



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 30. November 2009

Deep Heat Mining Basel - Seismische Risikoanalyse

Kurzfassung

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Geothermie
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Departement für Wirtschaft, Soziales und Umwelt des
Kantons Basel-Stadt
Amt für Umwelt und Energie

Bundesamt für Umwelt BAFU
CH-3003 Bern

Auftragnehmer:

Trinational Seismic Risk Analysis Expert Group (SERIANEX Group) c/o
Q-con GmbH
Marktstr. 39
D-76887 Bad Bergzabern
Deutschland

Autor:

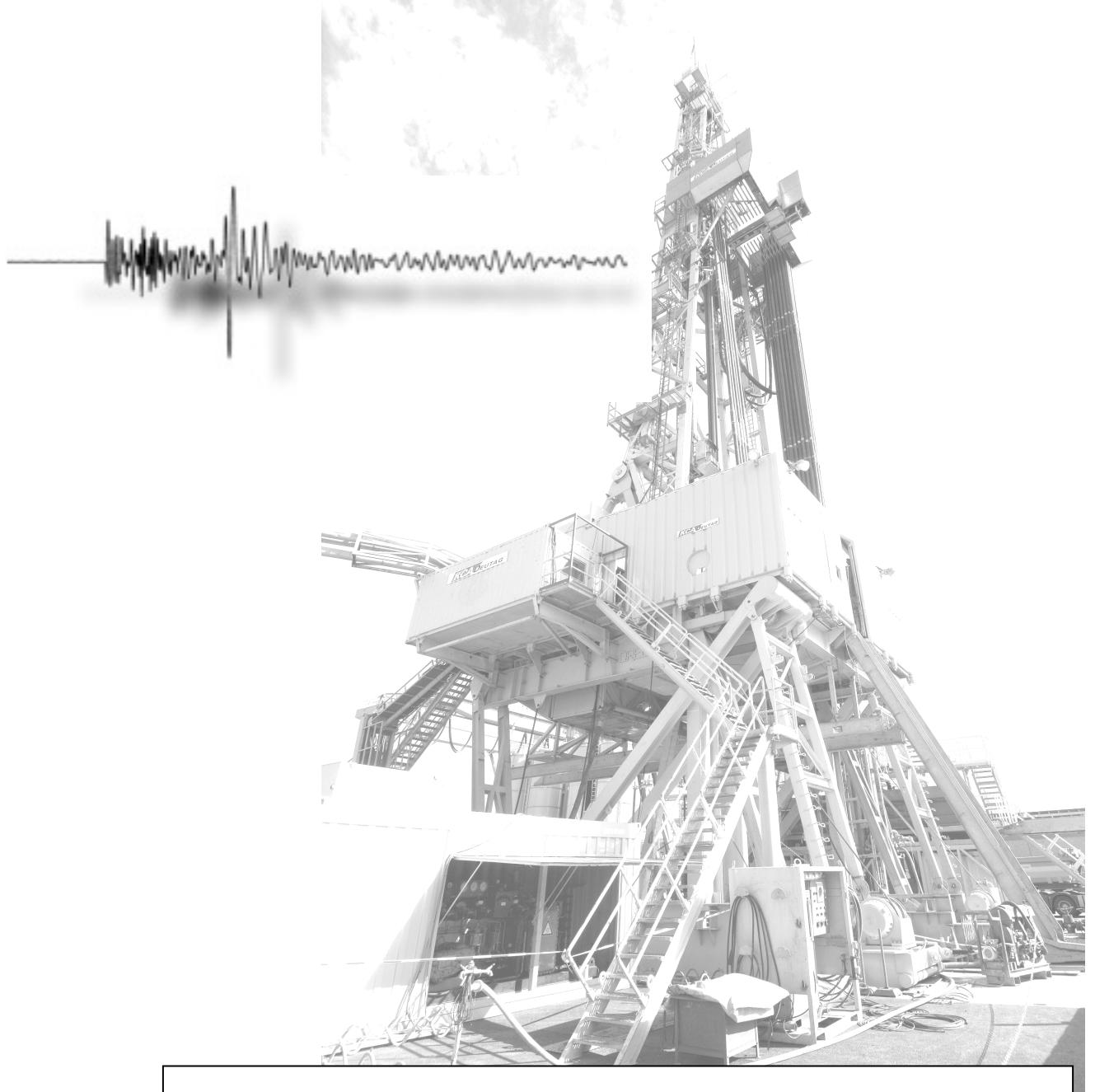
Stefan Baisch, baisch@q-con.de, Q-con GmbH,
Weitere Autoren s. Seite 3/25

BFE-Bereichsleiter: Gunter Siddiqi

BFE-Programmleiter: Rudolf Minder

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153'682 / 102'869

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.



Deep Heat Mining Basel

**Seismic Risk Analysis
Seismische Risikoanalyse
Analyse du risque sismique**

SERIANEX

Titel / Title/ Titre:	Deep Heat Mining Basel - Seismic Risk Analysis Seismische Risikoanalyse Analyse du risque sismique
Verfasser / Authors / Auteurs:	Stefan Baisch, David Carbon, Uwe Dannwolf, Bastien Delacou, Mylène Devaux, François Dunand, Reinhard Jung, Martin Koller, Christophe Martin, Mario Sartori, Ramon Secanell, Robert Vörös
Autor der Kurzfassung:	Stefan Baisch, Q-con GmbH (Projektleiter SERIANEX)
Datum / Date / Date:	30. November 2009
Auftraggeber / Contracting authority / Mandant:	Departement für Wirtschaft, Soziales und Umwelt des Kantons Basel-Stadt Amt für Umwelt und Energie

SERIANEX Group
Trinational Seismic Risk Analysis Expert Group

Firma	Adresse	Arbeitspakete
Q-con GmbH	Marktstr. 39 76887 Bad Bergzabern Germany	AP 1000 - Projekt Management AP 3000 - Induzierte Seismizität AP 4000 - Getriggerte Seismizität AP 7000 - Empfehlungen AP 8000 - Dokumentation
Bureau d'Etudes Géologiques SA (BEG)	Rue de la Printse 2 1994 Aproz Switzerland	AP 2000 Geologisches Modell
JUNG-GEOTHERM	Gottfried-Buhr-Weg 19 30916 Isernhagen Germany	AP 3000 - Appendix 3 Hydraulische Analyse
GEOTER S.A.S	Pôle Géoenvironnement 3, rue Jean Monnet 34830 Clapiers France	AP 5000 Probabilistische Risikoanalyse
RÉSONANCE Ingénieurs-Conseils SA	21 rue Jacques Grosselin 1227 CAROUGE (Genève) Switzerland	AP 5000 - Appendix 2 Untersuchung des Gebäudebestands
RiskCom	Friedrich-Naumann Weg 38 75180 Pforzheim Germany	AP 6000 Risikobewertung und Kommunikation

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung	5
Summary	7
Résumé.....	9
Grundlagen	11
HINTERGRUND	11
ZIELSETZUNG.....	11
AUFBAU DER STUDIE	11
Seismische Risikostudie - Kurzfassung	13
Glossar	23
Appendix	25
AP 2000 - Geological Model	
AP 3000 - Induced Seismicity	
AP 4000 - Triggered Seismicity	
AP 5000 - Seismic Risk Analysis	
AP 6000 - Risk Assessment & Communication	
AP 7000 - Recommendations	

ZUSAMMENFASSUNG

Am 8. Dezember 2006 wurde im Zuge des Ausbaus eines geothermischen Reservoirs in etwa 5 km Tiefe unterhalb der Stadt Basel ein spürbares Erdbeben der Magnitude $M_L = 3.4$ ausgelöst. Die Versicherung der Betreibergesellschaft hat in der Folge rund 7 Mio CHF Sachschäden kompensiert, die diesem Beben zugeschrieben wurden. Das Geothermieprojekt wurde vorübergehend gestoppt. In der vorliegenden, vom Kanton Basel-Stadt beauftragten und vom Bund unterstützten Studie wird das Erdbebenrisiko abgeschätzt, welches durch den weiteren Ausbau und den Betrieb des geothermischen Systems verursacht werden würde.

Neben der unmittelbar durch das Geothermieprojekt verursachten Seismizität berücksichtigt die vorliegende Studie auch den Einfluss des geothermischen Reservoirs auf die natürliche seismische Aktivität in der Region Basel. Im Vordergrund steht dabei die Frage, inwieweit das Auftreten eines grossen Erdbebens durch das Geothermieprojekt beeinflusst werden kann. Ein solches Erdbeben hat im Jahr 1356 große Zerstörungen in der Stadt Basel verursacht.

Um dieser Fragestellung auf den Grund zu gehen, wurde zunächst ein geologisches Modell des Untergrunds im Raum Basel entwickelt. In der weiteren Umgebung des geothermischen Reservoirs wurden acht relevante, natürliche Störungszonen identifiziert, deren Größe ausreichend ist, um grosse Erdbeben zu verursachen. Für diese Störungen wurde die seismische Aktivität abgeschätzt, d.h. in welchen zeitlichen Abständen auf diesen Störungen grosse Erdbeben zu erwarten sind. Durch Veränderungen der Spannungen im Untergrund kann das geothermische Reservoir den Zyklus dieser natürlichen Erdbeben beeinflussen. Modellrechnungen ergeben, dass diese Veränderungen sehr klein sind und nur ein vernachlässigbares Risiko darstellen.

Daneben führen die mit dem Ausbau und dem Betrieb der Anlage verbundenen Vorgänge im Untergrund zu seismischer Aktivität in unmittelbarer Nähe des geothermischen Reservoirs. Für diese Prozesse wurde ein numerisches Modell entwickelt und mittels Computersimulationen sowie empirischen Vergleichen untersucht, wie sich die seismische Aktivität zukünftig entwickeln könnte. Mit hoher Wahrscheinlichkeit würden beim weiteren Ausbau und beim Betrieb der Geothermieranlage unter den gegebenen Standortbedingungen Beben auftreten, die in ihrer Stärke die bisher stattgefundene Aktivität übersteigen. Als obere Grenze ergab sich eine Magnitude in der Größenordnung $M_L=4.5$. In der Ausbauphase muss mit bis zu 30 spürbaren Beben gerechnet werden, von denen bis zu 9 Beben die Stärke des Bebens vom 8. Dezember 2006 erreichen oder sogar überschreiten könnten. Während der 30 jährigen Betriebsphase muss mit 14 bis 170 spürbaren Beben gerechnet werden.

Um das damit verbundene Schadensausmaß bestimmen zu können, wurde der Gebäudebestand im Umkreis von 12 km zur Anlage aufgenommen. Mit einer Klassierung dieser Gebäude nach ihrer Verletzlichkeit konnte so eine probabilistische Modellierung des seismischen Risikos durchgeführt werden. Relevante Sachschäden an Infrastrukturanlagen sind aufgrund einer eingehenden Expertenschätzung bei den zu erwartenden Beben nicht zu befürchten. Für den weiteren Ausbau des geothermischen Reservoirs wurde ein

Zusammenfassung

wahrscheinlichster Sachschaden von etwa 40 Mio CHF ermittelt. Diese Summe setzt sich aus leichten, nichtstrukturellen Gebäudeschäden zusammen, die aber aufgrund der hohen Besiedlungsdichte in großer Zahl auftreten würden. Die Wahrscheinlichkeit liegt bei 15%, dass die Schadenssumme im Extremfall sogar auf über 600 Mio CHF steigen könnte. Während des auf 30 Jahre angenommenen Betriebs der Anlage liegt der wahrscheinliche Sachschaden bei 6 Mio CHF pro Jahr.

Während das Risiko, Personenschäden durch das Geothermieprojekt herbeizuführen anhand der Beurteilungskriterien der Störfallverordnung als gering zu erachten ist, kann das Sachschadensrisiko als nicht akzeptabel beurteilt werden. Diese Beurteilung ergibt sich auch aus einem Vergleich mit anderen technischen Risiken in der Schweiz, deren zusammengefasstes Sachschadensrisiko zum Teil geringer ist als dasjenige des Geothermieprojektes.

Angesichts des erheblichen Schadensrisikos wurden alternative Konzepte zum Ausbau des geothermischen Reservoirs am Standort Basel angedacht. Für die hier untersuchten Konzepte eines tiefen geothermischen Systems ist festzustellen, dass sich das Auftreten von Beben nicht vollständig verhindern lassen wird. Daher erfordern alternative Nutzungskonzepte an diesem Standort eine gesonderte Risikobewertung.

Unter dem Aspekt des seismischen Risikos ist der Standort Basel ungünstig, um ein tiefes geothermisches Reservoir im kristallinen Grundgebirge zu nutzen. Andere Standorte in der Schweiz weisen ein deutlich geringeres seismisches Risiko auf. Im Vorfeld zukünftiger Projektentwicklungen in der Schweiz gilt es daher, das standortspezifische seismische Risiko sorgfältig zu evaluieren, wobei die in Basel gewonnenen Erkenntnisse eine wichtige Datenbasis darstellen. Im Vergleich mit den Erfahrungen aus anderen Geothermieprojekten und nach Analyse der Daten des sistierten Projekts bleibt anzumerken, dass die in Basel durch den Ausbau des geothermischen Reservoirs verursachten Erdbeben als aussergewöhnlich stark zu erachten sind.

SUMMARY

In the course of the development of an enhanced geothermal reservoir at a depth of about 5 km underneath the city of Basel, a felt earthquake of magnitude $M_L = 3.4$ was triggered on December 8th, 2006. The operator's insurance paid out property damages of about 7 million CHF, which were attributed to the earthquake. The geothermal project has been suspended since. In the current study, commissioned by the Kanton Basel-Stadt and supported by the Swiss federal government, we assess the seismic risk resulting from continued development and subsequent operation of the geothermal system.

Besides seismicity triggered directly by the geothermal project, the study also considers the impact of the geothermal reservoir on natural seismic activity in the Basel region. The principal issue is to what extent the geothermal project may affect the occurrence of a large earthquake. Such an earthquake caused large damage to the city of Basel in the year 1356.

To analyse the issue, we developed a 3-dimensional geologic model of the subsurface of the Basel region. In the wider vicinity of the geothermal reservoir, eight relevant, natural fault zones were identified, each of them large enough to produce large earthquakes. We estimated the seismic activity of these faults, i.e. the time intervals when large earthquakes could be expected to occur on these faults. We found that the geothermal reservoir can have an impact on the recurrence time of these natural earthquakes by modifying subsurface stresses. But, numerical simulations demonstrate that these variations are very small and represent a negligible risk.

In addition, the development and operation of the project is expected to result in seismic activity in the immediate vicinity of the geothermal reservoir. We developed a numerical model to capture these processes, ran computational simulations and used empirical relations to investigate how future seismic activity might evolve. Given the local conditions, there is a high probability that earthquakes exceeding the strength of previous activity will occur during continued development and operation of the geothermal facility. We expect the biggest event magnitude in the order of $M_L=4.5$. Further, we anticipate up to 30 felt earthquakes in the development phase, 9 of which might reach or exceed the intensity of the earthquake of December 8th, 2006. Within the operational period of 30 years, we expect 14 to 170 felt earthquakes.

To estimate the associated property damage, we recorded the building stock within a radius of 12 km around the facility. Using probabilistic modelling of the seismic risk we classified buildings according to their vulnerability. Based on expert judgement, we expect no relevant property damages to infrastructural facilities resulting from the induced earthquakes. However, in all likelihood property damage of 40 million CHF is to be expected in case of continued development of the geothermal reservoir. This comprises minor structural damages, which we expect to occur in large numbers due to the high population density. There is a 15% probability, that damages will even exceed 600 million CHF in an extreme case. During the projected facility's operational period of 30 years, the most probable property damage is set at 6 million CHF per year.

While the risk of the geothermal project to cause bodily harm is low, the property damage may be deemed as unacceptable according to risk criteria of the Swiss ordinance on major accidents. We reach the same conclusion also by comparing other technical risks in Switzerland, where in some cases potential cumulative damages are less.

In light of the considerable property damage risk in Basel, we evaluated alternative concepts for developing the geothermal reservoir at its current location. We conclude that none of the concepts considered will completely rule out the occurrence of earthquakes. Therefore, alternative utilization concepts at this location will require a separate risk assessment.

From a seismic risk perspective, the location of Basel is unfavourable for the exploitation of a deep geothermal reservoir in the crystalline basement. Other locations in Switzerland may offer a significantly lower seismic risk. A thorough evaluation of site-specific seismic risk should be required for future geothermal project developments in Switzerland. The findings of this Basel study constitute an important data point for future risk assessments. After analyses of the data acquired from the suspended project and after comparison with experiences made in other geothermal projects, we consider the Basel earthquakes caused by the geothermal project to have been exceptionally strong.

RÉSUMÉ

Au cours du développement d'un réservoir géothermique à une profondeur d'environ 5 km sous la ville de Bâle, un séisme perceptible de magnitude $M_L = 3.4$ a été déclenché le 8 décembre 2006. L'assurance de l'exploitant a payé environ 7 millions de CHF de dégâts matériels, attribués à ce séisme. Le projet géothermique a été suspendu depuis. La présente étude, commandée par le Canton de Bâle-ville et soutenue par la Confédération suisse, a pour but l'estimation du risque résultant de la poursuite du développement et de l'exploitation du système géothermique.

En plus de la sismicité directement provoquée par le projet géothermique, l'étude considère également l'impact du réservoir géothermique sur l'activité sismique naturelle de la région de Bâle. La question principale est de savoir jusqu'à quel point le projet géothermique pourrait influencer le déclenchement d'un fort séisme. Un tel séisme a causé d'importants dégâts dans la ville de Bâle en 1356.

Pour étudier ce point, un modèle géologique tridimensionnel de la sub-surface de la région de Bâle a été développé. Dans les environs du réservoir géothermique, huit zones de failles naturelles, assez grandes pour être susceptibles de produire un fort séisme, ont été identifiées. L'activité sismique de ces failles a été estimée, c'est-à-dire l'intervalle de temps avec lequel des séismes majeurs pourraient survenir sur ces failles. Il a été montré que le réservoir géothermique peut avoir un impact sur le temps de récurrence de ces séismes naturels, de part les modifications de contraintes en sub-surface. Cependant, des simulations numériques démontrent que ces variations sont très petites et représentent un risque négligeable.

De plus, le développement et l'exploitation du projet produiront une activité sismique à proximité immédiate du réservoir géothermique. Un modèle numérique a été développé pour modéliser ces processus, des simulations numériques et l'utilisation de relations empiriques ont permis d'étudier la manière dont la future activité sismique pourrait évoluer. Etant données les conditions locales, il y a une grande probabilité que des séismes, dépassant la force de l'activité précédente, se produisent durant le développement et l'exploitation de l'installation géothermique. La magnitude maximale estimée pour ces événements est de l'ordre de $M_L = 4.5$. De plus, jusqu'à 30 séismes perceptibles peuvent être attendus durant la phase de développement, dont 9 pourraient atteindre ou dépasser l'intensité du séisme du 8 décembre 2006. Durant la phase d'exploitation de 30 ans, 14 à 170 séismes perceptibles sont attendus.

Pour estimer les dommages matériels associés, un inventaire du bâti a été dressé, dans un rayon de 12 km autour de l'installation. En utilisant des modélisations probabilistes du risque sismique, les bâtiments ont été classés selon leur vulnérabilité. Sur la base de jugements d'experts, aucun dégât important n'est attendu sur les installations d'infrastructure, en raison des séismes induits. Par contre, selon toute vraisemblance, des dégâts matériels de 40 millions de CHF sont attendus en cas de poursuite du développement du réservoir géothermique. Ceux-ci comprennent des dégâts structurels mineurs attendus en grand nombre en raison de l'importante densité de population. Il y a une probabilité de 15 % que

les dégâts dépassent même 600 millions de CHF, dans le cas extrême. Durant la période d'exploitation de l'installation du projet de 30 ans, le montant de dégâts matériels le plus probable est estimé à 6 millions de CHF par an.

Tandis que le risque de dommages corporels dus au projet géothermique est faible, les dégâts matériels peuvent être considérés comme inacceptables selon les critères d'appréciations de l'Ordonnance Suisse sur les Accidents Majeurs. Cette estimation est également atteinte en comparant d'autres risques techniques en Suisse, pour lesquels, dans certains cas, les dégâts potentiels cumulés sont plus faibles.

Au vu du risque de dégâts considérable, des concepts alternatifs de développement du réservoir géothermique sont développés pour l'emplacement de Bâle. Il est conclu qu'aucun des concepts considérés n'écartera complètement l'occurrence de séismes. De ce fait, ces concepts d'utilisation alternatifs à cet emplacement nécessiteront une estimation du risque indépendante.

Du point de vue du risque sismique, l'emplacement de Bâle est défavorable pour l'exploitation d'un réservoir géothermique profond dans le socle cristallin. D'autres emplacements en Suisse seraient caractérisés par un risque sismique significativement plus faible. Une estimation approfondie du risque sismique spécifique au site devrait être requise pour le développement de futurs projets géothermiques en Suisse. Les résultats de cette étude pour Bâle constituent une base de données importante pour des estimations futures du risque. Après l'analyse des données acquises de ce projet interrompu et la comparaison avec les expériences faites dans le cadre d'autres projets géothermiques, les séismes causés par le projet géothermique de Bâle sont considérés comme ayant été exceptionnellement forts.

GRUNDLAGEN

Hintergrund

Im Zuge der Entwicklung eines geothermischen Reservoirs etwa 5 Kilometer unterhalb der Stadt Basel trat am 8. Dezember 2006 ein Erdbeben der Stärke $M_L = 3.4$ auf. Dieses Beben wurde in der Stadt deutlich gespürt und auch akustisch als lauter Knall wahrgenommen. Sachschäden in der Größenordnung von 7 Millionen CHF wurden nachträglich durch die Versicherung der Betreibergesellschaft kompensiert.

Nach dem Erdbeben vom 8. Dezember 2006 wurde die weitere Entwicklung des geothermischen Systems zunächst eingestellt und durch den Kanton Basel-Stadt diese Risikostudie beauftragt.

Zielsetzung

In der vorliegenden Studie wird das Erdbebenrisiko abgeschätzt, welches durch den weiteren Ausbau und den Betrieb des geothermischen Systems verursacht werden würde. Zielsetzung der Studie ist es, eine wissenschaftliche Entscheidungsgrundlage zur Beurteilung der Tragbarkeit des mit der Geothermieanlage verbundenen Risikos bereitzustellen.

Dabei wird zwischen zwei Formen des Erdbebenrisikos unterschieden. Zum einen werden Erdbeben betrachtet, die durch den Ausbau und den Betrieb der Anlage unmittelbar im geothermischen Reservoir verursacht werden (induzierte Seismizität). Andererseits wird untersucht, inwieweit durch die Geothermieanlage die natürliche Erdbebenaktivität in der Region Basel beeinflusst werden könnte (getriggerte Seismizität). Insbesondere wird untersucht, wie sich der zeitliche Wiederholungszyklus eines schweren Erdbebens, wie dem aus dem Jahr 1356, verändern könnte. Die sich daraus ergebenden Erdbebenrisiken werden in Form von Personen- und Sachschäden quantifiziert. Unter Berücksichtigung einer vergleichenden Risikobewertung werden darauf aufbauend Empfehlungen für das weitere Vorgehen erarbeitet.

Aufbau der Studie

Die Studie ist in sechs Arbeitspakete gegliedert. Für jedes Arbeitspaket wurde ein eigener Abschlussbericht erstellt. Diese, in englischer Sprache verfassten Berichte, bilden den Anhang des vorliegenden Dokuments. In der nachfolgenden, deutschsprachigen Kurzfassung werden die wichtigsten Ergebnisse der Arbeitspakete allgemein verständlich dargestellt.

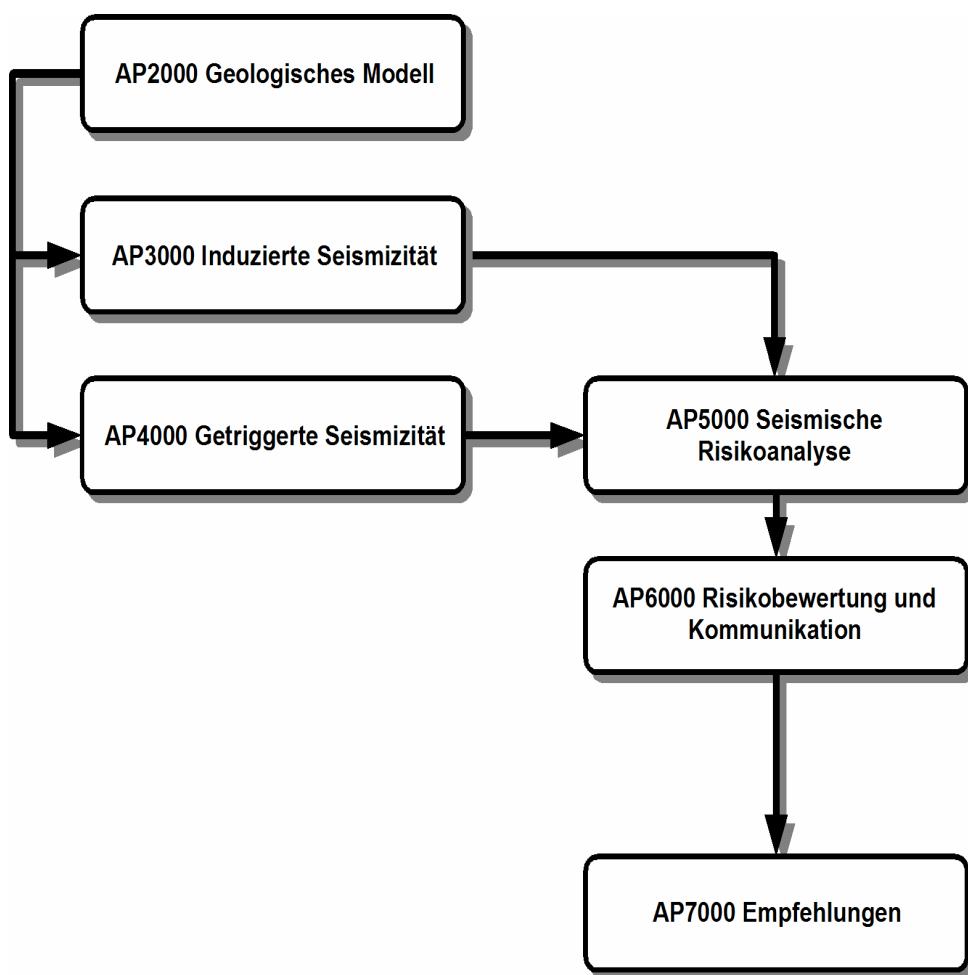


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Risikostudie.

SEISMISCHE RISIKOSTUDIE - KURZFASSUNG

Um das Erdbebenrisiko abzuschätzen, das sich aus dem weiteren Ausbau und dem Betrieb der Geothermieanlage ergeben würde, ist es von großer Bedeutung, die natürlichen Veränderungsprozesse im Untergrund zu verstehen. Das mit der Geothermieanlage verbundene seismische Risiko kann nur über die Wechselwirkung mit den natürlichen Vorgängen vollständig erfasst werden.

Generell verursachen die natürlichen Verschiebungen in der Erdkruste (Plattentektonik) Spannungen im Untergrund, die sich im Laufe der Zeit aufstauen können. Wird ein kritischer Grenzwert erreicht, so können die Spannungen in Form eines Erdbebens wieder abgebaut werden. Anhaltende Verschiebungsprozesse führen zu einem erneuten Spannungsaufbau und damit zu einem Kreislauf wiederkehrender Erdbeben.

Erdbeben finden entlang von Schwächezonen, so genannten Verwerfungen, statt. Dort kommt es während eines Erdbebens zu Versatzbewegungen benachbarter Gesteinsblöcke. Dabei wächst die Stärke des Erdbebens (Magnitude) mit der Größe der betroffenen Verwerfung. Für die Risikostudie ist es deshalb erforderlich, die natürlichen Verwerfungen mit ausgedehnten Bruchflächen im Umfeld der Geothermieanlage zu identifizieren und den dort stattfindenden, natürlichen Spannungsaufbau abzuschätzen.

Unter Berücksichtigung umfangreichen Datenmaterials aus publizierten Studien wurde der aktuelle Kenntnisstand bezüglich der lokalen Geologie und der natürlichen Verwerfungssysteme zusammengefasst. Generell besteht hierbei die Schwierigkeit, dass die Verwerfungssysteme im Untergrund nicht direkt zugänglich sind. Existenz und Verlauf einer Verwerfung können oft nur indirekt abgeschätzt werden. Zwar erstrecken sich manche Verwerfungen bis an die Erdoberfläche, wo sie beobachtet und kartiert werden können. Allerdings ist deren weiterer Verlauf in der Tiefe oft mit Unsicherheiten behaftet. Diese Schwierigkeiten spiegeln sich auch darin wieder, dass trotz intensiver Forschung bis heute nicht abschließend geklärt werden konnte, auf welcher Verwerfung das schwere Erdbeben stattgefunden hat, welches im Jahr 1356 große Zerstörungen in Basel verursachte.

Um diesen Unsicherheiten Rechnung zu tragen, werden im Rahmen der Risikostudie alle bekannten Verwerfungen in der näheren Umgebung des Geothermiestandortes als möglicher Ursprung großer Erdbeben betrachtet. Die Lage der so identifizierten acht wichtigsten Verwerfungen ist in der Abbildung 2 dargestellt. Sechs dieser Verwerfungen sind groß genug, um ein schweres Erdbeben, wie das aus dem Jahr 1356, zu beherbergen. Die größte Verwerfung hat eine Länge von etwa 40 km.

Die Tiefenerstreckung dieser Verwerfungen ist zum Teil nur schlecht belegt. Daher wurde für jede Verwerfung eine maximale Tiefenerstreckung aus vorhandenen Erdbebenmessungen abgeschätzt. So definiert die Tiefenlage der kleineren, in dieser Region regelmäßig stattfindenden Erdbeben, die maximale Tiefe, in der das Gestein noch ausreichend hohe Spannung aufnehmen kann. Gleichzeitig kann über die Erdbebenmessungen auch auf die Richtung und die Geschwindigkeit der natürlichen Verformungsprozesse im Untergrund geschlossen wer-

den. Auf diese Weise konnte ein Modell zur Beschreibung der natürlichen Erdbebenaktivität in der Region um Basel erstellt werden.

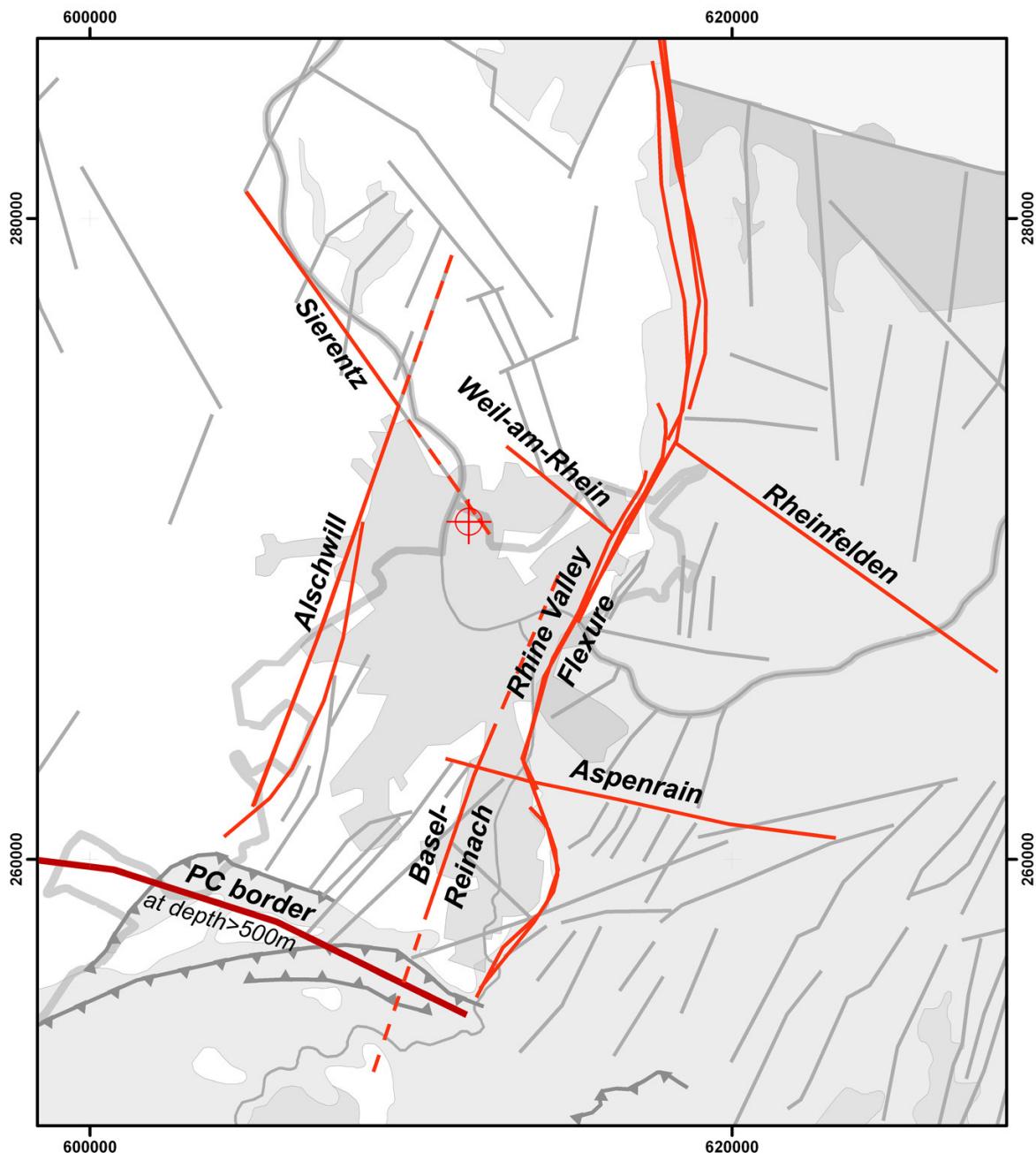


Abbildung 2: Karte der acht wichtigsten, natürlichen Verwerfungen im Umfeld des durch ein Fadenkreuz markierten Geothermiestandortes. Für nähere Details sei hier auf den Anhang AP2000 verwiesen.

Neben dem Modell für die natürliche Erdbebenaktivität bedarf es auch eines Modells zur Beschreibung derjenigen Erdbeben, die durch das geothermische System verursacht wurden (induzierte Erdbeben). Während der Wasserverpressung im Dezember 2006 bewirkte der zusätzliche Flüssigkeitsdruck lokale Spannungsveränderungen im Untergrund, so dass eine Vielzahl kleinerer Erdbeben ausgelöst wurde. Die mit diesen Erdbeben verbundenen Deformationsprozesse haben die Wasserträgerigkeit im Untergrund erhöht. Auf diese Weise zeichnen die Orte, an denen kleine Erdbeben stattgefunden haben, die dominierenden Wasserwegsamkeiten im Untergrund nach.

Über die dreidimensionale Ortung dieser Erdbeben wurde so ein geometrisches Modell des künstlich geschaffenen, geothermischen Reservoirs abgeleitet. Dieses Modell besteht aus einer geringen Anzahl größerer Rissflächen mit erhöhter Wasserleitfähigkeit. Im Extremfall können diese Rissflächen innerhalb der Datenunsicherheiten auf einen einzelnen Riss mit einer Fläche von etwa 0.75 km^2 zusammen gezogen werden. Messdaten, die während der Wasserverpressung gewonnen wurden, deuten darauf hin, dass die hier aktivierten Rissflächen als Schwächezonen natürlichen Ursprungs bereits existiert haben. Durch die Wasseinpressung im Jahr 2006 hat sich deren Leitfähigkeit um mehrere Größenordnungen erhöht. Die umliegende Gesteinsmatrix weist hingegen keine nennenswerte Wasserleitfähigkeit auf.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde ein Computermodell erstellt, um die Ausbreitung des Wasserdrucks und die damit verbundene Erdbebenaktivität zu simulieren. Das Computermodell beruht auf grundlegenden physikalischen Prozessen und wurde bewusst einfach gehalten. Trotz seiner Einfachheit kann das Modell die wesentlichen Beobachtungen während der Wasserverpressung im Dezember 2006 reproduzieren. Dazu zählt insbesondere, dass auch im Computermodell die stärksten Erdbeben erst unmittelbar nach der Wassereinpressung stattfinden und die Erdbebenaktivität noch über mehrere Monate anhält.

Aufbauend auf diesem Computermodell wurden Simulationsrechnungen für den weiteren Ausbau und den Betrieb des geothermischen Systems durchgeführt. Exemplarisch zeigt die Abbildung 3 das Modell eines Systems, bestehend aus einer Förderbohrung zur Entnahme des heißen Wassers und einer Injektionsbohrung, durch die das abgekühlte Wasser in das geothermische Reservoir zurückgeführt wird.

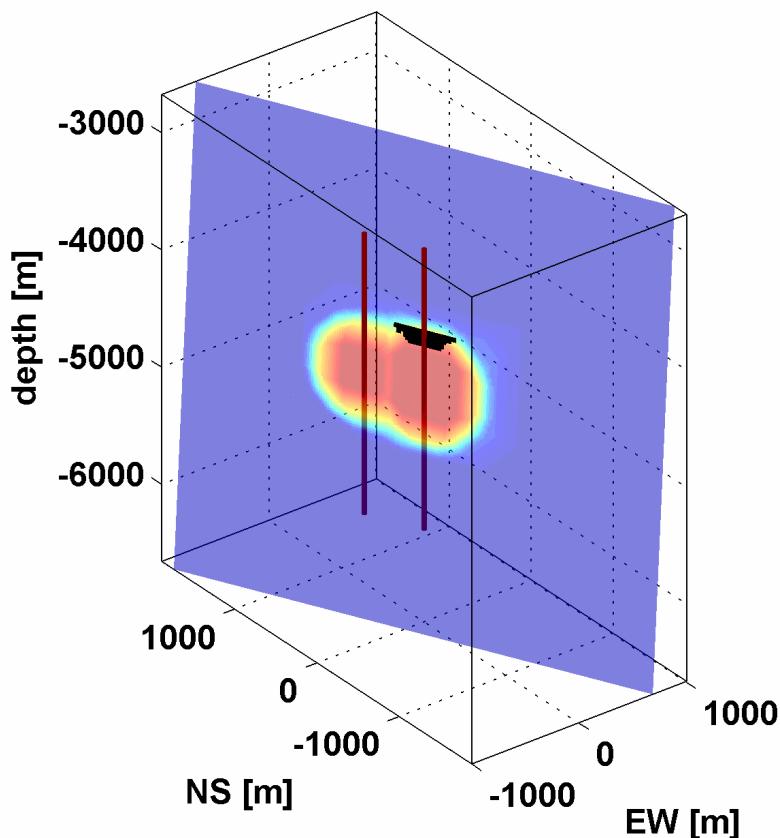


Abbildung 3: Simulation des Ausbaus des geothermischen Systems mit einem Computermodell. Die warmen Farben kennzeichnen Bereiche erhöhter Wasserleitfähigkeit. Neben der tatsächlich existierenden Bohrung (senkrechte Linie, rechts) wurde eine zweite Bohrung im Abstand von 500 m platziert (senkrechte Linie, links). Schwarz gekennzeichnet ist der Bereich, der bei der Computersimulation der Wasserverpressung von 2006 das stärkste Erdbeben produziert hat. Für weitere Details sei hier auf den Anhang AP3000 verwiesen.

Aus den Computersimulationen ergibt sich eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass beim weiteren Ausbau und Betrieb des geothermischen Systems Erdbeben auftreten, die in ihrer Stärke die bisher stattgefundene Aktivität übersteigen würden. Als obere Grenze ergab sich eine Erdbebenstärke in der Größenordnung $M_L=4.5$. In der Ausbauphase muss mit bis zu 30 spürbaren Erdbeben gerechnet werden, von denen bis zu 9 Erdbeben die Stärke des Bebens vom 8. Dezember 2006 erreichen oder sogar überschreiten könnten. Während der 30 jährigen Betriebsphase muss mit 14 bis 170 spürbaren Erdbeben gerechnet werden.

Neben den Computersimulationen wurden Daten vergleichbarer Geothermieprojekte herangezogen, um eine unabhängige Abschätzung der zukünftigen Erdbebenaktivität vornehmen zu können. Aus diesen Daten wurde eine empirische Beziehung zwischen der Größe eines geothermischen Reservoirs und der maximalen Erdbebenstärke abgeleitet. Übereinstimmend mit den Ergebnissen der Computersimulationen ist auch nach dieser Beziehung mit stärkeren Erdbeben während der Ausbauphase des geothermischen Systems zu rechnen,

wobei die obere Grenze der Erdbebenstärke im empirischen Modell etwas geringer liegt (zwischen $M_L=4$ und $M_L=4.5$).

Obwohl die beiden unabhängigen Untersuchungen im Ergebnis zu ähnlichen Erdbebenstärken kommen, bestehen große Unterschiede in der Häufigkeit, mit der stärkere Erdbeben in der Betriebsphase zu erwarten wären. Die Erdbebenaktivität in den Computersimulationen ist maßgeblich davon abhängig, inwieweit der Wasserdruck im Langzeitbetrieb eine Entlastung an den äußeren Grenzen des Reservoirs erfährt. Je weniger Druckentlastung stattfindet, desto stärker ist die Erdbebenaktivität. Es ist sehr wahrscheinlich, dass solche Druckentlastungen auftreten, allerdings konnten diese in dem relativ kurzen Messzeitraum im Dezember 2006 nicht hinreichend bestimmt werden. Deswegen wurden die Computersimulationen ohne eine entsprechende Druckentlastung durchgeführt. Das bedeutet aber, dass die Simulationen die Erdbebenaktivität tendenziell zu hoch einschätzen. Im Gegensatz dazu tendieren die empirischen Beziehungen dazu, die Erdbebenaktivität etwas zu gering einzuschätzen. Das resultiert aus der Annahme, dass in der Betriebsphase kein weiteres Wachstum des Reservoirs stattfindet, was sich aber nicht unbedingt vermeiden lässt. Für einen zukünftigen Betrieb wäre also davon auszugehen, dass die tatsächliche Erdbebenaktivität innerhalb des Bereichs liegt, der durch die Ergebnisse der beiden unterschiedlichen Untersuchungen abgedeckt ist. In der späteren Risikoabschätzung werden beide Untersuchungsergebnisse zugelassen.

Neben den unmittelbar im geothermischen Reservoir verursachten Erdbeben wurde besonderes Augenmerk auf die Frage gelegt, inwieweit durch die Geothermieanlage die natürliche Erdbebenaktivität in der Region Basel beeinflusst werden könnte. In der Ausbau- und Betriebsphase der Geothermieanlage werden die Spannungen im Untergrund verändert. Ursache dafür sind zum einen Deformationsprozesse im Reservoir, die insbesondere während der Ausbauphase stattfinden. Zum anderen werden die Spannungen durch den zusätzlichen Wasserdruck und die allmähliche Abkühlung des Reservoirs beeinflusst. Diese Veränderungen können sich auf den natürlichen Zyklus von Spannungsauf- und -abbau auswirken.

Mit den hier abgeleiteten Modellen wurden Computersimulationen durchgeführt, um diese Spannungsveränderungen zu berechnen. In der Abbildung 4 wird exemplarisch gezeigt, wie die Spannungen auf der größten der umliegenden Verwerfungen, der Rheintal-Flexur, durch den 30 jährigen Betrieb der Geothermieanlage beeinträchtigt würden. An einigen Stellen werden die Spannungen auf dieser Verwerfung erhöht (rote Farben), was einer Zunahme des seismischen Risikos entspricht. Gleichzeitig gibt es aber auch Bereiche, in denen die Spannungen verringert werden (blaue Farben), was mit einer Abnahme des seismischen Risikos gleichzusetzen ist. Um das Auftreten eines starken Erdbebens maßgeblich zu beeinflussen, müssen solche Änderungen über einen großen räumlichen Bereich wirken. So liegt dieser Bereich in der Größenordnung von 100 Quadratkilometern für ein Erdbeben der Magnitude $M_w=6.5$.

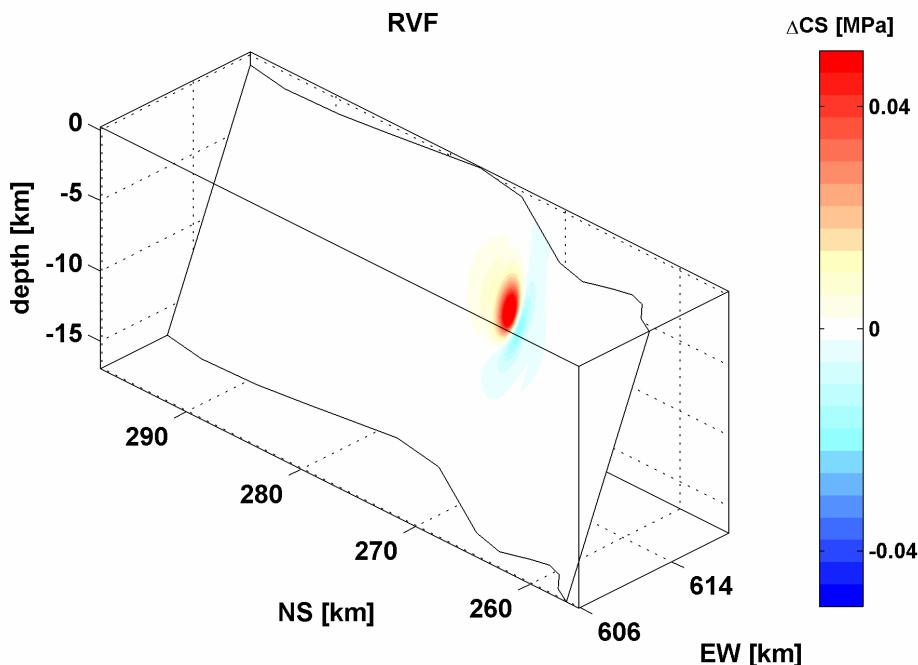


Abbildung 4: Beispiel für die relativen Veränderungen der Spannungen auf der größten Verwerfung aus Abbildung 2 nach einem 30 jährigen Betrieb der Geothermieranlage. Rote Farben kennzeichnen eine Spannungszunahme, blaue Farben eine Abnahme der Spannungen. Für weitere Details sei hier auf den Anhang AP4000 verwiesen.

Für alle umliegenden Verwerfungen wurden entsprechende Computersimulationen durchgeführt. Um die verbleibende Unsicherheit verschiedener Modellparameter zu berücksichtigen, wurden diese Parameter während der Simulationen systematisch variiert. Aus der Vielzahl möglicher Modelle ergibt sich dadurch eine ganze Bandbreite von Spannungsveränderungen. Allen gemeinsam ist allerdings, dass für starke Erdbeben die Größenordnung der Veränderungen sehr gering ist und damit der Zyklus dieser natürlichen Erdbeben durch Ausbau und Betrieb der Geothermieranlage kaum beeinflusst wird.

Dieses zeigt sich besonders deutlich in einer probabilistischen Modellierung der Erdbebengefährdung. Hierbei wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, mit der Erdbeben einer bestimmten Intensität auftreten, wobei die Intensität ein Maß für die Auswirkungen eines Bebens an der Erdoberfläche ist. Verglichen mit der natürlichen Erdbebenaktivität besteht eine zusätzlich erhöhte Wahrscheinlichkeit nur für Erdbeben mit geringen Intensitäten (Abbildung 5).

Der Einfluss des geothermischen Reservoirs auf die Erdbebengefährdung ist während der Ausbaumaßnahmen am größten. In unmittelbarer Nähe der Geothermieranlage wird zu dieser Zeit die natürliche Erdbebengefährdung um das fünfzigfache überschritten. Mit zunehmendem Abstand zur Geothermieranlage nimmt die zusätzliche Gefährdung ab. In 15 Kilometern Entfernung liegt die zusätzliche Gefährdung noch bei dem siebenfachen des natürlichen Werts.

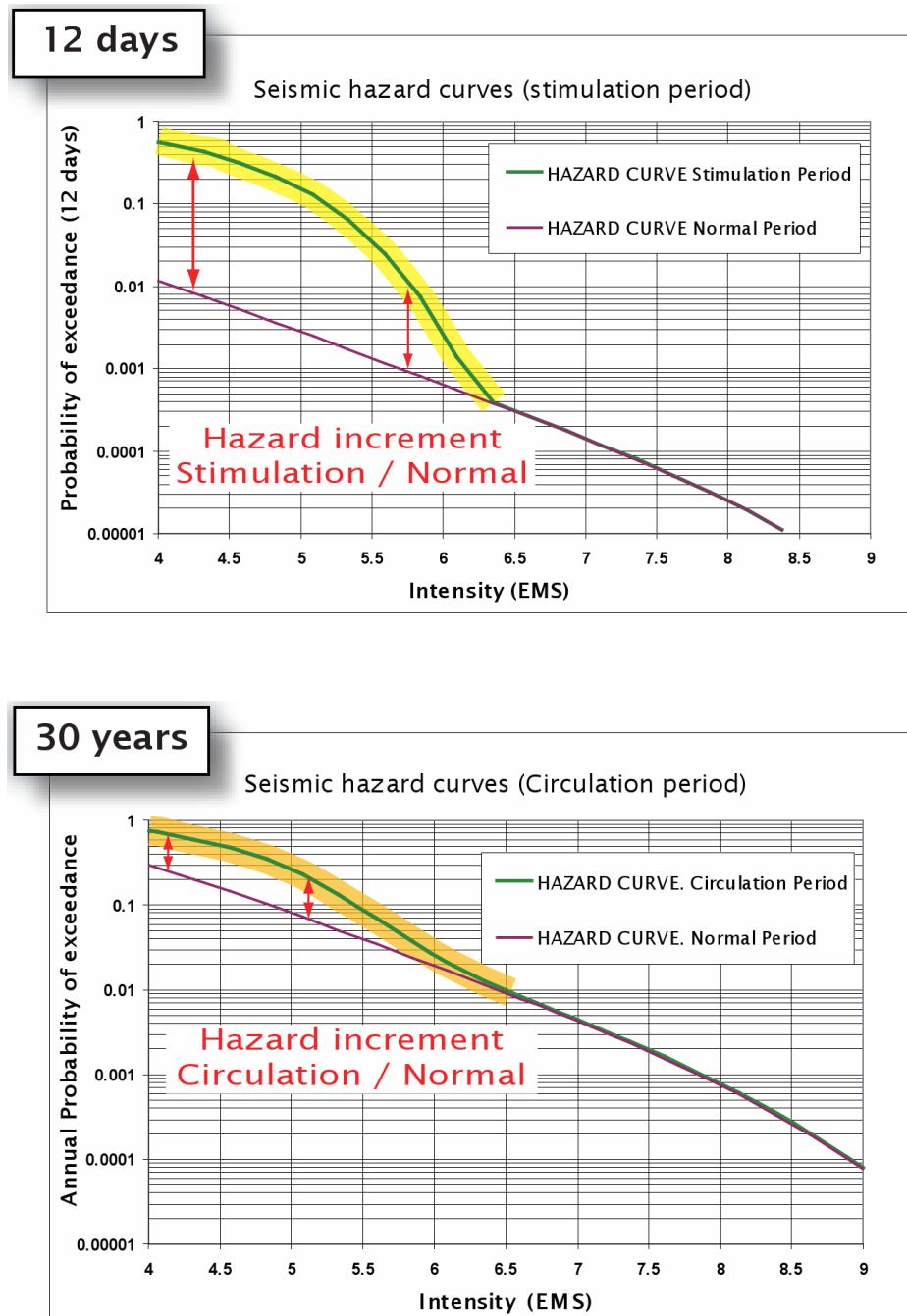


Abbildung 5: Modellierung der Wahrscheinlichkeit (probability of exceedance), Erdbebenintensitäten (Intensity) während der zwölfjährigen Ausbauphase (oben: stimulation period) und innerhalb eines Jahres in der insgesamt dreißigjährigen Betriebsphase (unten: circulation period) zu überschreiten. Zum Vergleich sind auch die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten für die natürliche Erdbebentätigkeit (normal period) angegeben. Die Wahrscheinlichkeiten beziehen sich auf einen Standort in unmittelbarer Nähe der Geothermieranlage. Für weitere Details sei hier auf den Anhang AP5000 verwiesen.

Bis hierher wurde untersucht, wie stark sich die Erdbebenaktivität durch das geothermische Reservoir verändern würde. Um das damit verbundene Schadensausmaß bestimmen zu können, wurde der Gebäudebestand im Umkreis von 12 km zur Anlage aufgenommen. Mit einer Klassifizierung dieser Gebäude nach ihrer Verletzlichkeit konnte so eine Modellierung vorgenommen werden, um die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens einer bestimmten Schadenssumme zu bestimmen. Dieser Zusammenhang konnte über die in Verbindung mit dem Erdbeben vom 8. Dezember 2006 kompensierten Sachschäden kalibriert werden.

Die probabilistische Modellierung des seismischen Risikos ergibt für den weiteren Ausbau des geothermischen Reservoirs einen wahrscheinlichsten Sachschaden von etwa 40 Millionen CHF. Diese Summe setzt sich aus leichten, nichtstrukturellen Gebäudeschäden zusammen, die aber aufgrund der hohen Besiedlungsdichte in großer Zahl auftreten würden. Die Wahrscheinlichkeit liegt bei 15%, dass die Schadenssumme im Extremfall sogar auf über 600 Millionen CHF steigen könnte. Während des auf 30 Jahre angenommenen Betriebs der Anlage liegt der wahrscheinliche Sachschaden bei 6 Millionen CHF pro Jahr. Darüber hinausgehende relevante Sachschäden an Infrastrukturanlagen sind aufgrund einer eingehenden Expertenschätzung bei den zu erwartenden Beben nicht zu befürchten.

Eine entsprechende Analyse wurde auch für mögliche Personenschäden, bedingt durch Gebäudeinsturz, durchgeführt. Verglichen mit dem Risiko aufgrund der natürlichen Erdbebenaktivität ergibt sich ein kaum nennenswerter Beitrag durch die Geothermieanlage.

Sowohl das Personen- wie auch das Sachschadensrisiko liegen außerhalb des Bereiches, in dem die Beurteilungskriterien der Störfallverordnung üblicherweise angewendet werden (Abbildung 6). Die Störfallverordnung hat zum Ziel, Bevölkerung und Umwelt zu schützen vor außerordentlichen Ereignissen, die selten sind aber ein hohes Schadensausmaß aufweisen. Beim Geothermieprojekt sind zum einen nur geringe Personenschäden zu erwarten, die nach den Kriterien der Schweizer Störfallverordnung unterhalb der Schwelle für schwere gesellschaftliche Schäden liegen. Beurteilt man hingegen die zu erwartenden Sachschäden, so sind sie gemäß dem Maßstab der Störfallverordnung hinsichtlich der Häufigkeit des Auftretens und der Schadenssumme als nicht akzeptabel zu beurteilen. Eine Beurteilung des Sachschadensrisikos als nicht akzeptabel ergibt sich auch aus einem Vergleich mit anderen technischen Risiken in der Schweiz, deren zusammengefasstes Sachschadensrisiko zum Teil geringer ist als dasjenige des Geothermieprojektes.

Angesichts des erheblichen Schadensrisikos wurden alternative Konzepte zum Ausbau des geothermischen Reservoirs am Standort Basel angedacht. Aufgrund der relativ geringen natürlichen Wasserdurchlässigkeit der Gesteinsformation im derzeitig erschlossenen Tiefenbereich sind künstliche Maßnahmen (Stimulation) erforderlich, um den wirtschaftlichen Betrieb einer Geothermieanlage zu ermöglichen. Auch das bisher geschaffene Reservoir erscheint in der jetzigen Form ohne zusätzliche Ausbaumaßnahmen nicht nutzbar. Bei den Maßnahmen zum Ausbau würde sich das Auftreten von Erdbeben nicht vollständig verhindern lassen.

Eine Bewertung des seismischen Risikos einer Nutzung der bestehenden Bohrung in einem oberflächennahen Bereich mit einem bereits bestehenden hydrothermalen Reservoir verbunden mit dem Ausbau eines flachen geothermischen Systems wurde im Rahmen dieser Studie nicht vorgenommen. Es sei aber angemerkt, dass im nahe gelegenen Riehen

seit etwa 15 Jahren eine Geothermieanlage zur Wärmegewinnung im Tiefenbereich um 1500 m betrieben wird. Erdbebenaktivität aufgrund dieser Anlage ist nicht bekannt. Generell bleibt zu bemerken, dass alternative Nutzungskonzepte am Standort Basel eine gesonderte Risikobewertung erfordern.

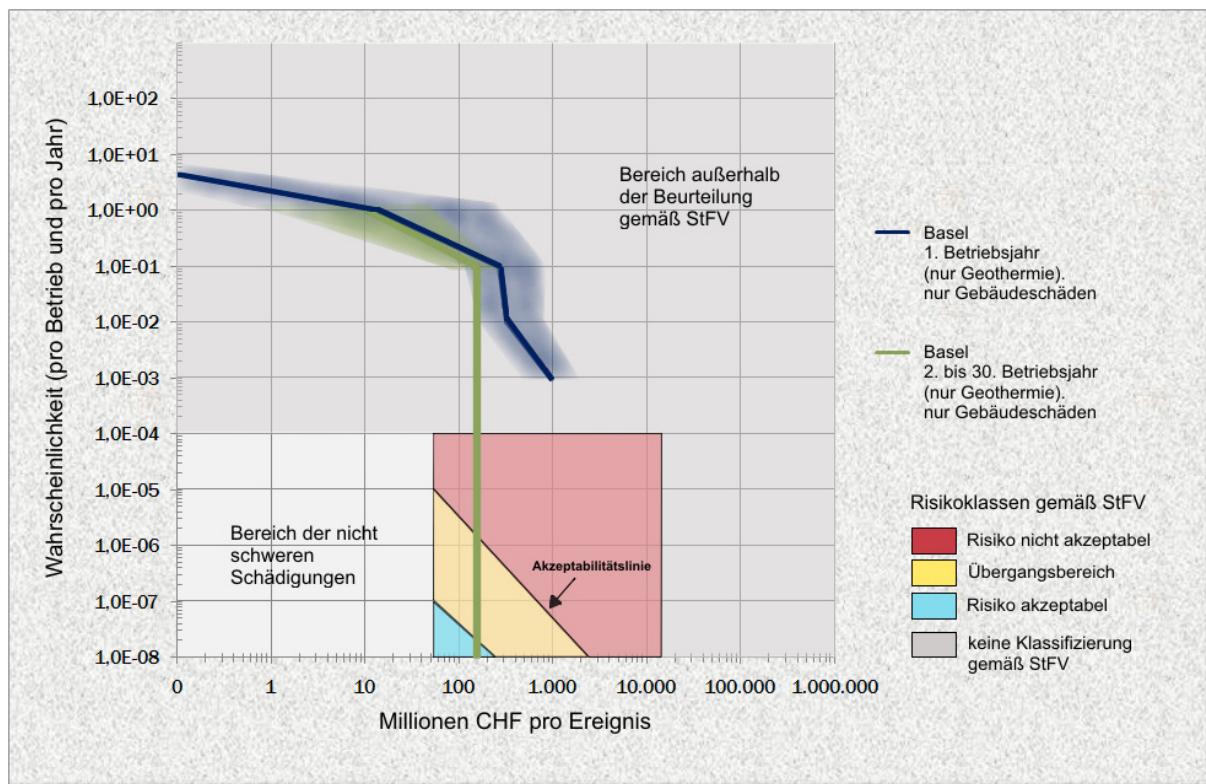


Abbildung 6: Risikobeurteilung nach der Störfallverordnung. Im ersten Betriebsjahr sind auch Schäden aus der Ausbauphase des geothermischen Reservoirs berücksichtigt. Deshalb fallen die Schadenshäufigkeiten im ersten Betriebsjahr (blaue Linie) höher aus als in den Folgejahren (grüne Linie). Für weitere Details sei hier auf den Anhang AP6000 verwiesen.

Unter dem Aspekt des seismischen Risikos ist der Standort Basel ungünstig, um ein tiefes geothermisches Reservoir im kristallinen Grundgebirge zu nutzen. Andere Standorte in der Schweiz weisen ein deutlich geringeres seismisches Risiko auf. Im Vorfeld zukünftiger Projektentwicklungen in der Schweiz gilt es daher, das standortspezifische seismische Risiko sorgfältig zu evaluieren, wobei die in Basel gewonnenen Erkenntnisse eine wichtige Datenbasis darstellen. Im Vergleich mit den Erfahrungen aus anderen Geothermieprojekten und nach Analyse der Daten des sistierten Projekts bleibt anzumerken, dass die in Basel durch den Ausbau des geothermischen Reservoirs verursachten Erdbeben als aussergewöhnlich stark zu erachten sind.

GLOSSAR

Begriff	Erklärung
Erdbebengefährdung	Die Erdbebengefährdung gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Erdbeben mit einer gewissen Stärke in einem bestimmten Gebiet in einem gewissen Zeitraum auftritt.
Erdbebenstärke	Siehe <i>Intensität</i> und <i>Magnitude</i> .
Getriggerte Erdbeben	Natürliche Erdbebenaktivität, die durch den Ausbau und Betrieb der Geothermieranlage beeinflusst werden kann.
Induzierte Erdbeben	Erdbebenaktivität, die durch den Ausbau und Betrieb der Geothermieranlage unmittelbar im geothermischen Reservoir ausgelöst wird.
Intensität	Größe zur Beschreibung der Erdbebenstärke auf einer qualitativen 12-stufigen Skala. Sie wird aufgrund von Beobachtungen des menschlichen Verhaltens sowie der Schäden an Bauwerken und in der Natur bestimmt. Die EMS-98-Skala wird am häufigsten verwendet (EMS: Europäische Makroseismische Skala 1998).
Magnitude	Die Magnitude ist ein Maß für die Stärke von Erdbeben. Magnituden werden überwiegend aus den Amplituden, seltener auch aus anderen Parametern von Seismogrammen bestimmt. Die hier verwendete Lokalmagnitude (M_L) ist allgemein auch als Magnitude auf der Richterskala bekannt. In den Anhängen wird jedoch die in der Wissenschaft gängige Momenten-Magnitude (M_w) verwendet.
Probabilistische Modellierung Risikoanalyse	Verfahren der quantitativen Risikobestimmung, die darauf abzielt, Wahrscheinlichkeiten des Eintretens eines gefährlichen Ereignisses innerhalb eines Risiko-Szenarios abzuschätzen.

Begriff	Erklärung
Störfall Störfallvorsorge	Als Störfälle gelten außerordentliche Ereignisse in Betrieben oder auf Verkehrswegen, wenn dabei erhebliche Einwirkungen (Tote oder Verletzte unter der Bevölkerung, Luft- oder Gewässerverunreinigungen, Bodenbelastungen usw.) außerhalb des Betriebsareals oder beim Verkehrsweg auftreten. Der Schutz der Bevölkerung und der Umwelt vor schweren Schäden basiert in der Schweiz auf der Störfallverordnung. Die gesetzliche Grundlage liegt im Katastrophenschutzartikel des Umweltschutzgesetzes (Art. 10 USG) vor. Dieser wurde im Hinblick auf die praktische Umsetzung mit konkreten Vorgaben in der Störfallverordnung präzisiert.
Störungszone Schwächezone	Bereiche im Untergrund, die durch <i>Verwerfungen</i> gestört sind.
Verletzlichkeit	Hier: quantitative Abschätzung der Schadensanfälligkeit eines oder mehrerer Gebäude desselben Typs für Erdbeben unterschiedlicher Stärke.
Verwerfung	Verwerfungen sind Trennflächen im Untergrund, an denen sich Gesteinsmassen relativ zueinander bewegen können.

APPENDIX

CONTENTS

Report	Title
AP 2000	Structural model of potential seimogenic faults
AP 3000	Induced seismicity
AP 4000	Triggered seismicity
AP 5000	Seismic hazard and risk assessments during three reference time periods (normal, stimulation and circulation)
AP 6000	Technology risk comparison of the geothermal DHM project in Basel, Switzerland - Risk appraisal including social aspects
AP 7000	Recommendations