdbeben

Induzierte Seismizität wird oft durch grössere technische Eingriffe im Untergrund (z. B. Tunnelbauten, Förderung von Öl- oder Gasvorkommen) oder an der Erdoberfläche (z. B. Befüllen von Stauseen) verursacht. Menschengemachte Erdbeben wurden bereits vor mehr als 100 Jahren im Zusammenhang mit dem Kohlebergbau beobachtet, etwa in Deutschland oder England. Induzierte Erdbeben sind normalerweise schwächer als die regional grössten natürlichen Beben. Rein physikalisch unterscheiden sich induzierte (menschengemachte) aber nicht von natürlichen (tektonischen) Beben. Eine Zuordnung, wenn auch oft keine abschliessende, ist lediglich aufgrund des Orts des Bebens, des Zeitpunktes, des Herdmechanismus und des Zusammenhangs mit den vorgenommenen Eingriffen möglich.

Ursachen induzierter Erdbeben

Induzierte Seismizität entsteht, wenn sich bei geotechnischen Eingriffen in den Untergrund dessen natürliches Spannungs- und Festigkeitsgefüge verändert und existierende Verwerfungszonen entweder weiter vorgespannt oder geschwächt werden. Die Ursachen dafür sind vielfältig. Eine ausführlichere Beschreibung der Ursachen induzierter Seismizität finden Sie im ungekürzten Bericht sowie in dessen Literaturhinweisen. Die wichtigsten sind im Folgenden aufgeführt:

- **Auflaständerungen**
Grosse Auflaständerungen durch das Hinzufügen oder Wegnehmen von sehr grossen Massen an der Oberfläche können in der Tiefe zu Änderungen im Spannungsgefüge führen. Diese lösen unter Umständen eine Reaktivierung von bestehenden Störungen aus. Beispiele sind der Berg- oder Tunnelbau sowie das Befüllen und Entleeren von Stauseen.
- **Volumenänderung (poroelastischer Effekt)**
Durch das Einpressen oder die Entnahme von Flüssigkeiten oder Gasen im Untergrund verändert sich das Volumen in den Zwischenräumen des Gesteins. Dies beeinflusst wiederum die Spannungsverhältnisse im Umgebungsgestein, was zur Reaktivierung von bestehenden Brüchen führen kann.
- **Veränderung des Porendrucks (direkter Porendruckeffekt)**
Das Einleiten oder die Entnahme von Flüssigkeiten im Untergrund verändert den Porendruck. Infolge dessen nimmt der durch die Injektion verursachte Flüssigkeitsdruck einen Teil des Gebirgsdruckes auf. Dies verringert die stabilisierende Reibungskraft, welche einem Scherbruch entgegenwirkt. Solche Prozesse treten beispielsweise im Rahmen der Erdgasförderung, beim Verpressen von Abwasser oder der Entnahme von Erdwärme auf.
- **Chemische Schwächung von Verwerfungszonen**
Chemische und hydraulische Stimulationen können durch chemische und teilweise auch mechanisch-chemische Effekte die Reibungseigenschaften des Gesteins verändern. Wird die Reibung dadurch insgesamt verringert, können sich natürlich aufgebaute Spannungen eher entladen.

Besonderheiten bei Tiefengeothermieprojekten

Induzierte Seismizität ist kein ausschliessliches Phänomen von Tiefengeothermieprojekten, sondern betrifft auch die Öl-, die Gas- und die Bergbauindustrie. Jedoch weisen Tiefengeothermieprojekte einige Besonderheiten auf:

- Tiefengeothermieprojekte befinden sich oft in der Nähe von Städten. Dies erhöht bei einem Beben das Risiko, dass die Bevölkerung sowie Gebäude und Infrastrukturen betroffen sind.
- Bei sogenannten „Enhanced Geothermal Systems (EGS)“ werden mit Stimulationstechniken bewusst kleinere Erdbeben ausgelöst, um die Wasserdurchlässigkeit des Gesteins zu erhöhen. Mit der Anzahl der dabei ausgelösten Beben steigt auch die Wahrscheinlichkeit für grössere induzierte Erdbeben.
- Hydrothermale Projekte zielen oft auf tektonische Bruchsysteme ab, da dort eine nochmals höhere Wasserdurchlässigkeit erwartet wird als im Zielaquifer. Dabei besteht das Risiko, dass diese Bruchsysteme grösser sind und sich leichter aktivieren lassen als angenommen und somit die Erdbebengefährdung höher als erwartet ausfällt.
- In Tiefengeothermieprojekten, vor allem bei solchen vom EGS-Typ, gibt es relativ wenig Erfahrungswerte. Es besteht daher ein höheres Risiko, dass sich diese Systeme anders verhalten als erwartet.

Die Rolle des SED bei Tiefengeothermieprojekten

Der SED ist die Fachstelle des Bundes für Erdbeben und gemäss Alarmierungsverordnung die verantwortliche Bundesstelle für Erdbebenmeldungen. Im Auftrag des Bundes überwacht der SED die Erdbebenaktivität in der Schweiz und im grenznahen Ausland und erstellt die nationalen Gefährdungs- und Risikoanalysen. Im Falle eines Erdbebens informiert der SED Öffentlichkeit, Behörden und Medien über den Ort, die Stärke und mögliche Auswirkungen des Bebens und orientiert über die Wahrscheinlichkeit von weiteren Beben. Deshalb nimmt der SED spätestens dann eine offizielle Rolle bei Tiefengeothermieprojekten ein, wenn induzierte Erdbeben verspürt werden.

Der SED führt traditionell keine projektspezifischen Risiko- und Gefährdungsanalysen von Geothermieprojekten im Auftrag von Betreibern durch. So lassen sich einerseits Interessenkonflikte minimieren und andererseits gibt es private Anbieter im In- und Ausland, die diese Aufgabe kompetent übernehmen können. Der SED sieht seine primäre Rolle darin, die Kantone in ihre Aufsichtspflicht zu unterstützen. Das beinhaltet, dass der SED, wenn gewünscht, eine optimale seismische Überwachung und Alarmierung sicherstellt, die kantonale und lokalen Behörden berät sowie Gefährdungs- und Risikoanalysen als unabhängige Fachstelle zu Händen der Kantone überprüft.

Aktuell kann der SED im Rahmen des vom BFE finanzierten Projektes GEOBEST2020+ im Auftrag von kantonalen Behörden die seismologische Basisüberwachung von Tiefengeothermieprojekten weitgehend kostenlos übernehmen. Zudem kann der SED - wenn von einem Kanton gewünscht - die kantonalen Stellen in allen Projektphasen eines Tiefengeothermieprojektes kostenlos unterstützen und beraten, zum Beispiel bei der Beurteilung des seismologischen Teils der vom Betreiber zu erstellenden Umweltverträglichkeitsprüfung.

Seismische Überwachung von Tiefengeothermieprojekten

Der SED hat in den vergangenen Jahren mehrere Mandate zur seismischen Überwachung von Tiefengeothermieprojekten angenommen. Die wichtigsten Erkenntnisse daraus sind nachfolgend zusammengefasst:

- Ein lokales seismisches Überwachungsnetzwerk sollte professionell geplant und mindestens sechs Monate vor Projektbeginn in Betrieb sein, um zu gewährleisten, dass das System fehlerfrei läuft und um Alarmierungsabläufe vorgängig zu testen. Das Netzwerk muss so geplant werden, dass es auch kleine Beben verlässlich lokalisieren kann. Die genauen Bedürfnisse eines Projekts sollten in jedem Fall einzeln evaluiert werden.
- Es ist sinnvoll, die lokale seismische Überwachung nahtlos in das existierende seismische Netzwerk des SED zu integrieren (Abb.1). Damit lässt sich einerseits die Genauigkeit der Überwachung erhöhen und andererseits eine reibungslose Analyse und Kommunikation im Falle eines unerwünscht starken Erdbebens gewährleisten.
- Die seismischen Aufzeichnungen, inklusive Erdbebenkataloge und -karten, sollten auf einer offiziellen Projektwebseite in Echtzeit frei zugänglich sein. Dies erhöht die Transparenz und gewährleistet die Überprüfbarkeit, beides zentrale Aspekte im Hinblick auf die gesellschaftliche Akzeptanz. Ideal ist es, wenn die Daten von einer unabhängigen Fachstelle wie etwa dem SED zur Verfügung gestellt werden.
- Vor Projektbeginn sollte ein Alarmierungskonzept für den Fall unerwünscht starker Beben erstellt werden. Dieses stellt sicher, dass Betreiber, Behörden und möglichst auch die Bevölkerung in Echtzeit informiert werden.

Seismische Ampelsysteme

Seismische Ampelsysteme als Kontrollsysteme zur Überwachung der Seismizität haben zum Ziel, negative Auswirkungen induzierter Seismizität zu vermeiden oder weit möglichst einzudämmen. Traditionelle Ampelsysteme basieren auf einer engmaschigen Überwachung der induzierten Seismizität und sehen abhängig von der registrierten maximalen Magnitude unterschiedliche Massnahmen vor. Solche traditionellen Systeme wurden in Basel und St. Gallen angewendet, sie arbeiten rein reaktiv.

Der SED testet derzeit ein vorrausschauendes, adaptives Ampelsystem. Dabei dient nicht nur die beobachtete maximale Magnitude als Massnahmenindikator, sondern es werden auch Vorhersagen über den möglichen Verlauf gemacht. Zusätzlich werden Betriebsparameter (z. B. Injektionsrate und -druck) miteinbezogen. Basierend auf den prognostizierten Auswirkungen von vorgesehenen Injektionsverläufen, der beobachteten Durchlässigkeit des Gesteins und weiteren Faktoren sollen mit Hilfe statistischer und physikalischer Modelle Vorhersagen über die Wahrscheinlichkeit stärkerer induzierter Erdbeben gemacht werden. Übersteigt diese Wahrscheinlichkeit einen von der Aufsichtsbehörde vordefinierten Schwellenwert, können früher Gegenmassnahmen eingeleitet werden, um das Auftreten von Beben möglichst einzugrenzen.

Beurteilung geplanter Tiefengeothermieprojekte mittels GRID

Für jedes geplante Tiefengeothermieprojekt ist es unerlässlich, die mögliche seismische Aktivität sowie die damit einhergehende Gefährdung und das Risiko abzuschätzen. Darauf aufbauend gilt es, wenn notwendig Massnahmen zu entwickeln, die dem Schutz von Mensch, Umwelt, Gütern und Bauten dienen sowie den lokalen geologischen Verhältnissen und der Ausgestaltung der Anlage Rechnung tragen. Als Einstig, um eine solch umfassende Situationsanalyse für ein bestimmtes Geothermieprojekt zu erarbeiten und um Projekte grob in Risikoklassen zu gruppieren, empfiehlt der SED das Bewertungsraster „Geothermal Risk of Induced Seismicity Diagnosis (GRID)“ (Trutnevyte & Wiemer, 2017) mit leichten Anpassungen. Diese, in Kraft et al. (2020) aufdatierten, Empfehlungen und Arbeitsprozesse schlagen für alle Phasen eines Projekts geeignete Massnahmen vor. Die Empfehlungen umfassen technische Aspekte wie die Gefährdungs- und Risikoabschätzungen, die Art der seismischen Überwachung und der Ampelsysteme etc., sowie Kommunikationsaspekte, wie etwa den Einbezug von Betroffenen und Behörden.

Es ist wichtig zu beachten, dass GRID keine Risikostudie ist oder ersetzt, es strukturiert lediglich die Diskussion in einer frühen Phase eines Projekts und macht Vorschläge für das weitere Vorgehen. GRID ist zudem nur relevant für offene Systeme und für die Bohrphase von tiefen geschlossenen Systemen. Bei Geothermieprojekten, die als geschlossene Systeme betrieben werden, findet kein Flüssigkeitsaustausch mit dem Umgebungsgestein statt. Bei diesen flachen oder tiefen Erdwärmesonden sind die Mechanismen, die zu induzierter Seismizität führen, mit Ausnahme von lokalen Abkühlungseffekten unwirksam.

Mit Hilfe des GRID Bewertungsrasters verteilen die involvierten Parteien Punkte für verschiedene Risikofaktoren. An diesem Prozess sollten mindestens drei Parteien beteiligt sein: der Anlagebetreiber, die Bewilligungsbehörde sowie ein oder zwei unabhängige Experten. In einem ersten Schritt verteilt jede Partei ihre GRID-Punkte. Anschliessend werden die Ergebnisse besprochen. Zuletzt kontrolliert jede Partei ihre Punkte und passt sie gegebenenfalls an. Diesen Prozess sollten die Parteien dokumentieren, um einen transparenten Verlauf der Risikobeurteilung zu gewährleisten. Abschliessend entscheidet die genehmigungspflichtige Behörde über die weiteren Schritte und allfällige Massnahmen.

Der SED stellt Ihnen hier ([DOI: 10.3929/ethz-b-000453301](https://doi.org/10.3929/ethz-b-000453301)) ein Excel-File zur Verfügung, welches Sie und Ihre Experten zur Vergabe und Darstellung der GRID-Punkte verwenden können.

Vor Projektbeginn stehen üblicherweise nur verallgemeinerte Indikatoren des durchschnittlichen Verhaltens der Systeme zur Verfügung. In Kombination erlauben sie aber eine grobe Einschätzung des erwarteten Risikos induzierter Seismizität. Verschiedene, für die Beurteilung des induzierten seismischen Risikos relevanten Indikatoren, sind nachfolgend beschrieben:

Indikatoren für seismische Gefährdung

- Tiefenlage des geplanten Reservoirs
Es wird angenommen, dass tiefere Systeme aufgrund des Festigkeitsprofils der Erdkruste zu mehr induzierten Erdbeben führen.
- Injektions- oder Fördervolumen
Je grösser das Volumen des Gesteins ist, das von den Spannungsänderungen betroffen ist, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass es zu Erdbeben kommt.
- Gesteinstyp des geplanten Reservoirs
Bei Systemen im kristallinen Grundgebirge ist ausgehend von Erfahrungswerten sowie aufgrund der gesteinsmechanischen Eigenschaften im Vergleich zu solchen in Sedimentgesteinen mit stärkerer induzierter Seismizität zu rechnen.
- Injektionsdrücke
Im Allgemeinen ist die Wahrscheinlichkeit induzierter Erdbeben umso höher, je grösser die Porendruckänderungen sind, denen der Untergrund ausgesetzt ist.
- Natürliche Seismizität in der Region
Die intuitive Vermutung, dass Gebiete mit einer regional niedrigen natürlichen Erdbebenaktivität auch mit geringerer induzierter Seismizität (bezgl. Anzahl und Stärke) auf geotechnische Eingriffe reagieren, ist bislang nicht statistisch belegt und auch geomechanisch nicht zwingend. Studien zeigen, dass in Regionen mit niedriger Erdbebengefährdung ebenso viele und starke induzierte Erdbeben auftreten können wie anderswo. Allerdings ist in Regionen mit höherer natürlicher Seismizität die Unterscheidung zwischen natürlichen und induzierten Erdbeben schwieriger.
- Nähe zu aktiven seismischen Störungen
Injektionen in der Nähe von bekannten aktiven Störungssystemen erhöhen die Wahrscheinlichkeit induzierter Erdbeben markant. Die lokalen Spannungsfelder und Bruchnetzwerke sind in der Regel äusserst komplex und heterogen und haben einen starken Einfluss auf das seismische Verhalten des Untergrundes. Nur in seltenen Fällen sind sie ausreichend genau bekannt, um verlässliche Vorhersagen zu treffen.

Indikatoren für das seismische Risiko

- Lokale Verstärkungseffekte
Je nach Beschaffenheit kann der lokale Untergrund die von Erdbeben verursachte, seismische Bodenbewegung verstärken. Wie gross dieser Effekt ausfällt, lässt sich anhand der Baugrundklassen der Baunorm SIA 261 (SIA, 2013) oder, falls diese nicht vorliegen, mit Abbildung 15 des ungekürzten Berichtes abschätzen.
- Exposition und Verletzbarkeit
Die möglichen Folgen eines induzierten Erdbebens hängen einerseits von der Anzahl potentiell betroffener Personen und Werte ab (Exposition) und andererseits von deren Verletzbarkeit.
- Sekundäre Risiken
Neben der direkten Einwirkung der seismischen Bodenbewegung können Personen und Sachwerte auch durch Phänomene geschädigt werden, die von induzierten Erdbeben ausgelöst wurden. Beispielsweise können Erdbeben in sensiblen Bereichen Hangrutschungen oder Flutwellen verursachen.

Indikatoren für gesellschaftliche Akzeptanz

- Akzeptanz der Tiefengeothermie in der Bevölkerung
Neben den seismologischen sowie technischen Gefahren und Risiken ist die gesellschaftliche Akzeptanz für den Erfolg oder Misserfolg eines Projekts entscheidend.
- Vertrauen in die Akteure
Je grösser das Vertrauen der Bevölkerung in die Bewilligungsbehörde und den Betreiber, desto grösser ist tendenziell die Akzeptanz für ein Geothermieprojekt.
- Nutzen für die lokale Bevölkerung
Der direkte oder indirekte Nutzen, der sich für die lokale Bevölkerung aufgrund eines Geothermieprojekts ergibt, wirkt sich entscheidend auf die gesellschaftliche Akzeptanz aus.

GRID-Bewertungsraster

Faktoren der Erdbebengefährdung	0 (wenig beunruhigend)	1 (beunruhigend)	2 (sehr beunruhigend)
Reservoirtiefe	< 1 km	1 - 3 km	> 3 km
Totales Injektionsvolumen während Stimulation	< 1'000 m ³	≤ 10'000 m ³	> 10'000 m ³
Tägliches Injektions- oder Extraktionsvolumen während des Projekts	< 1'000 m ³ /Tag Injektion oder < 5'000 m ³ /Tag Extraktion	≤ 10'000 m ³ /Tag Injektion oder ≤ 50'000 m ³ /Tag Extraktion	> 10'000 m ³ /Tag Injektion oder > 50'000 m ³ /Tag Extraktion
Gesteinstyp	Sedimente	innerhalb 500 m Abstand vom kristallinen Grundgebirge	Kristallines Grundgebirge
Abgrenzung zwischen Hintergrund und induzierter Seismizität	Erdbebenzonen 1a/1b in SIA (2020)*	Erdbebenzone 2 in SIA (2020)*	Erdbebenzonen 3a/3b in SIA (2020)*
Druck der Fluidinjektion	< 0.3 MPa	0.3 - 10 MPa	> 10 MPa
Distanz zu bekannten und möglichen aktiven Verwerfungen	> 5 km	≤ 5 km	< 2km
Faktoren des Erdbebenrisikos (in 5 km Umkreis)	0 (wenig beunruhigend)	1 (beunruhigend)	2 (sehr beunruhigend)
Lokale Verstärkungseffekte ** <i>weiche Böden = Baugrundklasse D, E, F in SIA (2020)</i>	Keine Gebäude oder Infrastrukturen auf weichen Böden	<10 % der Gebäude oder Infrastrukturen auf weichen Böden	≥ 10 % der Gebäude oder Infrastrukturen auf weichen Böden
Exponierte Bevölkerung	Abgelegen (< 100 Einwohner)	Ländlich (< 20'000 Einwohner)	Urban (> 20'000 Einwohner)
Industrielle oder kommerzielle Aktivität	Geringe Aktivität	Mittlere Aktivität ≥ 1 Firma mit 100 - 499 Angestellten oder ≥ 1 Industrieanlage von besonderem Wert	Hohe Aktivität ≥ 5 Firmen mit 100-499 Angestellten oder ≥ 2 Firmen mit über 500 Angestellten oder ≥ 2 Industrieanlagen von besonderem Wert
Relevanz der Gebäude und Infrastrukturen	Keine Gebäude der Klasse II oder III (SIA, 2020)	keine Gebäude oder Infrastrukturen der Klasse III (SIA, 2020))	Gebäude oder Infrastrukturen der Klasse III (SIA, 2020)
Infrastrukturen mit beachtlichem Umweltrisiko	Keine	-	Eine oder mehr
Nicht strukturell verstärktes Kulturerbe	< 5 % der Gebäude, die als wichtiges lokales, regionales oder nationales Kulturerbe gelistet sind	≤ 10 % der Gebäude, die als wichtige lokales, regionales oder nationales Kulturgut gelistet sind	> 10 % der Gebäude, die als wichtiges lokales, regionales oder nationales Kulturgut gelistet sind oder mind. ein Gebäude, das als internationales Kulturgut gelistet ist
Anfälligkeit für Sekundärrisiken	Sehr tief	Mässig	Hoch
Gesellschaftliche Faktoren	0 (wenig beunruhigend)	1 (beunruhigend)	2 (sehr beunruhigend)
Risikopotential für die Bevölkerung	Keines	Besteht	Signifikant
Verletzliche oder sich stark widersetzen Interessengruppen	Keine	Bestehen	Signifikant
Negative Erfahrungen mit ähnlichen Projekten	Keine	Bestehen	Signifikant
Mangel an Vertrauen in Projektbetreiber oder Behörden	Keine	Besteht	Signifikant
Vorteile für lokale Bevölkerung	Direkte Vorteile mit oder ohne finanzielle Entschädigung	Nur finanzielle Entschädigung	Keine

* <https://s.geo.admin.ch/8cb9c5fc86> (map.geo.admin.ch → Seismic zones; SIA, 2020)

** Wenn Baugrundklasse nicht definiert, kann Abb. 15 des ungekürzten Berichtes verwendet werden.

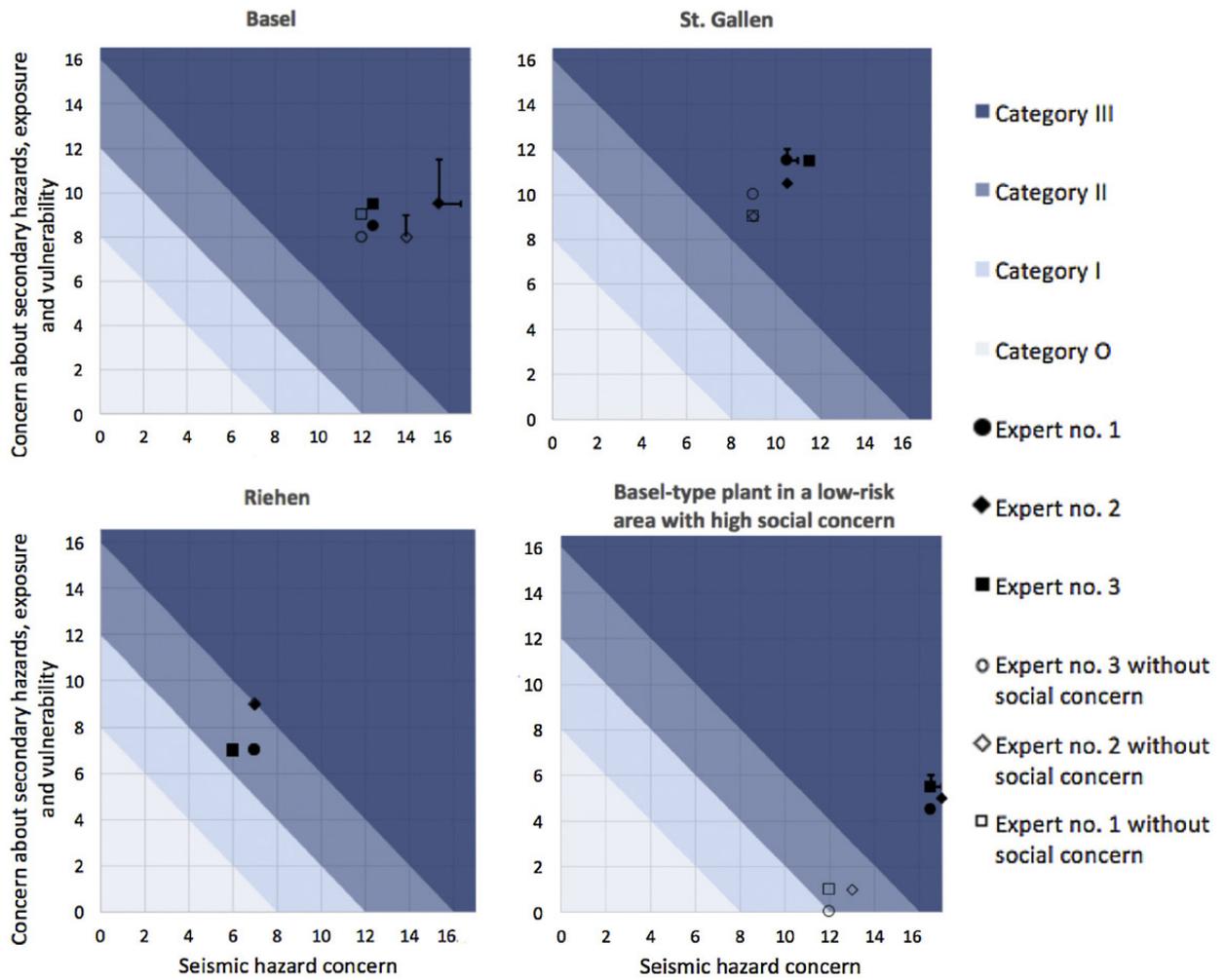


Abbildung 4: Ergebnisse der GRID-Bewertung für die Geothermieprojekte Basel, St. Gallen und Riehen sowie für ein hypothetisches Basel-artiges Projekt in einer Region mit niedrigem seismischem Risiko aber hoher gesellschaftlicher Skepsis.

Risikogovernance-Strategien für die GRID-Kategorien

Abhängig von den kumulierten GRID-Punkten, die den verschiedenen Risikofaktoren zugewiesen wurden, fällt das zu beurteilende Projekt in eine der folgenden Kategorien:

Kategorie 0

In dieser Kategorie ist es sehr unwahrscheinlich oder auszuschliessen, dass induzierte Seismizität auftritt. Typischerweise gehören geschlossene Systeme, wie tiefe Erdwärmesonden oder Explorationsbohrungen ohne hydraulischen Stimulationen zur Kategorie 0.

Empfohlene Massnahme

Eine Risiko- und Gefährdungsbeurteilung oder eine spezielle seismische Überwachung sind nicht notwendig. Falls jedoch die gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber dem Projekt gering ist, können Betreiber oder Behörden freiwillige Überwachungsmaßnahmen einsetzen.

Kategorie I

Es ist unwahrscheinlich, dass induzierte Seismizität auftritt. Typischerweise fallen hydrothermale Projekte in existierenden Aquiferen in diese Kategorie, die in einer Tiefe von bis zu 3 km und in Gebieten mit geringem seismischem Risiko und hoher gesellschaftlicher Akzeptanz liegen (Abb. 5).

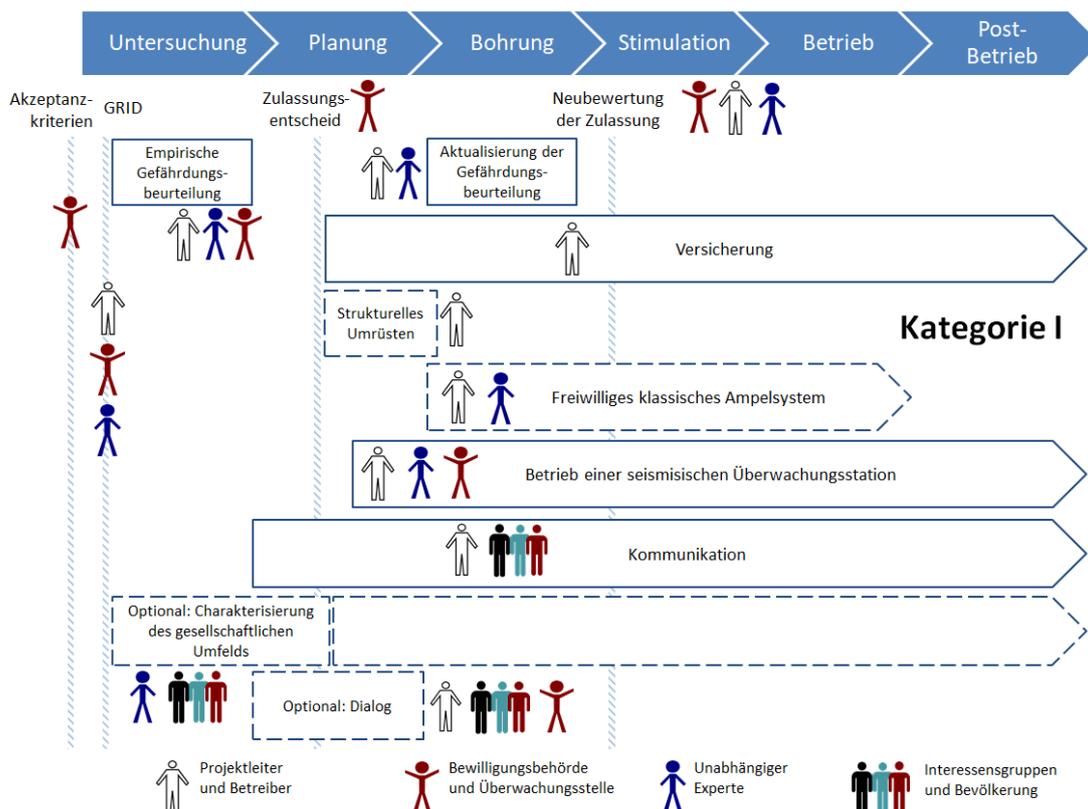


Abbildung 5: Schematische Übersicht der empfohlenen Massnahmen für die GRID-Kategorie I.

Empfohlene Massnahmen

- Gefährdungs- und Risikoanalyse
 - Eine Gefährdungsbeurteilung für induzierte Seismizität sollte basierend auf empirischen Daten von ähnlichen Projekten und einfachen Szenarioberechnungen durchgeführt werden. Dazu sollten die natürliche Seismizität in einem Umkreis von 10 km sowie die erwarteten Spannungsänderungen in Bohrlochnähe betrachtet werden. Die aus empirischen Daten und anhand ähnlicher Projekte abgeschätzte mittlere jährliche Wahrscheinlichkeit für ein induziertes Erdbeben mit einer Magnitude von 2.0 (ML) sollte nicht über einem Prozent liegen, ansonsten sollte das Projekt in die Kategorie II verschoben werden.
 - Eine spezielle qualitative Risikobetrachtung sollte für Gebäude und Infrastrukturen der Klassen III (SIA, 2020) sowie für Kulturgüter im Umkreis von mind. 5 Kilometern um den Projektstandort erstellt werden.
 - Es ist nicht zwingend notwendig, ein seismisches Ampelsystem zu betreiben. Es ist jedoch sinnvoll, Gegenmassnahmen und Kommunikationswege für unerwartete Ereignisse zu definieren und zu dokumentieren.
 - Die Reinterpretation von reflexionsseismischen Daten ist nicht zwingend notwendig.
- Überwachung und Kontrollmechanismen
 - Obwohl verspürte Seismizität unwahrscheinlich ist, sollte sie laufend überwacht und offen kommuniziert werden. Dazu sollte eine seismische Station mindestens drei Monate vor Projektbeginn und bis sechs Monate nach Projektende die Bodenbewegungen kontinuierlich aufzeichnen.
 - Vor einer hydraulischen Stimulation sollte der Zustand von Gebäuden und Infrastrukturen der Klasse III (SIA, 2020) sowie von Kulturgütern im Umkreis von mind. 5 Kilometern dokumentiert werden.
 - Die seismischen Bodenbewegungen bei ausgewählten Gebäuden und Infrastrukturen der Klasse III (SIA, 2020) sowie bei Kulturgütern im Umkreis von mind. 5 Kilometern sollten überwacht werden.
- Versicherungsschutz
 - Eine Versicherungspolice für induzierte Seismizität ist sinnvoll.

Kategorie II

Induzierte Seismizität ist möglich, bis hin zu schadenbringenden Beben. In diese Kategorie fallen typischerweise hydrothermale Projekte in bestehenden, tiefer als 3 km liegenden Aquiferen. Bruchsysteme, die allerdings nicht stimuliert werden, befinden sich womöglich in der Nähe der Bohrung. In allen Betriebsphasen muss induzierte Seismizität berücksichtigt und offen kommuniziert werden (Abb. 6).

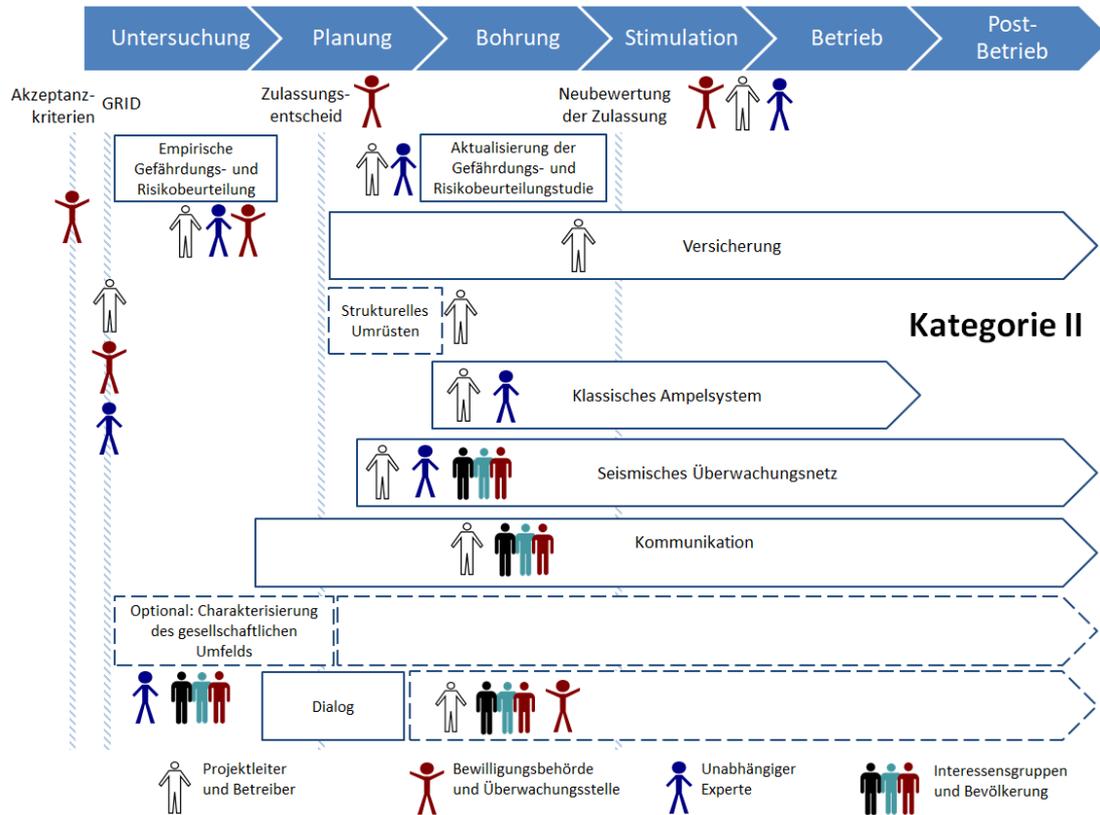


Abbildung 6: Schematische Übersicht der empfohlenen Massnahmen für die GRID-Kategorie II.

Empfohlene Massnahmen

- Gefährdungs- und Risikoanalyse
 - Zusätzlich zur deterministischen Gefährdungsbeurteilung der Kategorie I gilt es die Unsicherheiten, unter Berücksichtigung von alternativen Modellen und Wirkmechanismen, zu quantifizieren. Ebenfalls sollte ein „worst-case“-Szenario beziffert werden. Falls die - aus Modellierungen, empirischen Daten und anhand ähnlicher Projekte abgeschätzte - mittlere jährliche Wahrscheinlichkeit eines induzierten Bebens mit einer Magnitude von 3.0 (ML) oder mehr über einem Prozent liegt, sollte das Projekt in die Risikokategorie III verschoben werden.
 - Eine spezielle Risikobeurteilung sollte für Gebäude und Infrastrukturen der Klassen II und III (SIA, 2020) sowie für im Umkreis von mind. 5 Kilometern um den Projektstandort erstellt werden.
 - Der Betrieb eines klassischen Ampelsystems wird empfohlen. Dazu sollten Gegenmassnahmen und Kommunikationswege definiert und dokumentiert werden.
 - Es kann sinnvoll sein, repräsentative 2D-Daten oder gegebenenfalls auch 3D-Daten zu erheben oder existierende Daten neu zu interpretieren.

- Überwachung und Kontrollmechanismen
 - Es ist empfehlenswert, eine Überwachungsstrategie zu definieren, einschliesslich des Falls, dass induzierte Seismizität auftritt.
 - Das seismische Überwachungsnetz sollte es erlauben, verspürte Beben zu lokalisieren und ein klassisches Ampelsystem zu betreiben. Dazu braucht es ein seismisches Netzwerk, das alle Erdbeben mit Magnituden grösser oder gleich 1.0 (ML) in einem Umkreis von mind. 5 km um den Projektstandort zu gut lokalisieren kann. Die Messkampagne sollte sechs Monate vor Projektbeginn starten.
 - In der Nachbetriebsphase ist es wichtig, die Seismizität weitere sechs Monate zu überwachen.
 - Wenn während der hydraulischen Stimulations- und Testphase ein Beben mit einer Magnitude von grösser oder gleich 1.0 (ML) in einem Umkreis von 2.5 km vom Projektstandort auftritt, sollte diese unterbrochen und die seismische Gefährdung neu beurteilt werden.
 - Während der Betriebsphase sollten erste Kontrollmechanismen des Ampelsystems greifen, wenn ein Beben mit einer Magnitude von grösser oder gleich 1.5 (ML) in einem Umkreis von 2.5 km vom Projektstandort auftritt.
 - Vor einer hydraulischen Stimulation sollte der Zustand von Gebäuden und Infrastrukturen der Klasse III (SIA, 2020) sowie von Kulturgütern im Umkreis von mind. 5 Kilometern dokumentiert werden.
 - Die seismischen Bodenbewegungen bei ausgewählten Gebäuden und Infrastrukturen der Klasse III (SIA, 2020) sowie bei Kulturgütern im Umkreis von mind. 5 Kilometern sollten überwacht werden.

- Versicherungsschutz
 - Eine Versicherungspolice für induzierte Seismizität ist sinnvoll.

Kategorie III

Schadensverursachende Beben sowie eine ablehnende Haltung der Bevölkerung sind möglich. Die Risiken von induzierten Beben sollten deshalb genau analysiert und überwacht werden. In diese Kategorie fallen typischerweise EGS-Projekte, die mehr als 3 km tiefliegende Kristallingesteine stimulieren, möglicherweise in der Nähe von Bruchsystemen. Aber auch hydrothermale Projekte in Gebieten mit hohem Risiko und hoher gesellschaftlicher Besorgnis können in diese Kategorie fallen. Es wird empfohlen, die Gefährdungs- und Risikobeurteilung für induzierte Seismizität nicht nur von den zuständigen Genehmigungsbehörden, sondern auch von unabhängigen Experten, beispielsweise dem SED, überprüfen zu lassen (Abb. 7).

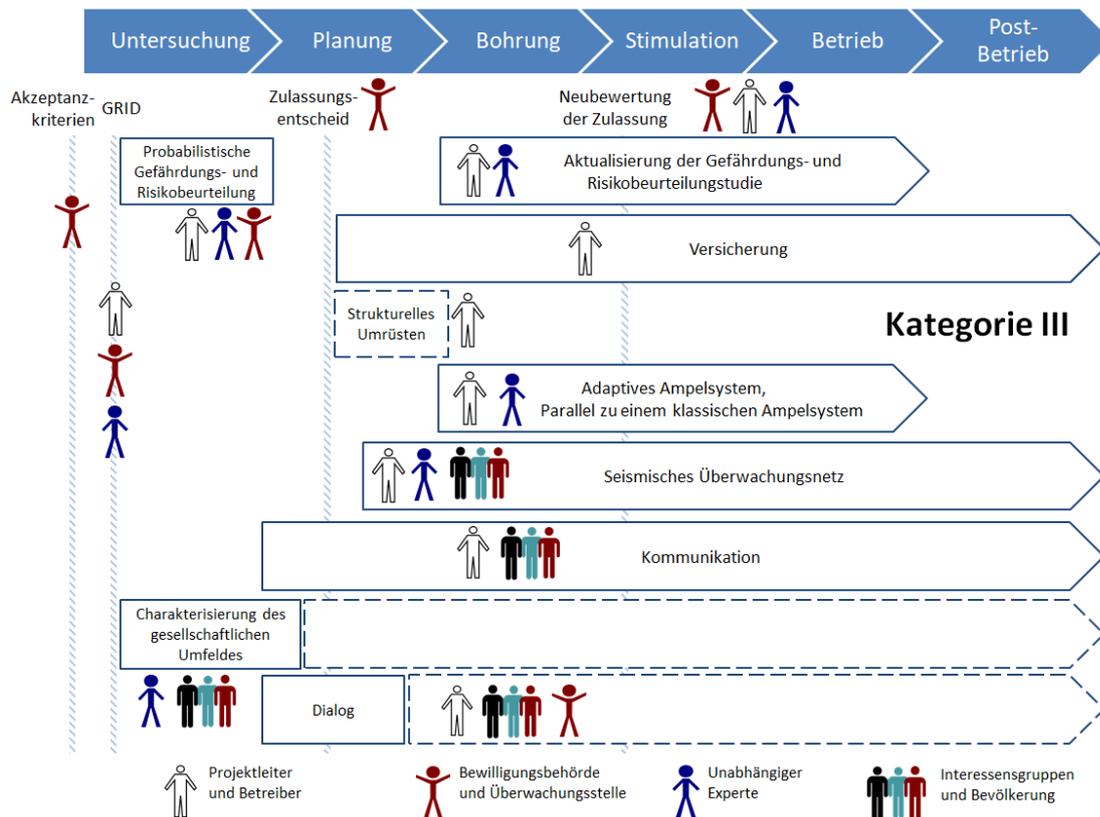


Abbildung 7: Schematische Übersicht der empfohlenen Massnahmen für die GRID-Kategorie III.

Empfohlene Massnahmen

- Gefährdungs- und Risikobeurteilung
 - Für diese Kategorie ist eine detaillierte, probabilistische Gefährdungs- und Risikobeurteilung notwendig. Ereignisse, die mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit auftreten, aber hohe Schäden verursachen können, sollten mitberücksichtigt werden.
 - Eine spezielle Risikobeurteilung sollte für Gebäude und Infrastrukturen der Klassen I, II und III (SIA, 2020) sowie für Kulturgüter im Umkreis von mind. 5 Kilometern um den Projektstandort erstellt werden.
 - Parallel zu einem klassischen Ampelsystem empfehlen wir als Kontrollmechanismus auch ein adaptives Ampelsystem einzurichten. Dazu sollten Gegenmassnahmen und Kommunikationswege definiert und dokumentiert werden.
 - Akzeptanzkriterien für induzierte Seismizität sollten im Einvernehmen mit allen Interessensgruppen gewählt und dokumentiert werden.
 - Auftretende induzierte Seismizität gilt es so schnell als möglich und transparent zu kommunizieren, auch an die Bevölkerung.
 - Es empfiehlt sich, verschiedene Tests in die Stimulationsphase einzubauen, welche die Vorhersagemodelle und Annahmen der Gefährdungs- und Risikobeurteilungsstudie validieren. Gegebenenfalls muss diese danach angepasst werden.
 - Für Projekte innerhalb oder nahe sedimentärer Gesteinspakete kann es sinnvoll sein, hochwertige reflexionsseismischer 3D-Daten zu erheben. Die Reinterpretation existierender 2D- und 3D-Daten ist in jedem Fall empfehlenswert.
 - Ein unabhängiges externes Expertengremium sollte die Behörden und den Betreiber bei unvorhersehbaren Ereignissen unterstützen.

- Überwachung und Kontrollmechanismen
 - Eine Überwachungsstrategie sollte definiert werden, welche auch die Möglichkeit von stärkeren Beben beinhaltet.
 - Das seismische Überwachungsnetz sollte es erlauben, verspürte Beben zu lokalisieren und ein adaptives Ampelsystem zu betreiben. Dazu braucht es ein seismisches Netzwerk, das alle Erdbeben mit Magnituden von 0.5 (ML) oder grösser in einem Umkreis von 5 km um den Projektstandort zu lokalisieren. Die Messkampagne sollte sechs Monate vor Projektbeginn starten.
 - In der Nachbetriebsphase sollte die seismische Überwachung ohne die Anzahl der Stationen zu reduzieren solange weiterlaufen, bis die Seismizität wieder das Niveau vor der Stimulation erreicht hat.
 - Wenn während der hydraulischen Stimulations- und Testphase ein Beben mit einer Magnitude von 1.5 (ML) oder mehr in einem Umkreis von 2.5 km vom Projektstandort auftritt, sollte diese unterbrochen und die seismische Gefährdung neu beurteilt werden.
 - Das klassische Ampelsystem und das adaptive Ampelsystem sollten automatisch laufen.
 - Vor einer hydraulischen Stimulation sollte der Zustand von Gebäuden und Infrastrukturen der Klassen II und III (SIA, 2020) sowie von Kulturgütern im Umkreis von 5 Kilometern werden.
 - Die seismischen Bodenbewegungen bei ausgewählten Gebäuden und Infrastrukturen der Klassen II und III (SIA, 2020) sowie bei Kulturgütern im Umkreis von 5 Kilometern sollten überwacht werden.
 - Über die Aufnahme des Zustandes und die Überwachung der Bodenbewegung bei Gebäuden der Klasse I (SIA, 2020) sollte unter Einbezug der Bevölkerung nachgedacht werden.

- Versicherungsschutz
 - Eine Versicherungspolice für induzierte Seismizität ist sinnvoll.

Ergänzende Dokumente und Informationen

Excel Datei zur Vergabe von GRID-Punkten: doi.org/10.3929/ethz-b-000453301

Informationen zur Unabhängigkeit und Transparenz des SED:
www.seismo.ethz.ch/about-us/portrait/independence-and-transparency/

Hintergrundinformationen zum Thema Geothermie und Erdbeben:

- [Geothermie erklärt in Kürze](#)
- [Formen der Geothermie](#)
- [Geothermie und induzierte Erdbeben](#)
- [Massnahmen zur Eindämmung induzierter Seismizität](#)
- [Weiterführende Informationen zur Überwachung von Geothermieprojekten durch den SED](#)

Literatur

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>.