

# Information zum Thema induzierte Seismizität

## Seismizität in der Geothermiebohrung

### Einleitung

Am 2. Dezember wurden die Einpressversuche von Wasser in das fertiggestellte Bohrloch begonnen. Damit sollen in fünf Kilometern Tiefe die bereits vorhandenen Klüfte und feinen Risse geöffnet und durchlässig gemacht werden, um so ein Wärmereservoir zu erschliessen, in dem das Wasser zirkulieren und sich erhitzen kann. Die Phase der Stimulation war ursprünglich für maximal 21 Tage vorgesehen. Da sich am 8. Dezember ein stark bemerkbarer Erdstoss von Magnitude 3.4 auf der Richterskala ereignete, wurde das Einpressen von Wasser, in Uebereinstimmung mit dem für das Projekt erstellten Massnahmen-Dispositiv, eingestellt. Die Bohrung hat bis Mitte Januar 2007 etwa ein Drittel des eingepressten Wassers wieder an die Oberfläche befördert. Dabei hat die Seismizität inbezug auf die Häufigkeit insgesamt abgenommen. Am 6. Januar ist ein Erdstoss mit Magnitude 3.1 registriert worden und am 16. Januar mit 3.2 .

Das Knacken der sich öffnenden Klüfte beim Einpressen von Wasser wird mit Erschütterungsmessgeräten aufgezeichnet, um die Richtung und Ausdehnung des Kluftsystems zu orten. Diese Erschütterungen haben sich zum weitaus grössten Teil im erwarteten Bereich bewegt; die meisten davon waren an der Oberfläche weder fühl- noch messbar. In vereinzelt Fällen konnten sie jedoch wahrgenommen werden.

Der Schweizerische Erdbebendienst (SED) ist verantwortlich für die unabhängige seismische Überwachung der Stimulation. Er registriert mit speziell installierten eigenen Messstationen an verschiedenen Orten in der Stadt, ob und in welcher Stärke solche Erschütterungen auftreten. Diese Ereignisse werden unmittelbar nach dem Eintreten auf einer speziellen Internetseite ([www.seismo.ethz.ch/basel/](http://www.seismo.ethz.ch/basel/)) publiziert.

In Zusammenarbeit mit internationalen Experten und dem Schweizerischen Erdbebendienst wurde ein Massnahmenplan erarbeitet, der bei erhöhter Seismizität Einschränkungen oder Beendigung der Tests vorsieht. Diese Massnahmen wurden auf der Basis weltweiter Referenzen erarbeitet und wurden bei den Operationen strikt angewendet .

### Chronologie

#### **Vorstimulation, 23. -26.11.2006 :**

Zur Abklärung des Formationsdruckes wurden im November Druckversuche mit geringen Fliessraten von maximal 10 Litern pro Minute durchgeführt. Diese Versuche haben keine seismische Aktivität erzeugt.

#### **Hauptstimulation ab 2.12. 2006**

2. 12. 2006:

Beginn der Hauptstimulation, die auf eine Zeitdauer von maximal 21 Tagen ausgelegt war. Es war geplant, über diesen Zeitraum bis zu 50'000 m<sup>3</sup> Wasser in das Gestein einzupressen.

Die Fliessrate wurde plangemäss schrittweise gesteigert von 10 Litern pro Minute bis zu einem Maximum von 3'800 Litern pro Minute. Dabei stieg der Einpressdruck proportional an von 45 bar auf ein Maximum von 295 bar. Parallel dazu nahm, wie geplant, die mikroseismische Aktivität im Bohrlochbereich zu. Mit der gesteigerten Mikroseismizität stieg auch die Anzahl der Ereignisse mit einer Magnitude grösser als 2.0.

8. 12. 2006

Um 04.06 Uhr wurde ein seismisches Ereignis mit Magnitude 2.7 registriert. Die Fliessrate wurde gemäss dem Massnahmenplan von 3200 l/min auf 1'800 l/min reduziert. Da die mikroseismische Aktivität mit über 100 mikroseismischen Ereignissen pro Stunde noch stets hoch war, wurde um 12.30 Uhr das Einpumpen von Wasser eingestellt und die Bohrung eingeschlossen. Der Druck im Bohrloch sank auf unter 200 bar.

Um 16.46 Uhr erfolgte ein zweites Ereignis mit Magnitude 2.7 . Als Folge davon wurde die Bohrung geöffnet, um das unter Druck stehende Wasser auslaufen zu lassen, was allerdings gemäss Massnahmenplan nicht zwingend notwendig war.

Um 17.48 Uhr wurde ein seismisches Ereignis mit Magnitude 3.4 registriert. Das Hypozentrum der bisher grössten Erschütterung befand sich rund 200 Meter südlich des Bohrloches auf einer Tiefe von 5'000 Metern. An sämtlichen Messstationen des Erdbebendienstes wurde die Beschleunigung des Bodens am jeweiligen Standort gemessen. Diese Messungen geben direkt Auskunft über das Schadenpotenzial einer Erschütterung. Massgebend für die Beurteilung ist die gemessene Bodengeschwindigkeit, die in mm/s gemessen wird. Die höchste in Basel (Otterbach) gemessene Geschwindigkeit betrug 9.3 mm/sec und lag damit deutlich unter dem international verwendeten Schädengrenzwert von 34 mm/sec (siehe unten).

8. 12. 06 – 6. 1. 2007

Die Bohrung blieb geöffnet, um das Wasser ausfliessen zu lassen. Die Fliessraten gingen von zuerst 1000 l/min innert 24 Stunden auf 250 l/min zurück und betrugen am 6. Januar noch 16 l/min. Der Druck am Bohrlochkopf hat sich in dieser Zeit auf weniger als 1 bar reduziert, das heisst, dass sich das Wasser in der Bohrung nun in einem hydrostatischen Gleichgewicht befindet.

Vom 8. Dezember bis zum 6. Januar sind von den ursprünglich injizierten 11'566 m<sup>3</sup> Wasser 2'736 m<sup>3</sup> wieder ausgeflossen; im Untergrund befinden sich zusätzlich zu den bereits vorhandenen Formationswässern noch 8'830 m<sup>3</sup> Wasser aus der Stimulation.

Zwischen dem 8. Dezember und dem 6. Januar hatte sich die Häufigkeit und Intensität der Seismizität stark reduziert, mit nur noch einer leicht spürbaren Erschütterung von Magnitude 2.5 am 14. Dezember.

6.- 16. Januar 2007

Das Hypozentrum der Erschütterung mit Magnitude 3.1 vom 6. Januar 2007 konnte auf wenige hundert Meter südlich des Bohrloches auf einer Tiefe von rund 4'500 m lokalisiert werden. An keiner der fünf Messstationen des SED wurde bei der Magnitude 3.1 eine Bodengeschwindigkeit von mehr als 1 mm/s gemessen, was weit unter dem Grenzwert von 34 mm/sec für Schadenpotenzial liegt.

Bis zum 16. Januar hat die Häufigkeit der Seismizität weiter abgenommen. Am 16. Januar wurde eine Erschütterung mit Magnitude 3.2 gemessen; das Ereignis liegt ebenfalls deutlich unter einer Schadenintensität.

### **Induzierte Erschütterungen**

Wie vorausgesehen, hat das Einpressen von Wasser Erschütterungen erzeugt.

Rund 12'000 einzelne Erschütterungen wurden im Zeitraum vom 2. Dezember 2006 bis zum 16. Januar 2007 registriert, davon waren weniger als ein Promille an der Oberfläche wahrnehmbar.

Drei Erdstösse lagen mit Magnituden auf der Richterskala von 3.4, 3.1, und 3.2 über der ursprünglich erwarteten maximalen Intensität von rund 2.9.

### **Schadenpotenzial**

Die Energie eines Bebens wird in sogenannten Magnituden auf der Richterskala erfasst. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Skala stark logarithmisch ist. Eine Stufe Unterschied bedeutet eine 32 mal höhere Energie, zwei Stufen (z.B. von Magnitude 3 auf Magnitude 5) bedeuten eine rund 1000 mal höhere Energie. Entscheidend für das Schadenpotenzial ist aber die gemessene Beschleunigung des Bodens (gemessen in mm/sec), die nicht nur von der Magnitude abhängt, sondern auch von der Beschaffenheit des Untergrundes (d.h. ob dieser seismische Schwingungen eher verstärkt oder dämpft).

Nach internationalen Normen (Instrumental Intensity, United States Geological Survey) können erste Schäden bei Bodengeschwindigkeiten von 34 mm/s auftreten. Der stärkste Wert bei der induzierten Seismizität in Basel wurde an der Messstation Otterbach mit 9.3 mm/s gemessen (Erdstoss Magnitude 3.4). Die im Epizentrum gemessenen Bodengeschwindigkeiten sind also weit unterhalb einer Schadenintensität und signifikante. Schäden sind bei diesen Grössen nicht zu erwarten; sie sind im Epizentrum, dem Ort der grössten Erschütterungen (mit Messinstrumenten ausgestattete Gebäude bei der Bohrlokation) auch nicht beobachtet worden. Kleinere Schäden, wie z.B. Risse in einer Decke könnten allerdings dort auftreten wo grössere Spannungen in einer Gebäudestruktur bereits vor dem Erdstoss bestanden haben.

Die erfolgten Erdstösse von Magnitude 3.1 – 3.4 entsprechen einer Energie von etwa 1/100 bis 1/1000 eines leichteren Schadenbebens (Magnitude 4.5 - 5.5) und etwa 1/30 000 der Energie des Bebens von 1356.

Rund 750 Meldungen von Beschädigungen (meist kleiner Natur) sind bei bis Mitte Januar eingegangen und werden nun geprüft. Ob signifikante Schäden registriert wurden, ist daher noch nicht bekannt.

Es gibt in der Schweizer Gesetzgebung keine Grenzwerte für Erschütterungen, die potentiell Schäden anrichten können. Für die Evaluation der Sicherheit von Kernkraftwerken werden allerdings nur Beben betrachtet, die eine Magnitude grösser als 5 erreichen.

### **Längerfristiges Erdbebenrisiko**

Beim Einpressen von Wasser in Gesteinsklüfte, wirkt das unter Druck stehende Wasser als Gleitmittel und kann daher entlang von Klüften Spannungen abbauen, die bereits vorhanden sind. Dabei treten die beobachteten Erdstösse auf. Zudem führt das Aufweiten von kleinen Klüften selbst zu einer geringen Seismizität.

Ist der durch die Stimulation ausgelöste Ueberdruck des Wassers einmal abgebaut, gibt es für die Region kein erhöhtes Erschütterungsrisiko mehr; dies gilt insbesondere auch für eine spätere Produktionsphase.. Ein Abbau von bereits vorhandenen Spannungen ist während der Stimulation zwar lokal möglich. Für die Erzeugung von grossen, tiefen Beben ist aber die Energie der künstlichen Stimulation um viele Grössenordnungen zu klein.

### **Hintergrundinformation**

#### **Natürliche Seismizität**

Physikalisch gesehen sind Erdbeben spontane Spannungslösungen, welche Gesteinskörper entlang diskreter Rissflächen versetzen.

Man muss sich bewusst sein, dass sich die Erde andauernd bewegt, wobei Menschen nur einen sehr kleinen Teil dieser Bewegungen wahrnehmen.

Im Raum Basel kommen fast täglich natürliche Spannungslösungen im Gesteinskörper („Knistern“) vor. Statistisch ereignen sich in der Region Basel jährlich zwei deutlich fühlbare natürliche Erdstösse, und in der Schweiz kommt es im Durchschnitt jährlich zu etwa zwei Beben von Magnitude 4 bis 5.

Die allermeisten registrierten Erdstösse sind wesentlich schwächer als die Grenzwerte für Erschütterungen wie sie z.B. für schwere Bauarbeiten oder den Strassen- und Schienenverkehr gelten.

#### **Induzierte Seismizität**

Induzierte Seismizität (Erschütterungen nicht natürlichen Ursprungs) ist ein Phänomen, das bei verschiedensten technischen Anwendungen wie Salzsolung, Staudamm- und Tunnelbau, Kohle- und Erzbergbau, Erdöl- und Erdgasförderung vorkommt.

Auslösender Faktor der induzierten Seismizität und der Erschütterungen ist beim Geothermieprojekt nicht die Bohrtätigkeit, sondern die Wassereinpressung in den Untergrund unter hohem Druck. Mit diesen Wasserinjektionen werden bei dem hier angewandten Hot-Fractured-Rock-Verfahren Klüfte im Gestein aufgebrochen oder bestehende Klüfte erweitert, um die Durchlässigkeit so genannter Reservoirgesteine zu verbessern.

## **Ausmass und Auswirkung der induzierten Seismizität**

Die Aktivitäten der Geopower Basel AG können Erschütterungen auslösen, von denen die meisten angesichts der geringen Energie nicht wahrnehmbar sind. In Basel konnte mit einer ähnlichen maximalen Magnitude wie beim vergleichbaren Geothermieprojekt von Soultz-sous-Forêts im Elsass gerechnet werden (Magnitude 2.9). Bei Basel 1 ist nun dieser Wert dreimal mit Magnituden 3.1 bis 3.4 überschritten worden.

Durch die typische, kurze maximale Schwingungsdauer von induzierten Erdstössen (etwa eine Sekunde) werden gefährliche Resonanzschwingungen in Gebäuden kaum angeregt.

Einige Wissenschaftler nehmen an, dass die Injektion von Flüssigkeit unter hohem Druck die lokale mikroseismische Aktivität zwar erhöht, die seit jeher vorhandene natürliche seismische Gefährdung jedoch verringert, da ein übermässiger Spannungsaufbau verhindert wird. Nach Meinung der Experten reicht die Energie bei einer Wassereinpessung aber nie aus um zu einer präventiven Auslösung von Beben zu führen. Bezeichnenderweise hat keiner der vielen unterirdischen Nukleartests je die nötige Energie erzeugt, um signifikante Beben auszulösen. Die Aktivitäten im Rahmen von Deep Heat Mining Basel geschehen – geologisch gesehen – in geringer Tiefe. In dieser geringen Tiefe sind die Erdspannungen vergleichsweise geringer. Spannungen für Grossbeben werden erst in deutlich tieferen Zonen aufgebaut.

Eine Einstellung der Wassereinpessung führt über einen Zeitraum von Tagen bis Wochen zu einer deutlichen Verringerung der induzierten Seismizität, wobei einige deutliche spürbare Bewegungen auch in der späteren Relaxationsphase noch auftreten können, diese haben vor allem damit zu tun, dass das eingepresste Wasser vorerst noch weiter als Gleitfläche dient. Ist jedoch das Druckgefälle im Untergrund wieder ausgeglichen, so sind keine bleibenden induzierten Spannungen mehr vorhanden und die Gesteinsbewegungen kommen dauerhaft zur Ruhe. Neue, bleibende Spannungsherde werden bei dem Verfahren nicht aufgebaut!

## **Vorabklärungen und Empirische Erkenntnisse**

Das Konzept für das technische Vorgehen, sowie die Erfassung eventueller Risiken und nötiger Vorsichtsmassnahmen bei der Stimulation in Basel – 1 wurde in den letzten zwei Jahren ausführlich mit weltweiten Experten diskutiert und erarbeitet. Dem technischen Team von Geopower stand dabei ein Expertenrat zur Verfügung in dem ein Grossteil der internationalen Wissenschaftler vertreten sind, die über detaillierte Erfahrung in der Problematik Stimulationsverfahren und Seismizität verfügen. Das schliesslich angewandte technische Programm war von diesem Expertenrat unterstützt worden.

Weltweit führt die Erdölindustrie routinemässig Stimulationen zur Verbesserung der Durchlässigkeit von Öl- und Gasreservoirs durch, bei denen Gestein in der Tiefe durch Einpressen von Flüssigkeit aufgebrochen wird. Die Methoden der Erdölindustrie weichen zwar in technischer Hinsicht zum Teil vom Hot-Fractured-Rock-Verfahren ab, doch die in der Praxis gewonnenen Erkenntnisse sind durchaus auch für die Geopower Basel AG anwendbar. .

Die am besten untersuchten hydraulischen Injektionstests in der Nähe von Basel und unter vergleichbaren Anlagebedingungen sind bereits seit 1993 in Soultz-sous-Forêts im Elsass durchgeführt worden (ebenfalls am Rheingraben). Die sehr umfangreichen Messresultate und Erfahrungen lassen sich daher gut auf die Situation in Basel übertragen. In Soultz-sous-Forêts gab es, trotz eines Erdstosses von Magnitude 2.9, keine Seismizität mit Schäden.

Zusammenfassend gibt es weltweit kein einziges Beispiel einer durch Reservoirstimulation induzierten Seismizität, welche signifikante Schäden ausgelöst hätte – weder im Bereich der Geothermie, noch bei den Tausenden von sogenannten Fracking Stimulationen, die seit Jahrzehnten weltweit in der Erdöl- und Erdgasindustrie durchgeführt wurden, dies obwohl dabei gelegentlich ein Vielfaches des Druckes der Basler Stimulation angewendet wurde. Bezeichnenderweise kommen solche Methoden der Reservoir Stimulation auch in ausgesprochenen Erbebengebieten (Kalifornien, Indonesien) und in Siedlungsräumen zur Anwendung (z.B. in dicht besiedelten Gegenden Norddeutschlands).

### **Beobachtungsnetz**

Um das erschlossene unterirdische Reservoir zu orten, das natürliche „Knistern“ zu erfassen und eine allfällige Beeinflussung durch die lokale Wasserinjektion zu erkennen, ist ein Beobachtungsnetz mit hochempfindlichen Geophonen in mehreren Bohrlöchern (sog. Horchbohrungen) von 350 bis 2750 Meter Tiefe installiert worden. Die Beobachtungsdichte ist für solche Projekte einmalig und liefert nicht nur wertvolle neue Erkenntnisse für die Wissenschaft sondern erlaubt vor allem eine äusserst detaillierte Ueberwachung der Vorgänge.

Der Schweizerische Erdbebendienst (SED) der ETH Zürich hat unbeschränkt, permanent und in Echtzeit Zugang zu den anfallenden Messdaten. Der SED bestimmt als unabhängige Instanz die Magnitude. Alle Ereignisse werden auf einer speziell eingerichteten Webseite des SED publiziert ([www.seismo.ethz.ch/basel/](http://www.seismo.ethz.ch/basel/)).

Das bedeutet, dass (auch) die induzierte Seismizität kontinuierlich unter Kontrolle nicht nur der Geopower Basel AG, sondern auch unter jener des SED ist.

Die Horchbohrungen wurden unter anderem auch deshalb so tief gebohrt, um dem Oberflächenlärm des Strassenverkehrs von Tram, Bahn, Strassenarbeiten etc. zu entgehen. An der Oberfläche platziert, könnten die Geophone das seismische Signal weniger gut aus dem Umgebungslärm herausfiltern.

### **Massnahmendispositiv**

In Kenntnis der speziellen tektonischen Lage Basels und angesichts der historischen Beben in dieser Region wurde der Frage der künstlichen Auslösung (triggered events) grösserer Beben spezielle Beachtung geschenkt.

Obwohl das Verfahren in der Erdöl und Ersgasindustrie rountinemässig zur Anwendung kommt, kann, wie bei jeder technischen Anwendung, auch hier ein

Restrisiko nicht mit absoluter Sicherheit ausgeschlossen werden. Aus diesem Grunde haben die Projektverantwortlichen ein Überwachungs- und Kontrollkonzept erarbeitet, das von den zuständigen Instanzen genehmigt wurde (Amt für Umwelt und Energie, Kantonsgeologe, Schweizerischer Erdbebendienst).

Als Grundsatz für ein Überwachungskonzept galt, dass aus den hydraulischen Injektionen für Dritte kein Schaden entstehen darf. Weiter sollen spürbare Erschütterungen die Lebensqualität der im Einflussbereich wohnhaften Bevölkerung möglichst wenig beeinträchtigen. Mit diesem Konzept soll die induzierte Seismizität so kontrolliert werden, dass bei Überschreitung definierter Werte korrigierende Massnahmen eingeleitet werden.

Zur Überwachung der Erschütterungen wurde ein komplexes Monitoring System, bestehend aus fünf speziell dafür abgeteuften Beobachtungsbohrungen und sechs Oberflächenstationen in und um die Stadt eingerichtet. Alle Stationen melden jegliche Erschütterungen in Echtzeit an das Kontrollzentrum der Projektleitung, wie an den Schweizerischen Erdbebendienst.

Das Konzept besteht darin, bei der Überschreitung einzelner kritischer Messwerte die Stimulationsarbeiten stufenweise einzuschränken, bis zum vollständigen Unterbruch der Arbeiten.

Der Aktionsplan ist gegliedert in vier Stufen, die über die drei unabhängig erhobenen Kriterien definiert werden: Magnitude [ML], maximale Bodengeschwindigkeit [mm/s] und Wahrnehmung der Öffentlichkeit. Überschreitet nur eines dieser Kriterien einen gegebenen Grenzwert, so werden stufengerecht Massnahmen eingeleitet. Die Festlegung der Kriterien richtete sich nach internationalen Normen und nach einem exemplarischen Massnahmenplan, der von der Erdölindustrie in einem extrem erdbebengefährdeten Gebiet angewandt wurde. Für den Standort Basel wurden die Kriterien vor Beginn der Stimulation in Rücksprache mit dem SED und dem Kantonsgeologen auf freiwilliger Basis noch weiter verschärft.

In vereinfachter Form sind für folgende Kriterien folgende Massnahmen vorgesehen:

Stufe	Kriterien	Massnahmen
1	Magnituden ( $M_L$ ) < 2.3 Bodengeschwindigkeit (PGV*) < 0.5 mm/s	Normales Stimulationsprogramm
2	$M_L \geq 2.3$ PGV = 0.5 – 2.0 mm/s	Injektions- (Fließ-)rate nicht weiter erhöhen.
3	$M_L \leq 2.9$ PGV = 2.0 – 5.0 mm/s	Druck im Bohrloch bis unterhalb „Fracking pressure“ absenken.
4	$M_L > 2.9$ PGV > 5 mm/s	Druck abbauen; zum Druckabbau Wasser aus Bohrloch auslaufen lassen.

\*PGV = Peak Ground Velocity

Der Massnahmenplan wurde während der gesamten Stimulationsphase nicht nur genau eingehalten, sondern angesichts einer Neubeurteilung der Lage im Laufe des Tages vom 8. Dezember sogar übererfüllt. So wurde z.B. das Auslaufenlassen des Wassers

im Bohrloch bereits vor dem Erdstoss von 3.4 angeordnet, obwohl dies gemäss Massnahmenplan noch nicht zwingend gewesen wäre.

Parallel zu den Kriterien oben aufgeführten Kriterien für operative Massnahmen wurde auch ein Kommunikationsplan erarbeitet, wobei die Benachrichtigung der Behörden und öffentlichen Institutionen vom Schweizerischen Erdbebendienst vorgenommen wird.

18.1.2007, Geopower Basel AG, [info@geopower-basel.ch](mailto:info@geopower-basel.ch)