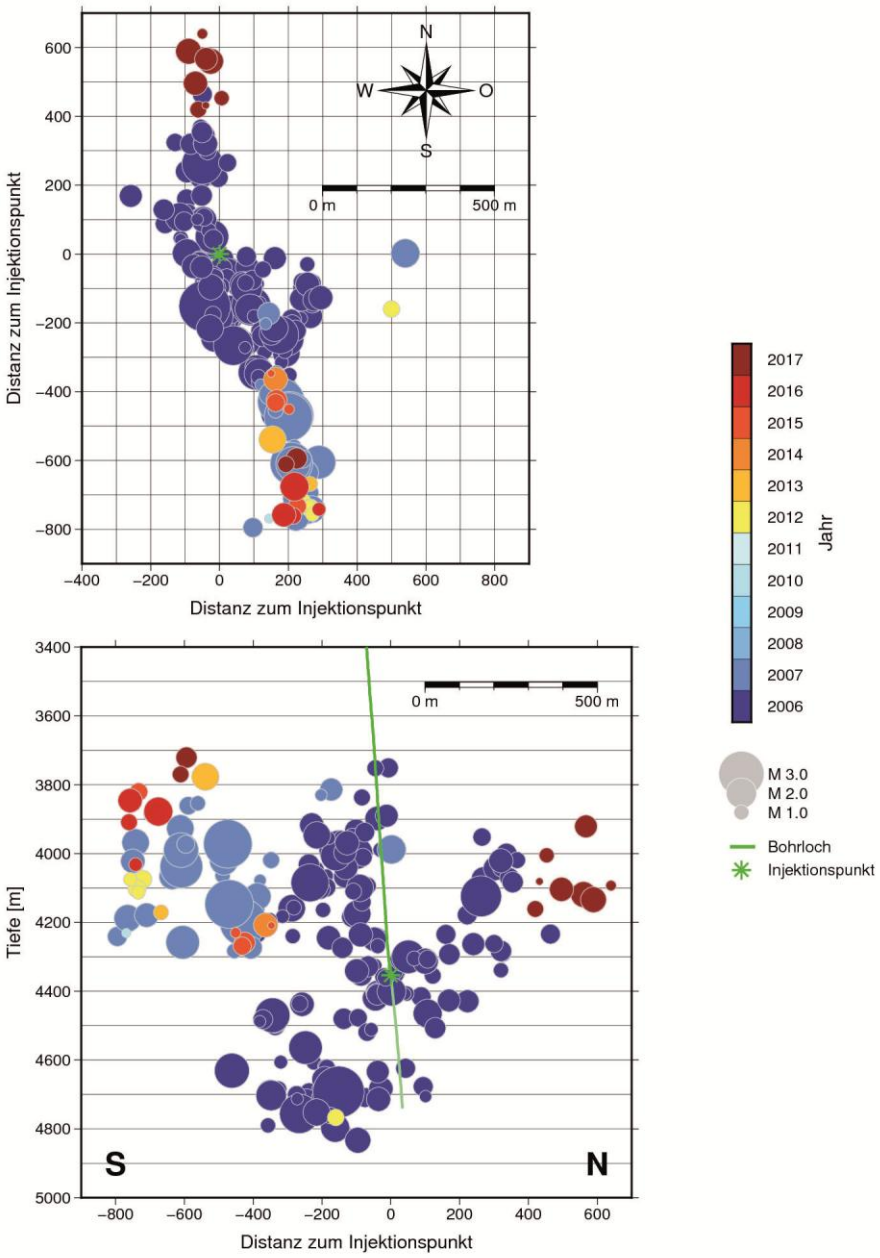
Schweizerischer Erdbebendienst
Service Sismologique Suisse
Servizio Sismico Svizzero
Swiss Seismological Service

ETH
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Induzierte Erdbeben im Nachgang des eingestellten Geothermieprojekts in Basel



Eine Analyse des Schweizerischen Erdbebendienstes (SED) an der ETH Zürich zu Händen des Kantons Basel-Stadt

März 2017

Impressum

Herausgeber
Schweizerischer Erdbebendienst (SED) an der ETH Zürich

Autoren
Stefan Wiemer, Thessa Tormann, Marcus Herrmann, Dimitrios Karvounis, Toni Kraft, Michèle Marti

Titelbilder
Seismizität in der Nähe des Bohrlochs Basel I seit 2006

Publikationsdatum
29.03.2017

1. Hintergründe zum Geothermieprojekt in Basel

1.1 Das Projekt

Das sogenannte „Deep Heat Mining"-Projekt in Basel sah den Bau einer Pilotanlage für ein geothermisches Kraftwerk nach dem EGS-Verfahren vor („Enhanced Geothermal System", auch als petrothermale Geothermie bezeichnet). Das im Jahr 2006 beendete Projekt strebte an, in einer Tiefe von 4'000 bis 5'000 Metern ein künstliches Risssystem im Gestein zu erzeugen und als geothermisches Reservoir zu nutzen. Zu diesem Zweck wurde unter hohem Druck kaltes Wasser in den Untergrund gepresst und ein Risssystem erzeugt. In diesem sollte sich das Wasser auf 160 bis 200 Grad erwärmen, bevor es wieder an die Oberfläche befördert und dort zur Wärme- oder Stromgewinnung genutzt werden kann. Mit Hilfe von zwei bis drei Bohrungen sollten ultimativ 50 bis 150 Liter heisses Wasser pro Sekunde gefördert werden. Um ein solches Reservoir mittels hydraulischer Stimulation (Einpressen von Wasser unter hohem Druck) zu erzeugen, bedarf es tausender Mikroerdbeben[1]. Diese dienen als Werkzeug, um die Wasserdurchlässigkeit von rund einem Kubikkilometer Gestein im Untergrund nachhaltig zu erhöhen und so einen „Wärmetauscher" zu erzeugen. Die Funktionsweise eines solchen petrothermalen Geothermieprojekts ist in Abbildung 1.1 schematisch dargestellt.

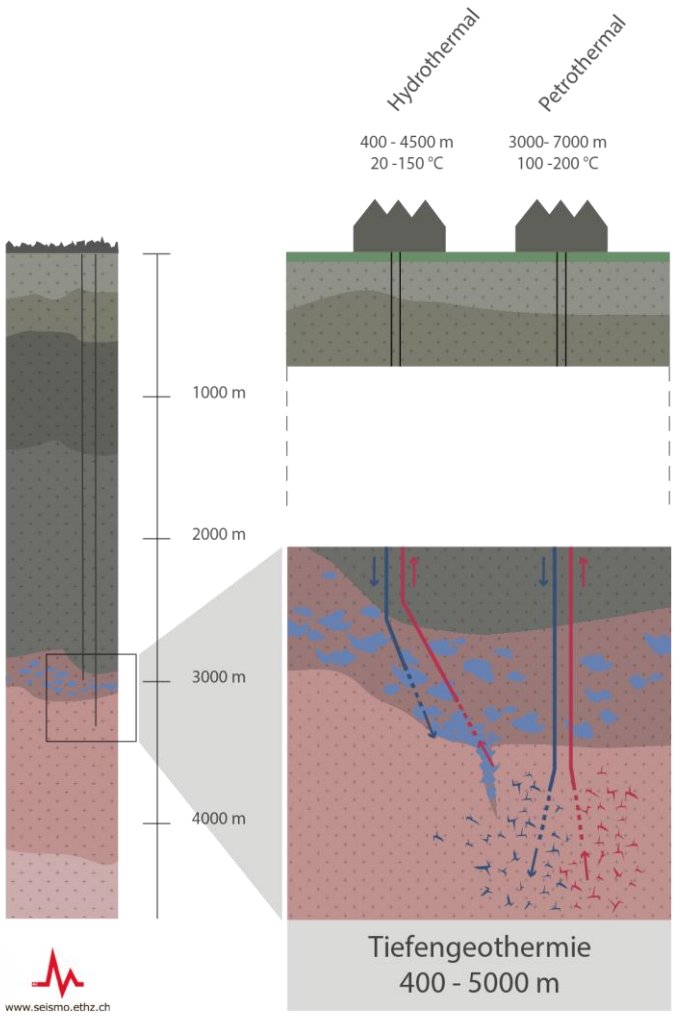


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der Funktionsweise von tiefen Geothermieprojekten.

[1] Der Begriff Mikroerdbeben ist nicht eindeutig definiert. Physikalisch sind Mikroerdbeben ganz normale Erdbeben, nur sind sie kleiner in Bezug auf Ihre Magnitude und Bruchlänge. Gelegentlich werden Beben, die nicht verspürt werden können, als Mikrobeben bezeichnet. In diesem Bericht werden in diesem Sinne Beben mit einer Magnitude kleiner als 2.0 (M_L) als Mikrobeben bezeichnet.

Mittelfristig sollte mit dem Projekt eine umweltverträgliche Energiegewinnung ermöglicht werden. Ziele waren auch die Nutzung einheimischer Energiequellen und die Reduktion des Energieimports. Es sollte eine Pilotanlage gebaut werden, die weitgehend ohne CO_2-Ausstoss und Abfallproduktion 6 Megawatt Strom und 17 Megawatt Wärme liefert. Dies entspricht dem Bedarf an elektrischer Energie von rund 10'000 Haushalten und dem Wärmebedarf von 2'700 Haushalten. Als Standort des künftigen Geothermiekraftwerks war der Werkhof der industriellen Werke Basel (IWB) in Basel-Kleinhüningen vorgesehen. Die gewonnene Wärme hätte von dort in das gut ausgebaute städtische Fernwärmenetz eingespeist werden können. In den Sommermonaten, wenn der Bedarf an Fernwärme gering ist, hätte das Kraftwerk hauptsächlich Strom produziert.

Der Prozess des Einpressens wurde von einem dichten seismischen Messnetz überwacht (Abbildung 1.2). Dazu gehörten unter anderem sechs Bohrlochseismometer in einer Tiefe von 300 bis 2'700 Metern, die wie geplant tausende von Mikroerdbeben aufgezeichnet und lokalisiert haben und somit den Fortschritt der Reservoirentstehung aufzeigen konnten. Die Injektionsrate (eingepresste Flüssigkeitsmenge pro Zeit) wurde schrittweise erhöht, bis die maximale Rate (3300 l/min) am fünften Tag der Reservoir-Stimulation erreicht wurde.[2]

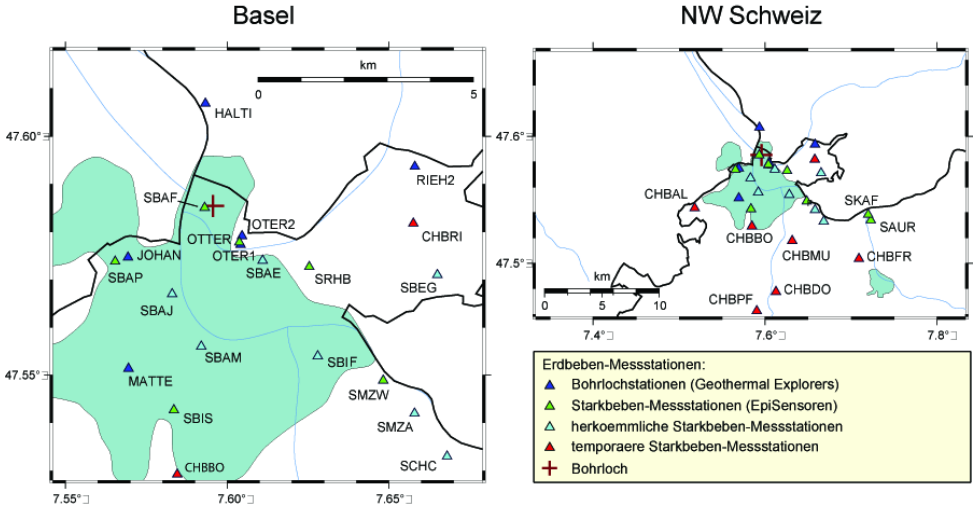


Abbildung 1.2: Überblickkarten der Region Basel. Gezeigt sind die Standorte der Seismometer, die während der Stimulationsphase installiert waren.

In den frühen Morgenstunden des 8. Dezember 2006 ereignete sich ein Beben der Magnitude 2.6 (M_L), das in Basel von der Bevölkerung verspürt wurde. Daraufhin wurde, wie im zuvor definierten seismischen Sicherheitskonzept (sogenanntes Ampelsystem) vorgesehen, die Injektionsrate gedrosselt und die Injektion einige Stunden später ganz eingestellt. Insgesamt waren bis dahin ca. 11'500 m^3 Wasser mit hohem Druck von bis zu 296 bar in den Untergrund eingepresst worden. Ungefähr fünf Stunden nach dem Einstellen der Injektion kam es zu einem Beben mit einer lokalen Magnitude von 3.4 (M_L) (bzw. Momenten-Magnitude M_w = 3.1[3]). Mit einer maximalen makroseismischen Intensität[4] von V war es weiträumig spürbar und verursachte kleinere Schäden. Die eingegangenen Schadensmeldungen betrafen vorwiegend kleinere Risse im Verputz von Gebäuden und beliefen sich auf eine Summe von ca. 6 Millionen CHF, die mehrheitlich abgegolten wurde. Drei weitere Beben mit Magnituden von 3.0 (M_L) und grösser ereigneten sich in Folge bis in den Februar 2007 hinein. Sie wurden alle von der Bevölkerung verspürt. Insgesamt wurden bis heute mehr als 200 Beben mit Magnituden von 0.9 (M_L) oder grösser vom SED aufgezeichnet und lokali-

[2] Häring, M. O., Schanz, U., Ladner, F., & Dyer, B. C. (2008). Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system. Geothermics, 37(5), 469–495.

3 Seismologen benutzen verschiedene Skalen, um die Stärke von Beben zu messen. Da diese Skalen unterschiedliche Eigenheiten haben, können die Werte für ein einzelnes Beben zum Teil voneinander abweichen.

[4] Die Auswirkungen eines Erdbebens an der Erdoberfläche wird durch die makroseismische Intensität beschrieben. Die Intensität ist abhängig vom Beobachtungsort und nimmt in der Regel mit dem Abstand vom Epizentrum ab.

siert. Die Projektleitung sistierte daraufhin das Vorhaben und der Kanton beendete das Projekt 2009 nach einer umfassenden Risikoanalyse[5] endgültig.

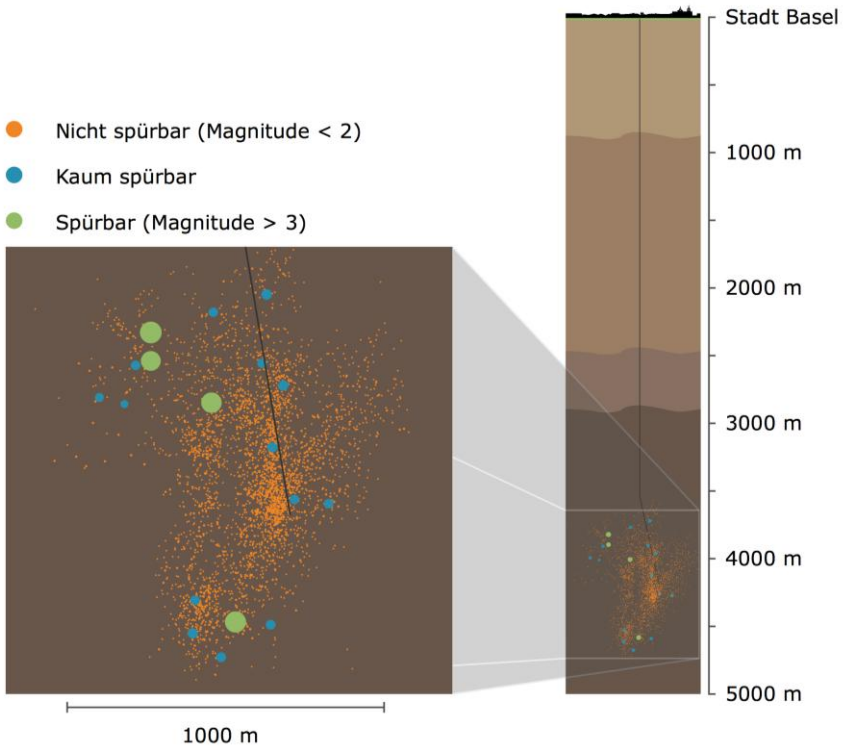


Abbildung 1.3: Beobachtete Seismizität während und nach der Reservoir-Stimulation unter der Stadt Basel. Ereignisse mit einer Magnitude von 3.0 (M_L) oder grösser sind grün markiert.

1.2 Rolle des Schweizerischen Erdbebendienstes

Der Schweizerische Erdbebendienst (SED) an der ETH Zürich ist die Fachstelle des Bundes für Erdbeben. In dessen Auftrag überwacht er die Erdbebenaktivität in der Schweiz sowie im grenznahen Ausland und beurteilt die Erdbebengefährdung in der Schweiz. Im Falle eines stärkeren Erdbebens informiert der SED Öffentlichkeit, Behörden und Medien über den Ort, die Stärke und mögliche Auswirkungen. Die Aktivitäten des SED sind in das eidgenössische Massnahmenprogramm Erdbebenvorsorge eingebunden.

Im Umfeld der Tiefengeothermie ist der SED in unterschiedlichen Rollen aktiv. Sein primäres Ziel besteht darin, involvierte Behörden und Industrien dabei zu unterstützen, über kantonale Grenzen hinweg einheitliche Qualitätsstandards in der Handhabung seismologischer Fragestellungen, bei Genehmigungsverfahren und der Projektdurchführung zu etablieren. In den letzten zehn Jahren hat der SED seine Kompetenz Betreibern und insbesondere den kantonalen Behörden auf Anfrage zur Verfügung gestellt und diese in seismologischen Aspekten der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) und bei der Überprüfung von Betriebs- und seismischen Sicherheitskonzepten für Tiefengeothermieprojekte unterstützt (z. B. Kantone Basel-Stadt, Jura, Waadt, Thurgau und Stadt St. Gallen). Der SED war und ist aufgrund seiner Tätigkeiten in alle vergangenen und laufenden Tiefengeothermieprojekte in der Schweiz involviert, die neben Wärmeversorgung auch Strombereitstellung anstreben. Sein Dienstleistungsangebot richtet sich dabei nach den Grundsätzen der Unabhängigkeit und Transparenz[6].

[5] Baisch Stefan, Carbon David, Dannwolf Uwe, Delacou Bastien, Devaux Mylène, Dunand François, Jung Reinhard, Koller Martin, Martin Christophe, S. M., & Secanell Ramon, V. R. (2009). Deep Heat Mining Basel Seismic Risk Analysis SERIANEX.

[6] http://www.seismo.ethz.ch/de/about-us/portrait/independence-and-transparency/

Aufgrund seines Aufgabengebiets und der Fachkompetenz seiner Mitarbeitenden verfügt der SED über umfassende Kenntnisse im Bereich induzierter Seismizität und ist weltweit stark in Forschungsaktivitäten zu dieser Problematik eingebunden. So ist der SED führend an folgenden europäischen und nationalen Forschungsprojekten beteiligt: SCCER-SoE, GEOBEST-CH, GeoSim, GEISER, GEOTHERM1+2, DESTRESS, RT-RAMSIS, SIAMIS-GT.

Der SED hat die Behörden des Kantons Basel-Stadt bei der Durchführung der SERIANEX-Studie zum Erdbebenrisiko des Deep Heat Mining Projekts fachlich beraten. Seit Mai 2012 hat der SED auch im Auftrag des Kantons die seismische Überwachung der direkten Umgebung des Bohrlochs in Basel von der Geopower Basel AG übernommen.

1.3 Die Schliessung des Bohrlochs im Jahr 2011 und der anschliessende Anstieg der Seismizität

Kurz nach dem Magnitude 3.4 Beben am 8. Dezember 2006 wurde ein sogenannter „bleed off" eingeleitet. Das bedeutet, dass das Bohrloch geöffnet wurde, damit das eingepresste Wasser teilweise aus dem Untergrund herausströmen konnte. Das Ziel bestand darin, den Druck im Reservoir zu reduzieren, mit der Hoffnung, die Seismizitätsrate zu senken. Wie gewünscht, nahm die Seismizitätsrate in den folgenden Wochen und Monaten stetig ab. Das Abklingen der Seismizität folgte dabei einem ähnlich Verlauf, wie er auch bei natürlichen Nachbebensequenzen beobachtet wird. Damalige Modellrechnungen gingen davon aus, dass sich die seismische Aktivität im Reservoirbereich nach frühestens 15 Jahren wieder auf das sehr niedrige natürliche Niveau eingependelt haben sollte[7]. Die Beobachtungen zeigen, dass die seismische Aktivität seit dem Öffnen der Bohrung dieser Vorhersage folgte und zwischen 2008 und 2011 unterhalb der automatischen Detektionsschwelle des SED lag (zu diesem Zeitpunkt ca. 0.9 (M_L), Abbildung 1.4).

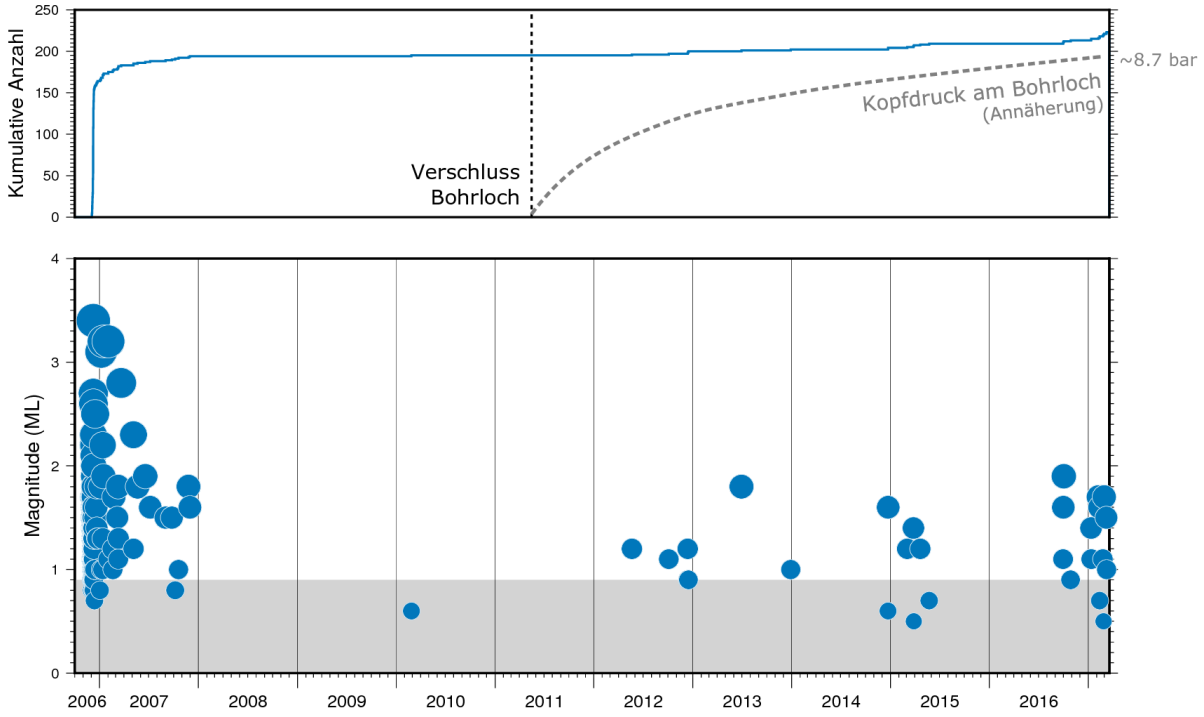


Abbildung 1.4: Zeitliche Abfolge der Erdbeben, die in unmittelbarer Umgebung des Bohrlochs Basel I aufgetreten sind. Der graue Bereich kennzeichnet die automatischen Detektionsschwelle des seismischen Netzwerks des SED, d. h. der Erdbebenkatalog ist für Magnituden über 0.9 (M_L) vollständig.

[7] Bachmann, C. E., Wiemer, S., Wössner, J., & Hainzl, S. (2011). Statistical analysis of the induced Basel 2006 earthquake sequence: introducing a probability-based monitoring approach for Enhanced Geothermal Systems. Geophysical Journal International, 186(2), 793–807. doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05068.x

Die Bohrung wurde bis in den April 2011 offengehalten. Bis dahin flossen episodisch insgesamt 4'330 m^3 Wasser aus dem Untergrund an die Oberfläche. Dieses Volumen entspricht etwa einem Drittel des eingepressten Gesamtvolumens[8]. Die Geopower Basel AG bat im Jahr 2010 den Kanton Basel-Stadt in einem "Baubegehren" um die Erlaubnis für den Rückbau des Bohrlochs und dessen Schliessung am Bohrlochkopf. Diese Anfrage wurde im Auftrag des Kantons von der Firma Q-Con[9] im Hinblick auf möglich Auswirkungen auf die Seismizität beurteilt und anschliessend auch vom SED begutachtet[10]. Beide Berichte sowie das ursprüngliche Baugesuch der Geopower Basel AG stimmten in der Erwartung überein, dass der Druck am Bohrlochkopf über die nächsten Monate auf ca. 12 bis 17 bar (1,2 bis 1,7 MPa) ansteigen wird. Alle Gutachten waren sich zudem einig, dass im Allgemeinen eine fortgesetzte Seismizität des Reservoirs auf niedrigem Niveau zu erwarten ist und dass somit die seismische Überwachung weiterhin eine sinnvolle und notwendige Massnahme darstellt.

Die Gutachten unterschieden sich leicht in der Beurteilung der Seismizität als Konsequenz des zu erwartenden Druckanstieges am Bohrlochkopf und im Reservoir. Der Bericht der Geopower Basel AG erwartete, dass kein Anstieg der Seismizität auftritt, solange der Druck am Bohrlochkopf unter 50 bar bleibt (aufgrund des sogenannten Kaiser Effekts sollten Verwerfungen nur aktiviert werden, wenn der Druck früher erreichte Werte übersteigt). Der Bericht der Q-Con stimmte damit mehr oder minder überein. Das Gutachten des SED fügte Folgendes hinzu:

"Es ist somit nicht auszuschliessen, dass der periphere Bereich, wo seit Ende der Stimulationsphase die meisten Nachbeben aufgetreten sind, mit einer erhöhten seismischen Aktivität auf den zu erwartenden Druckausgleich reagieren wird. Für diesen Bereich gibt es keinen objektiv begründbaren Schwellenwert des Porendruckes, unterhalb dessen keine induzierte Seismizität möglich ist".

Basierend auf diesen Gutachten hat der Kanton Basel-Stadt den Verschluss der Bohrung bewilligt mit der Auflage, die Seismizität weiterhin zu beobachten und bei einem Anstieg der Bebenrate das Bohrloch wieder zu öffnen. Das Bohrloch wurde am 13. April 2011 verschlossen. Im Mai 2012 ging die Verantwortung für die seismische Überwachung von der Geopower Basel AG zum SED über, geregelt durch eine Vereinbarung zwischen dem Kanton Basel-Stadt und dem SED.

Wie erwartet stieg der Druck am Bohrlochkopf allmählich und stetig wieder an (Abbildung 1.4 oben). Die Seismizität nahm daraufhin in den Jahren 2012 und 2013 leicht zu (Abbildung 1.4), sobald der Druck am Bohrlochkopf einen Wert von 4 bis 5 bar erreicht hatte. In dieser Zeit wurden sieben Ereignisse mit Magnituden zwischen 0.9 (M_L) und 1.8 (M_L) nachgewiesen[11] (Abbildung 1.4). Keines der Beben war für die Bevölkerung spürbar. Im Anschluss blieb die seismische Aktivität während beinahe eines Jahres unterhalb der SED-Detektionsschwelle. Dies änderte sich mit dem Auftreten eines Magnitude 1.6 (M_L) Ereignisses am 23. Dezember 2014. Seit Mitte 2016 ist eine erneute Zunahme der seismischen Aktivität zu beobachten. Das bislang grösste Ereignis trat am 3. Oktober 2016 mit einer Magnitude von M_L=1.9 auf. Es wurde von der Bevölkerung nicht verspürt.

[8] Aktennotiz GeoEnergie Suisse AG, Druckaufbau BS-1 und Seismizität, Florentin Ladner, dated, 9.4.2015.
[9] Beurteilung des Baubegehrens "Deep Heat Mining – Rückbau Tiefenbohrung", Q-Con Report KBA005, Dated 05.01.2011, 9 pages.
[10] Stellungnahme zum Baubegehren seitens Geopower Basel AG „Deep Heat Mining – Rückbau Tiefenbohrung". 25.1.2011, N. Deichmann, 3 pages.
[11] Diehl, T., Clinton, J., Kraft, T., Husen, S., Plenkers, K., Guilhelm, A., Behr, Y., Cauzzi, C., Kaestli, P., Haslinger, F., Faeh, D., Michel, C., and Wiemer, S., (2014), Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2013: Swiss Journal of Geosciences, v. 107, no. 2-3, p. 359-375

1.4 Fragen zum Anstieg der Seismizität

Der leichte Anstieg der Seismizität im Bereich des Reservoirs wurde im Mai 2015 und erneut im Januar 2016 in gemeinsamen Treffen von Vertretern des SED, der Geo-Energie Suisse AG, des Kantons Basel-Stadt sowie der industriellen Werke Basel (IWB) besprochen. Der Kanton bat den SED, den Anstieg der Seismizität genauer zu untersuchen und dabei auch Szenarien für die mögliche Entwicklung der Seismizität im Falle einer erneuten Öffnung des Bohrloches zu betrachten.

Dank der Unterstützung des Projekts GEOBEST-CH[12] konnte der SED diese Fragen ohne Kosten für den Kanton untersuchen. Jedoch stellten sich die Abklärungen aus mehreren Gründen als zeitaufwändiger als erwartet heraus. Einerseits musste der SED den Erdbebenkatalog der vergangenen zehn Jahre homogenisieren, um eine quantitative und belastbare Verbindung zwischen Reservoirdruck und induzierten Erdbeben zu etablierten. Andererseits mussten numerischen Modelle entwickelt und kalibriert werden, um die Druckausbreitung im Reservoir und die dadurch induzierten Erdbeben miteinander zu verknüpfen. Zwischenberichte zu diesen Abklärungen wurden dem Kanton Basel-Stadt per E-Mail übermittelt, die Forschungsresultate werden aktuell in wissenschaftlichen Publikationen aufbereitet. Nachfolgend sind die wichtigsten Erkenntnisse dieser Untersuchung zusammengefasst.

[12] www.seismo.ethz.ch/knowledge/things-to-know/geothermal-energy-earthquakes/geothermal-energy-and-the-sed/

2. Auswertung und Beurteilung

2.1 Verlauf der Seismizität

Aufbauend auf den Forschungsarbeiten der letzten Jahre hat der SED im Jahr 2016 umfangreiche Abklärungen zu den aufgetretenen Erdbeben seit dem Dezember 2006 durchgeführt. Insbesondere wurden dabei folgende Ziele erarbeitet:

- Die Homogenisierung der Daten. Dieser Schritt war insbesondere notwendig, da sich die Auswertemethodik sowie die Konfiguration des Messnetzwerkes zwischen 2006 und 2012 (Übergang Geopower Basel AG zu SED) mehrfach änderte.
- Die Erfassung kleinster Mikrobeben (Magnituden im Bereich von -2 (M_L) bis 1 (M_L)[13] mittels neuer Analysetechniken (Kreuzkorrelation von Wellenformen, „Template Matching", Doktorarbeit von M. Herrmann).
- Die Kalibration einer Magnitudenskala, die über den gesamten Magnituden-Bereich von -2 (M_L) bis 3.4 (M_L) benutzbar ist.
- Die Verbesserung der absoluten und relativen Lokalisierung der Erdbeben.

Dank dieser Analysen hat sich die Datengrundlage qualitativ und quantitativ stark verbessert, was ein verbessertes Verständnis der verschiedenen Prozesse ermöglicht. Die zeitliche Entwicklung der Bebenaktivität ab einer Magnitude von etwa 0.9 (M_L) wurde bereits in Abbildung 1.4 gezeigt. Abbildung 2.1 zeigt die mittlere monatliche Mikrobebenaktivität seit Januar 2007. Abgebildet sind nun auch kleinere Beben mit Magnituden bis hin zu etwa 0. Der Anstieg der Bebenaktivität seit Mitte 2012 und insbesondere der Anstieg seit etwa Mitte 2016 sind klar zu erkennen. Dabei gilt zu beachten, dass Beben im Gebiet des Reservoirs in der Regel „schwarmartig" auftreten. Das heisst, dass auf Perioden mit höherer Aktivität, die mehrere Tage oder Wochen dauern, immer auch ruhigere Perioden ohne merkliche Aktivität folgen können. Dieses Verhalten wird auch bei natürlichen Erdbebensequenzen oft beobachtet. Die aktuell beobachtete seismische Aktivität im Reservoir ist dabei mehr als 100-mal niedriger als während der Reservoirstimulation im Dezember 2006 und ca. 5-mal niedriger als im Frühjahr 2007.

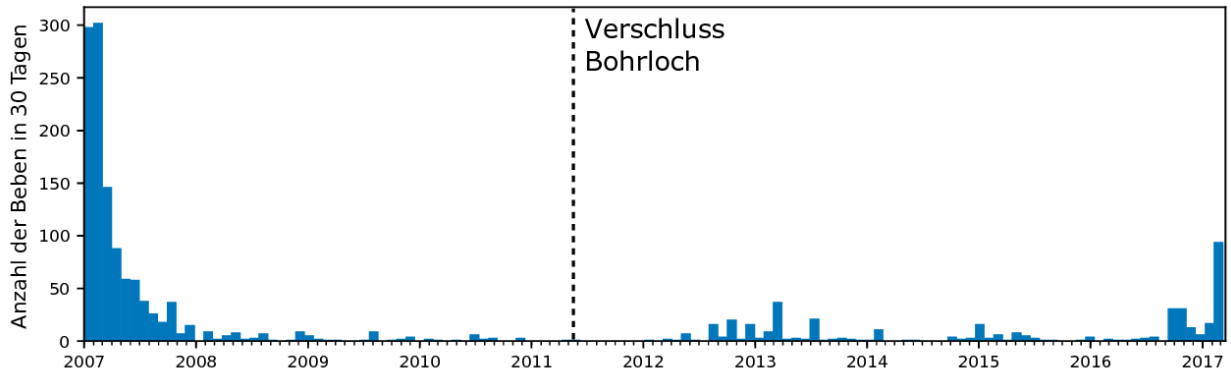


Abbildung 2.1: Zeitliche Abfolge der Mikrobeben ab Magnitude -1 (M_L), die seit Januar 2007 in der unmittelbaren Umgebung des Bohrlochs Basel I aufgetreten sind. Für Dezember 2006 beträgt die Anzahl der Beben ab Magnitude -1 (M_L) etwa 20'000 und ist der Übersichtlichkeit wegen hier nicht dargestellt.

[13] Die Magnitudenskala ist eine logarithmische Skala mit einem willkürlich definierten Nullpunkt. Daher sind auch Magnituden im Minusbereich möglich. Bei einem Beben mit einer Magnitude von 0 (M_L) bricht eine Fläche, die etwa so gross wie ein Teller ist.

Neben der Häufigkeit ist zudem die räumliche Entwicklung der Mikrobeben wichtig, die in Abbildung 2.2 sowohl in einer Kartenaufsicht als auch im Tiefenschnitt gezeigt wird (dabei sind Mikrobeben, die später auftraten, in Rottönen eingefärbt). Deutlich zu erkennen ist, dass die Beben seit dem Verschluss des Bohrloches im Jahr 2011 primär am nördlichen und südlichen Rand des Reservoirs und in der Regel in geringerer Tiefe aufgetreten sind. Das legt den Schluss nahe, dass sich die durch die hydraulische Stimulation erzeugte Druckwolke im Untergrund weiterhin ausbreitet. Dies kann speziell an den Rändern des Reservoirs, die bisher ungestört waren, zu weiteren Mikrobeben führen.

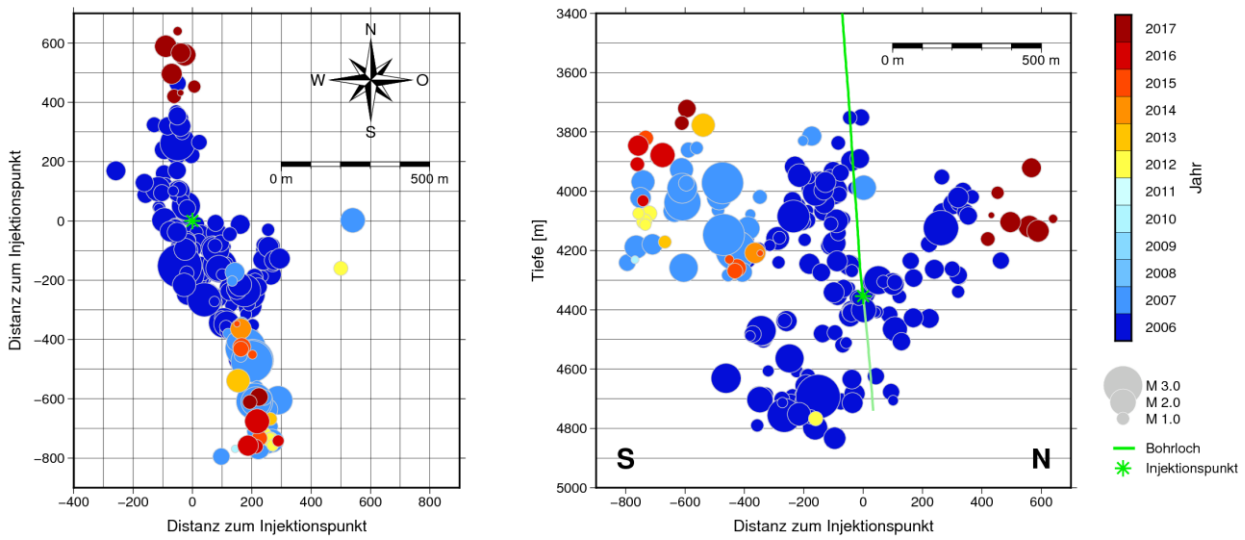


Abbildung 2.2: Zeitliche Abfolge der seismischen Aktivität. Abgebildet sind alle Erdbeben ab einer Magnitude von ungefähr 0.5 (M_L) seit Dezember 2006. Die Grafik links zeigt eine Ansicht der Beben von oben, jene rechts einen Tiefenschnitt.

Zusammenfassend lassen sich folgende Schlüsse ziehen: Der Anstieg der Seismizität ist statistisch signifikant und geht mit einer Erweiterung des Reservoirbereichs einher. Die Seismizität seit Mai 2012 konzentrierte sich anfänglich auf den südlichen Teil des Reservoirs, in dem auch die drei Beben mit Magnitude 3.0 (M_L) und grösser des Jahres 2007 stattgefunden haben. Seit Januar 2017 wächst das Reservoir jedoch vorrangig nach Norden, in Bereiche, die seit 2007 nicht mehr aktiv waren und auch über diese hinaus. Aufgrund dieser Beobachtungen lässt sich vermuten, dass die derzeitige Seismizität keine reine Nachbebenaktivität ist, wie sie auch im Zuge „natürlicher Beben" auftritt. Seit dem Verschluss des Bohrlochs ist der darin gemessene Druck kontinuierlich angestiegen. Der dabei entstandene Überdruck breitete sich innerhalb aber auch ausserhalb des bisherigen Reservoirs aus und bewirkte kleinere Erdbeben. Daraus ergibt sich die plausible Annahme, dass der erhöhte Druck nach Verschluss des Bohrloches zu einer vermehrten Erdbebenaktivität führte. Es lässt sich jedoch nicht vollständig ausschliessen, dass die Seismizität nicht auch ohne Verschluss des Bohrlochs angestiegen wäre.

2.2 Modellierung der Seismizität

Der SED hat in einem zweiten Schritt den Druckaufbau und den Verlauf der Seismizität numerisch modelliert und dabei den Fokus auf folgende Fragen gelegt:

- Ist der Anstieg und die Ausbreitung der Seismizität physikalisch und geomechanisch plausibel und mit numerischen Modellen nachzuvollziehen?
- Lassen sich Szenarien zum zukünftigen Verlauf der Bebenaktivität erstellen, die auch das Wiederöffnen des Bohrloches in Betracht ziehen?

Diese Modellierungen wurden ein- und dreidimensional durchgeführt und beruhen auf hydraulischen und geomechanischen Ansätzen, die aus der Forschung des SED zu induzierten Beben

stammen[14]. Ohne auf die Details der Modellierung einzugehen, lassen sich die Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

- Die Modellierungen zeigen, dass ein Anstieg der seismischen Aktivität als Konsequenz aus dem Verschluss des Bohrloches plausibel ist. Dies unter der Annahme, dass manche Verwerfungen im Reservoir kritisch vorgespannt sind und daher bereits auf kleinste Druckänderungen reagieren. In den letzten Jahren haben zahlreiche Forschungsresultate weltweit gezeigt, dass diese Annahme realistisch ist.
- Generell und unabhängig vom konkreten Vorgehen ist mit einer Abnahme der seismischen Aktivität und des Druckes am Bohrlochkopf mit der Zeit zu rechnen. Allerdings ist dieses Abklingen beziehungsweise dieser Ausgleichsprozess im kristallinen Grundgebirge langwierig und wird weitere zehn bis zwanzig Jahre beanspruchen.
- Gemäss den Modellannahmen würde ein erneutes Öffnen des Bohrlochs - oder gar ein aktives Abpumpen von Wasser aus dem Reservoir - die Seismizität im Vergleich zum Status quo (geschlossenes Bohrloch) im Mittel deutlich reduzieren. Allerdings ist auch diese Reduktion ein langsamer Prozess, der unter Umständen erst nach einigen Monaten bis Jahren zu einer substantiellen Reduktion in der Erdbebenrate gegenüber dem unveränderten Szenario führen würde.
- Basierend auf den Modellierungen und den Beobachtungen des Rückgangs der Seismizität zwischen 2007 und 2011 erwarten wir, dass sich die durchschnittliche Erdbebenrate mit einem Öffnen des Bohrloches um 50 bis 90 Prozent reduzieren liesse. Die stärkste Abnahme liesse sich erreichen, wenn aus dem Bohrloch stetig oder periodisch Wasser (in kleinen Mengen von 0.1 bis 1 Liter pro Sekunde) entnommen würde, um den noch herrschenden Überdruck im Reservoir schneller zu reduzieren.

2.3 Abschätzung der Wahrscheinlichkeit von spürbaren oder schadenbringenden Erdbeben

Individuelle Erdbeben lassen sich nicht vorhersagen, da die Verteilungen der Verwerfungen, der Spannungen und des Porendrucks im Untergrund weitgehend unbekannt sind. Die Abschätzung der seismischen Gefährdung von natürlichen Erdbeben basiert somit in der Regel auf zwei Grundannahmen:

- Die Vergangenheit ist der Schlüssel zur Zukunft: Aus den Beben der Vergangenheit lassen sich Vorhersagen über die Rate der Beben der Zukunft ableiten, denn die mittlere Rate der Beben ist konstant.
- Die Rate der selteneren, grösseren Beben ist verknüpft mit der Rate der kleineren, häufigeren Beben. Aus den kleineren Beben lassen sich also Vorhersagen über die Rate der grösseren ableiten.

Für induzierte Erdbeben kann zwar nicht von einer konstanten mittleren Rate ausgegangen werden, Modellierung und Erfahrungen der vergangen Jahre zeigen aber, dass sich die Rate der Beben von einem Jahr zum nächstem im Mittel nur geringfügig ändert. Mithilfe der zuvor genannten Grundannahmen lassen sich somit grobe statistische Vorhersagen über die Aktivität der nächsten zwölf Monate machen, abgeleitet aus den Beobachtungen der letzten zwölf Monate, und unter der Annahme, dass sich die Verhältnisse nicht stark ändern. Diese Abschätzung ist in Abbildung 2.3 zusammengefasst. Neben der Rate der Mikrobeben ist ihre relative Grössenverteilung wichtig (der sogenannte b-Wert). Für die nächsten zwölf Monate ergeben sich folgende Erwartungen, wenn der Druck im Reservoir nicht signifikant verändert wird:

[14] SED Mitarbeiter haben in den letzten zehn Jahren ca. 30 Publikationen zum Thema induzierte Erdbeben im allgemeine und Basel in speziellen publiziert. Mehr dazu unter: http://www.seismo.ethz.ch/de/research-and-teaching/publications/

- Es ist **wahrscheinlich**, dass ein Beben mit einer Magnitude von 2.0 (M_L) oder grösser auftritt (Wahrscheinlichkeit 55 bis 85%). Ab dieser Magnitude werden Erdbeben vereinzelt verspürt.
- Ein Beben mit einer Magnitude von 3.0 (M_L) oder grösser ist mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 10 bis 30 Prozent **möglich**. Ab dieser Magnitude sind kosmetische Schäden (z. B. kleinere Risse) an Gebäuden möglich.
- Grössere Beben sind zunehmend **unwahrscheinlich** aber nicht vollständig auszuschliessen.

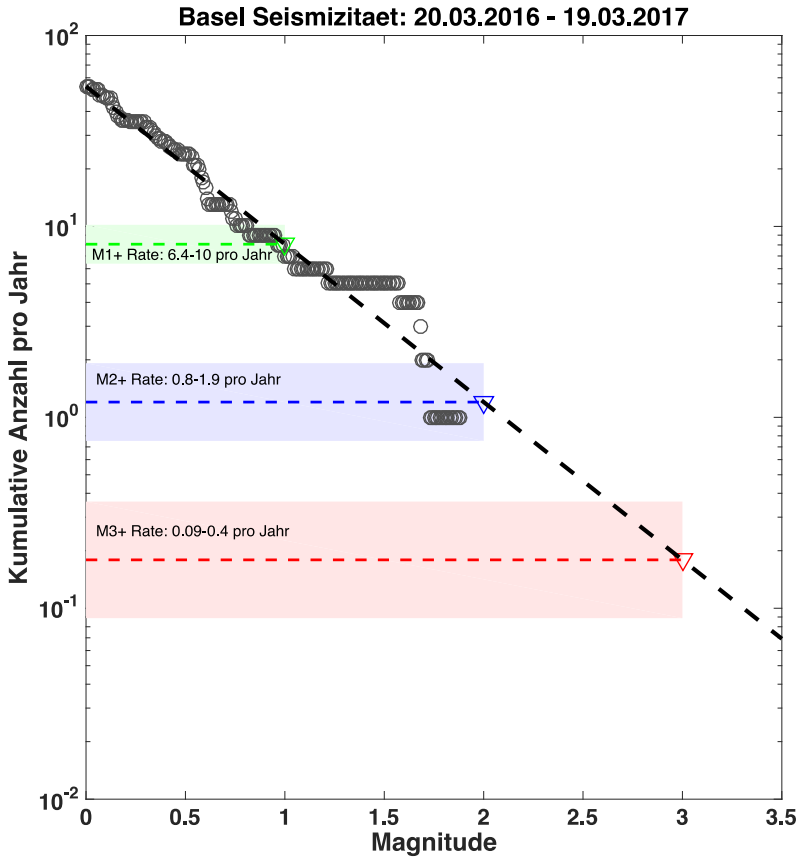


Abbildung 2.3: Beobachtete Magnitudenverteilung der Erdbeben der letzten zwölf Monate und Extrapolation zu grösseren Magnituden.

2.4 Unsicherheiten

Die Vorhersage der zukünftigen Entwicklung der Seismizität im Umfeld des Reservoirs ist natürlicherweise von vielen Unsicherheiten beeinflusst. Einerseits ist unsere Kenntnis der relevanten physikalischen, hydraulischen, chemischen und geomechanischen Prozesse im Untergrund und deren Kopplungen unvollständig. Zudem ist die Lage und der Spannungszustand von Verwerfungen sowie die Permeabilitäts- und Druckverteilung im Untergrund grösstenteils unbekannt. Auch gibt es relativ wenig qualitativ hochwertige empirische Datensätze zum Verschluss von tiefen Bohrlöchern im kristallinen Grundgestein. Deshalb sind die Interpretationen und Vorhersagen in diesem Bericht mit substantiellen Unsicherheiten behaftet und Überraschungen beziehungsweise alternative Szenarien möglich:

1. Es ist nicht auszuschliessen, dass die Seismizität auch nach dem Öffnen des Bohrlochs für eine Weile weiter ansteigen wird. Zum Beispiel könnte die Druckwolke eine bislang noch nicht aktivierte aber kritisch vorgespannte Verwerfungszone erreichen und dort viele Beben induzieren.
2. Genauso ist es möglich, dass die Seismizität rascher als erwartet abklingt, wenn sich die Druckreduktion schnell im Reservoir ausbreiten kann und die Verwerfungen rasch unterhalb ihres kritischen Wertes entspannt werden.

Allerdings gibt es trotz der vielen Unsicherheiten auch eine gewisse Robustheit:

- Die Erde ist im Allgemeinen um Ausgleich bemüht, somit werden sich die Spannungsverteilungen und Überdrucke mittelfristig wieder dem natürlichen Zustand annähern, wie es auch bei natürlichen Erdbebensequenzen passiert. Das Öffnen des Bohrlochs sollte diesen Ausgleich eher beschleunigen.
- Die Seismizität ist bei offenem Bohrloch in den Jahren 2007 bis 2011 rasch abgeklungen, allerdings vorwiegend im zentralen Bereich in der Nähe des Injektionspunktes. Das ist eine wichtige Beobachtung und Grundlage, um vorherzusagen, was heute passieren könnte.
- Die relevanten physikalischen Prozesse der ersten Ordnung sind weltweit akzeptiert, wissenschaftlich unbestritten und immer wieder getestet worden. Sie besagen, dass eine Reduktion des Porendrucks auf einer Verwerfung zu einer Stabilisierung der Verwerfung führt. In der Schweiz ist das ebenfalls eingestellte Geothermieprojekt in St. Gallen ein treffendes Beispiel: Kleine Druckänderungen auf einer kritisch vorgespannten Verwerfung führten zu zahlreichen Mikrobeben, aber nachdem bei einem Produktionstest Wasser aus dem Untergrund abgepumpt und der Porendruck reduziert wurde, ist die Bebenrate sehr rasch gegen 0 tendiert.

Trotz der bestehenden Unsicherheiten in der Interpretation des beobachteten Druckanstieges in Basel I und des beschränkten Prozessverständnisses der induzierten Seismizität sind folgende Aspekte der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik:

1. Eine Druckreduktion am Bohrlochkopf ist die einzige zur Verfügung stehende Massnahme, um die Seismizität zu reduzieren.
2. Es bestehen gute Chancen, dass die Druckreduktion eine substantielle Reduktion der Bebenrate hervorruft.
3. Negative Auswirkungen, das heisst, einen durch die Druckreduktion ausgelösten Anstieg der Seismizität, sind eher unwahrscheinlich.

2.5 Empfehlungen des SED an den Kanton Basel-Stadt

A. Um die Seismizität mittelfristig zu reduzieren, sollte der Druck im Reservoir durch kontrolliertes Öffnen des Bohrlochs reduziert werden. Dabei sind ruckartige Druckschwankungen zu vermeiden, insbesondere auch ein starker „Gas Lift" (schnelles Ausströmen von Gasen) sollte, wenn möglich, vermieden werden. Druckabbau, Abflussraten, aber auch Druckwiederaufbau sollten überwacht werden. Diese Arbeiten sollten von Experten mit Erfahrung mit tiefen Bohrlöchern geleitet und begleitet werden.

B. Vor einer Öffnung des Bohrloches sollte dessen Integrität (Korrosion, Zementierung etc.) auf seiner gesamten Länge überprüft werden. Derartige Überprüfungen sind bei nicht permanent verschlossenen tiefen Bohrlöchern Standard. Sie sind insbesondere wichtig, da es in den letzten Wochen zu bislang nicht erklärten Schwankungen im Druck gekommen ist. Auch wäre es wichtig zu wissen, ob es im obersten Bereich des Bohrlochs eine Gaskappe gibt, wie deren Gaszusammensetzung ist und welche Gase beziehungsweise Mineralien in der Bohrlochspülung gelöst sind.

C. Ob durch aktives Abpumpen der Druck und die Bebenrate im Reservoir weiter reduziert werden können, sollte zu einem späteren Zeitpunkt und unter Einbeziehung der bis dahin gewonnenen Erkenntnisse abgeklärt werden.

D. Weitere Abklärungen und Forschung zum besseren Verständnis der Prozesse im Reservoir in Basel sind sinnvoll, um ein besseres quantitatives Verständnis des Reservoirs zu entwickeln. Das ist insbesondere im Hinblick auf einen langfristigen Verschluss des Bohrlochs wichtig.

E. Die seismische Überwachung des Reservoirs muss auch in der Zukunft gewährleistet sein, damit Änderungen in den Aktivitätsraten beziehungsweise eine Migration der Mikrobeben frühzei-

tig und mit hoher statistischer Signifikanz beobachtet werden können. Dank des aktuell guten Überwachungsnetzes konnte der SED frühzeitig den Kanton Basel-Stadt und die IWB als Besitzer des Bohrloches alarmieren, auf den Anstieg in der Aktivität hinweisen und den kausalen Zusammenhang zum Bohrlochverschluss untersuchen. Um den aktuellen Stand der Lokalisierbarkeit der Mikrobeben zu erhalten, ist ein Weiterbetrieb der Bohrlochstationen OTER2 und MATTE unverzichtbar. Ein Konzept, um Ausfälle dieser Stationen zu kompensieren, muss erstellt werden.

F. Die Überwachung des Druckes am Bohrlochkopf sollte sichergestellt und automatisiert werden. Druckmessungen sind ein wichtiges Element zum Verständnis der Prozesse im Reservoir.