

Deep-Heat-Mining-Projekt Basel-Kleinhüningen - Erschliessung eines geothermischen Reservoirs

Ein Gespräch mit Markus O. Häring¹ und Stefan M. Schmid²

Einleitung

Am 8. Dezember 2006 erschütterte ein Beben der Magnitude 3.4 den Raum Basel-Stadt. Das deutlich wahrnehmbare Beben bildete den Höhepunkt zahlreicher Mikrobeben, welche die Stimulationsphase des Deep-Heat-Mining-(HDR Hot-Dry-Rock oder HFR Hot-Fractured-Rock)-Projektes in Basel-Kleinhüningen begleiteten. Weitere Beben ereigneten sich am 6. Januar mit der Magnitude 3.1 sowie am 16. Januar und am 2. Februar mit der Magnitude 3.2, was die herrschende Verunsicherung in der Öffentlichkeit über die hervorgerufenen Beben akzentuierte. Die Akzeptanz des in energiepolitischer Hinsicht Zukunft weisenden Projektes schien gefährdet.

Die nachfolgenden Erläuterungen befassen sich mit wissenschaftlich-technischen Aspekten des Projektes in Basel-Kleinhüningen (Wissensstand Juni 2007). Sie sind das Konzentrat eines Gesprächs mit Markus Häring als Direktbeteiligtem auf Seite der Projektandin sowie mit Stefan Schmid auf Seite der vom Kanton Basel-Stadt herangezogenen Experten. Hingegen werden andere wichtige Fragen, wie beispielsweise jene des Informationsmanagements, nachfolgend nicht erörtert.

Voraussetzungen für Deep-Heat-Mining

Nach der ungefähr 150 km nördlich von Basel gelegenen Geothermiebohrung im elsässischen Soultz-sous-Forêts sowie weiteren Geothermieprojekten und -anlagen im Umfeld des Oberrheingrabens ist mit dem Projekt Kleinhüningen eine Anlage zur wirtschaftlichen Nutzung eines geothermischen Reservoirs vorgesehen. Offenbar herrschen in diesem Gebiet günstige Voraussetzungen dazu.

Temperaturwerte aus Bohrungen lassen im Oberrheingraben einen für Mitteleuropa überdurchschnittlich hohen geothermischen Gradienten erkennen (Rybach 2007). Die Vorstellung eines regional einheitlichen Gradienten ist allerdings eine Fiktion. Er wechselt lateral wie auch vertikal. Eine wichtige Voraussetzung für den erhöhten Wärmefluss im Oberrheingraben dürfte sicher die tektonisch ausgedünnte europäische Kruste (Moho [Mohorovičić-Diskontinuität] in 24-26 km Tiefe) sein. Die Aufwölbung der Moho steht möglicherweise im Zusammenhang mit dem Kaiserstuhl-Vulkanismus vor 13-18 Mio. Jahren. Die Kruste ist zudem bei der Bildung des Oberrheingrabens stark zerschert worden, was zu verstärkter Wärmekonvektion führte. Der Wärmetransport dürfte begünstigt sein durch hydrothermale Zirkulation in den Bereichen tief reichender, steil stehender Strukturen im Bereich des Rheingrabens. Dies, obschon die Streckung des Grabenbruchs in Querrichtung mit etwa 5% als relativ gering zu bezeichnen ist (Ustaszewski 2004, Hinsken et al. 2007).

¹ Geothermal Explorers Ltd., Schlossstrasse 3, CH-4133 Pratteln

² Geologisch-Paläontologisches Institut, Universität Basel, Bernoullistrasse 32, CH-4056 Basel

Das Gespräch führte Daniel Bollinger, Redaktor Bulletin für angewandte Geologie.

Bei näherer Betrachtung ist der Temperaturverlauf im Bohrloch unstetig, wie dies beispielsweise die Resultate der 2.755 km tiefen Bohrung Otterbach 2 bei Basel deutlich zeigen. Tendenziell isolieren Sedimente stärker als kristalline Gesteine. Unter den Sedimenten isolieren wenig permeable Einheiten (Opalinuston, Keuper, Rotliegendes: Gradient bei ca. 4.5°C/100 m) stärker als Kalke (oberer und mittlerer Jura, Muschelkalk: Gradient zwischen 2.5-3.3°C/100 m), in denen längs verkarsteter Trennflächen eine verstärkte Abkühlung durch infiltrierende Oberflächenwässer stattfindet. Noch ausgeprägter zeigt sich dieser Temperaturverlauf in der Bohrung GPK2 in Soultz-sous-Forêts (Fig. 4 in Rybach 2007).

Generell werden die Temperaturen mit zunehmender Tiefe ausgeglichener. Sie gleichen sich dem geothermischen Gradienten von etwa 30° C pro Kilometer Tiefe an. Das bestätigen auch die Erfahrungen aus der KTB (Kontinentale Tiefbohrung) in der Oberpfalz (Bayern), welche an einer Stelle mit einem mutmasslich geringen geothermischen Gradienten abgeteuft wurde.

Diese Befunde scheinen auch durch die Bohrung Basel 1 in Kleinhüningen bestätigt zu werden, wo über die 2.5 km mächtige Sedimentbedeckung im Mittel ein Gradient von rund 4.6°C/100 m zu verzeichnen ist, das darunter liegende Kristallin aber einen solchen in der Grössenordnung von durchschnittlich 2.7°C/100 m. Allerdings kann der exakte Tem-

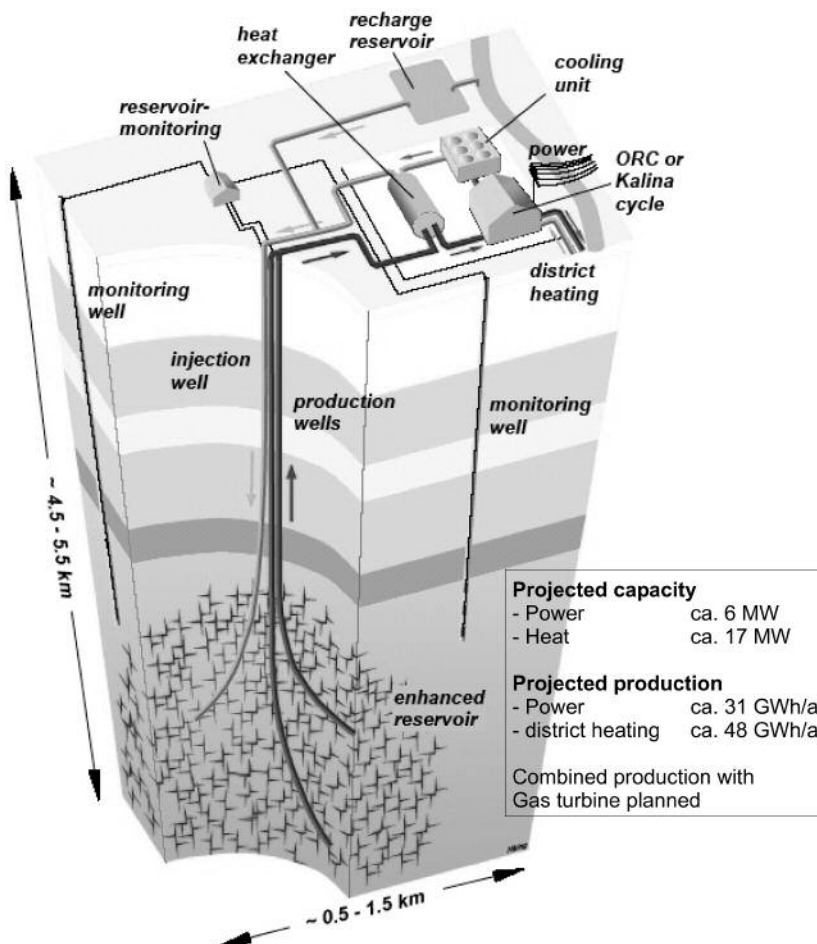


Fig. 1: Prinzipskizze für die Wärme- und Stromgewinnung im Deep-Heat-Mining-Projekt in Basel-Kleinhüningen (Quelle: Geothermal Explorers Ltd.).

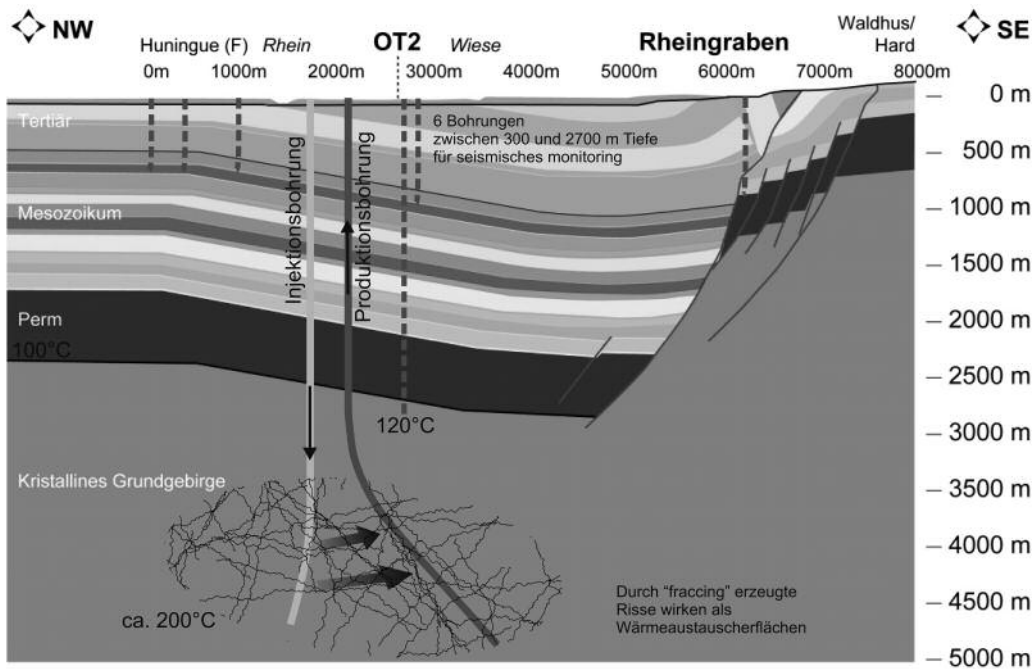


Fig. 2: Explorationskonzept am Standort Basel-Kleinhüningen (schematisch, Quelle: Geothermal Explorers Ltd.).

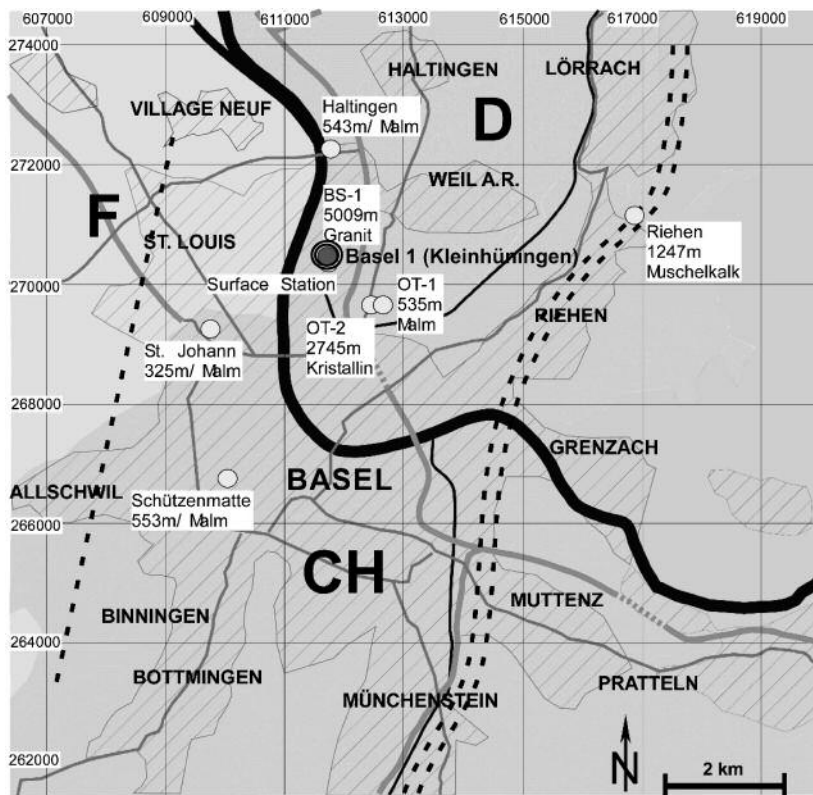


Fig. 3: Situation des Deep-Heat-Mining-Projektes und der Bohrungen für die seismische Überwachung (Quelle: Geothermal Explorers Ltd.).

peraturverlauf in der Bohrung Basel 1 noch nicht abschliessend beurteilt werden, da das Bohrloch während der Bohrarbeiten durch die Kühlung und während der Stimulationsphase durch das Einpressen von kaltem Wasser abgekühlt wurde. Zu einem späteren Zeitpunkt ist das Fahren eines neuen Temperatur-Logs vorgesehen. Hinsichtlich der effektiven Formationstemperatur bedeutungsvoll sind indes lokal an Trennflächen registrierte Wärmespitzen, welche auf hydrothermale Zirkulation zurückgeführt werden. So wurden bei einer grösseren Kluft in 4.7 km Tiefe 174° C registriert, im oberen Teil des Kristallins in 2.828 km Tiefe eine solche von 137° C. Aus der Extrapolation dieser Spitzenwerte kann für die Endteufe der Bohrung Kleinhünigen eine Formationstemperatur von rund 200° C prognostiziert werden.

Eine Temperatur von 200° C entspricht dem Minimum für eine mit heutiger Technologie einigermaßen wirtschaftliche Energiekonversion (erzielt ungefähr einen Wirkungsgrad von 18%). Grundsätzlich müsste für geothermische Energiegewinnung nach heutiger Erkenntnis die 200°C-Isotherme erreicht werden. Das ist nicht nur in der Region Basel möglich, sondern auch andernorts in der Schweiz, dürfte dort aber vermutlich grössere Bohrlängen bedingen. Deep Heat Mining ist somit grundsätzlich auch in anderen Regionen der Schweiz denkbar. Dies ist insofern bedeutungsvoll, weil bei der Standortevaluation nicht die Geologie an erster Stelle der Kriterien steht. Für das Projekt Kleinhünigen ausschlaggebend war nämlich in erster Linie der politische Wille des Kantons Basel Stadt, in erneuerbare Energien zu investieren. An zweiter Stelle folgte das Vorhandensein geeigneter Infrastrukturen (Fernwärmenutzung) sowie die Nähe zu einem grösseren Gewässer zwecks Kühlung und zum Bezug von Brauchwasser. Eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit kann erreicht werden, wenn das Projekt sowohl für die Nutzung von Wärme als auch für die Nutzung von Strom konzipiert wird.

Geologisches Modell

Für Deep Heat Mining sind im mitteleuropäischen Raum verhältnismässig grosse Bohrtiefen erforderlich. Sind die geologischen Verhältnisse in der Region Basel in den erforderlichen Tiefenbereichen ausreichend bekannt, um ein Vorhaben zu starten, das nebst dem kommerziellen Risiko auch ein Erdbebenrisiko beinhaltet?

Eine wichtige Grundlage zum Untergroundaufbau der Region Basel bildet die Arbeit von Gürler et al. 1987. Ergänzt um 7 Bohrungen im Bereich bis etwa 1.5 km Tiefe, die Befunde der Bohrung Otterbach 2 mit 2.755 km Tiefe sowie geophysikalischen Daten ist diese in ein 3D-Modell integriert worden. Während die Geologie in der Region Basel im oberflächennahen Bereich als verhältnismässig gut bekannt bezeichnet werden kann, so sind die Kenntnisse über die grösseren, für das laufende Geothermieprojekt massgebenden Tiefenbereiche unzureichend. Insbesondere gilt dies für die vorhandenen Bruchstrukturen, deren Geometrie, deren Raumlage und deren Ausdehnung. So ist beispielsweise nicht bekannt, in welchem Ausmass die Verwerfungen des Rheintalgrabens listrisch verlaufen. Im Raum Basel allgemein bekannt sind die drei massgebenden Störungs- bzw. Verwerfungssysteme, nämlich die «rheinischen» (NNE-SSW verlaufend), «hercynischen» (NW-SE verlaufend) und die «permo-karbonen» (WSW-ENE).

Für die Detektion solcher potenziell seismogener Strukturen wäre hoch auflösende Seismik und die systematische kartografische Erfassung vorhandener Störungen erforderlich. Innerhalb des ökonomisch Machbaren war dies im Vorfeld und im Rahmen des laufenden Projektes indes nicht möglich. Aufgrund der jüngsten Erfahrungen ist zu folgern, dass die Erarbeitung eines auch für grössere Tiefenbereiche aussagekräftigen 3D-Modells notwendig ist, um das Risiko der Aktivierung präexistenter Störungen besser beurteilen zu können.

Die Bohrung Basel 1 liefert zweifellos weitere

wertvolle Daten zur Geologie der Region Basel, einschliesslich der Resultate aus dem relativ dichten Netz von Messgeräten zur Überwachung der Reservoirstimulation.

Reservoirstimulation

Für die Erdwärmenutzung aus grosser Tiefe ist einerseits ein geothermisches Potenzial erforderlich, andererseits muss im Reservoirgestein eine Permeabilität erzeugt werden können, die sowohl ausreichend als auch anhaltend ist. Im Fall des Projektes Basel-Kleinhüningen war beabsichtigt, die notwendige Permeabilität mittels des Hydrofrac-Verfahrens zu entwickeln, in dessen Verlauf dann auch die spürbaren Beben auftraten. Inwieweit sind die Auswirkungen dieses Verfahrens prognostizier- und kontrollierbar, insbesondere in einer Region bekannter erhöhter Seismizität? Gibt es Alternativen zum Hydrofrac-Verfahren?

Das Deep-Heat-Mining-Projekt Basel-Kleinhüningen sieht vor, künstlich generierte «Frac» als Wärmetauscherflächen zu verwenden, im Gegensatz beispielsweise zu herkömmlichen Erdsondenbohrungen, wo allein die Erdwärme im Bohrloch genutzt wird. So war es vorgesehen, zwischen 4.7 km (Rohrschuh) und 5 km Tiefe rund 50'000 m³ Wasser unter variablen Drücken ins weitgehend ungestörte Gebirge zu verpressen.

Bereits im Vorfeld der Injektionsphase wurden in der Bohrung verschiedene Logs gefahren, unter anderem Spectral Gamma Ray-, Monopol-Dipol Acoustic-, Density-, Caliper-Logs. Für die Erfassung von allfälligen Störzonen wichtig war der Einsatz des UBI (Ultrasonic Borehole Imager), durch welchen die Strukturen der Bohrlochwandung erfasst wurden. Die Befunde des UBI zeigen im Kristallin mit der Tiefe eine abnehmende Anzahl von Trennflächen. In der Tie-

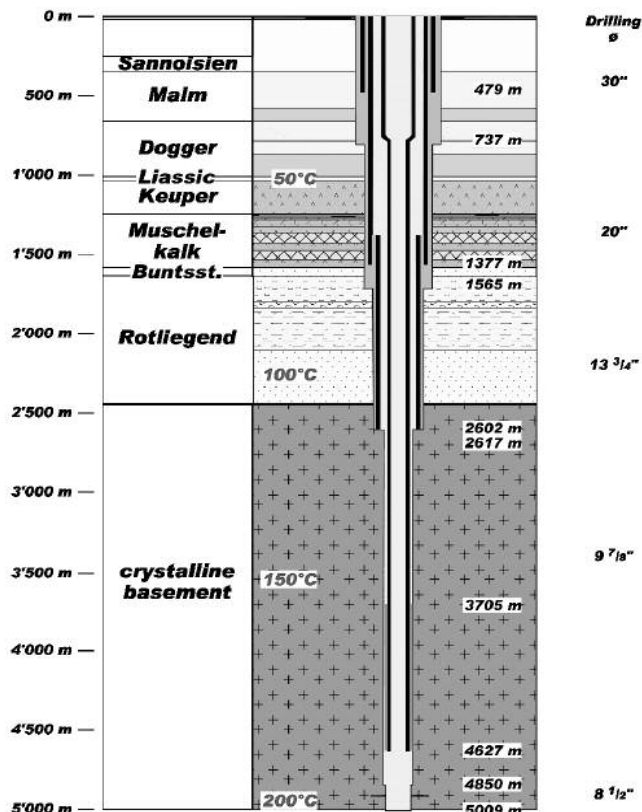


Fig. 4: Kenndaten der Bohrung Basel 1 in Kleinhüningen (Quelle: Geothermal Explorers Ltd.).

fe der offenen Bohrlochstrecke ab 4'627 m variiert die Anzahl der Trennflächen zwischen 0.2-0.8 m⁻¹.

Der Ablauf der Stimulation und die dabei registrierten seismischen Ereignisse gehen aus Fig. 5 hervor. Die schrittweise Erhöhung der Fließrate wurde dem Druckverlauf angepasst. Aus dem Druckverhalten konnte die Art der Frakturierung abgeleitet werden. In der Nacht vom 7./8.12.2006 trat ein Beben der Magnitude 2.7 auf, woraufhin die Fließrate von über 3'100 l/min auf 1'800 l/min reduziert wurde. Aufgrund der anhaltenden Seismizität wurde um 10 Uhr des 8.12.2006 von der Projektleitung beschlossen, die Wasserinjektion zu stoppen. Da die seismische Aktivität jedoch auf erhöhtem Niveau andauerte, kam man am Nachmittag zum Schluss, das Bohrloch zu öffnen und auslaufen zu lassen. Kurz danach trat das Beben der Magnitude 3.4 auf. Bis zum Stimulations-Stopp wurden rund 12'000 m³ Wasser injiziert.

Die meisten registrierten Beben waren schwächer als Magnitude 2. Sie können als

Signale direkter, durch das Einpressen von Wasser verursachter Rissbildung interpretiert werden (induzierte Beben). Demgegenüber können Beben mit $M > 2$ als Entspannungsreaktionen auf präexistenten, unter Spannung stehenden Flächen verstanden werden («getriggerte» Beben). Absolut kann man diese Trennung indes nicht vollziehen, denn jedes seismische Ereignis signalisiert den Abbau bereits bestehender Spannungen. Die seismische Aktivität setzte sich auch nach Abbruch der Stimulation fort.

Die raumzeitlichen Auswertungen der seismischen Ereignisse lässt ein subvertikales Wachstum des Reservoirs in NW-SE-Richtung erkennen. Das mikroseismisch aktivierte Gebiet konzentriert sich auf ein steil stehendes Ellipsoid von ungefähr 200 m Breite, 700 m Länge und 700 m Höhe (Fig. 6). Die Raumlage entspricht einer Orientierung entlang der maximalen horizontalen Hauptspannung. Daneben zeichnet sich auch Seismizität längs einer ENE-WSW verlaufenden, vermutlich konjugierten Struktur ab.

Auch in Soultz-sous-Forêts führte die Reser-

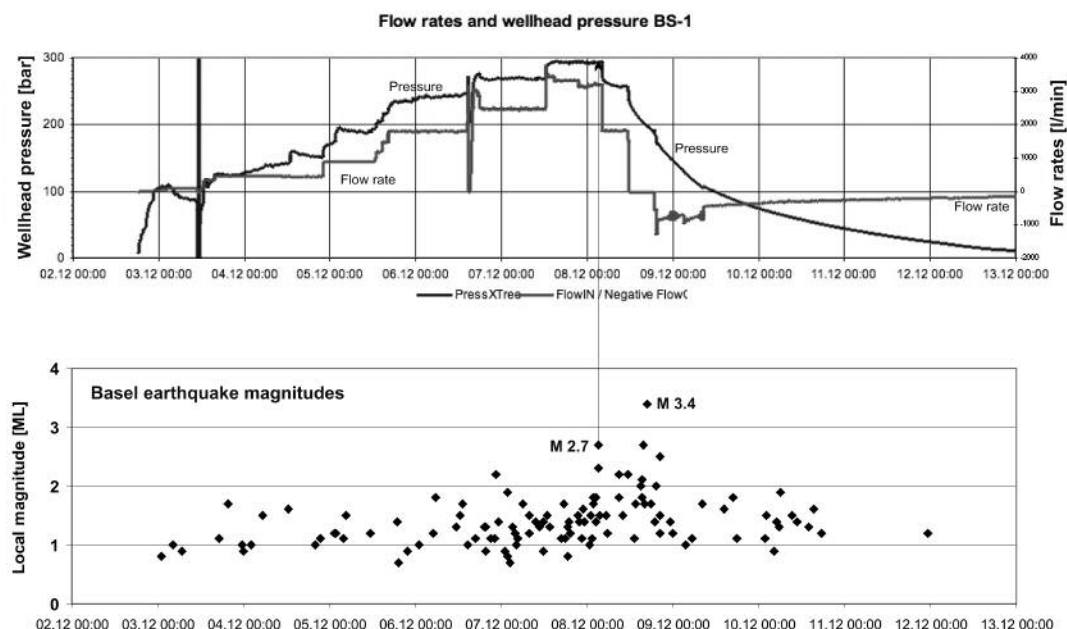


Fig. 5: Ablauf der Reservoirstimulation und dabei registrierte seismische Ereignisse (Quelle: Geothermal Explorers Ltd.).

voirstimulation zur Aktivierung einer NW-SE streichenden Struktur, verbunden mit schwachen Beben (max. Magnitude 2.9). Als Modellvorstellung wurde angenommen, dass eine alte, 5-20 m breite Bruchzone unter dem rezenten Spannungsfeld durch dextrale Scherung reaktiviert wurde. Gleichzeitig mit dieser Scherung öffneten sich Dehnungsklüfte parallel zur maximalen horizontalen Druckspannung, welche die Permeabilität gewährleisten (Evans et al. 2005). Tatsächlich wurden in der gekernten Bohrung von Soultz-sous-Forêts solche Bruchzonen auch anhand von Kataklastiten identifiziert.

In den UBI-Resultaten der Bohrung Basel 1 zeigte sich das Kristallin im Bereich des offenen Bohrlochs (4.7-5.0 km Tiefe) als hoch kompetenter, schwach geklüfteter Granit. Die

seismischen Daten können dahingehend ausgelegt werden, dass mit der Stimulation primär intakter Granit zerschert wurde. Die raumzeitliche Ausdehnung der seismischen Signale bedarf indes noch weiterer detaillierter Analysen, bevor konkrete Aussagen zu den Mechanismen der Beben und zur Frage einer allfälligen Aktivierung einer präexistenten Bruchfläche gemacht werden können. Die Herdlösemechanismen einzeln betrachtet zeigen ein komplexes Rissbildungsmuster, zusammengesetzt aus allen möglichen Verwerfungstypen (Abschiebungen, Aufschiebungen, Blattverschiebungen und schräge Aufschiebungen). Auch diesbezüglich steht eine detaillierte Auswertung der umfangreichen Datensätze noch aus.

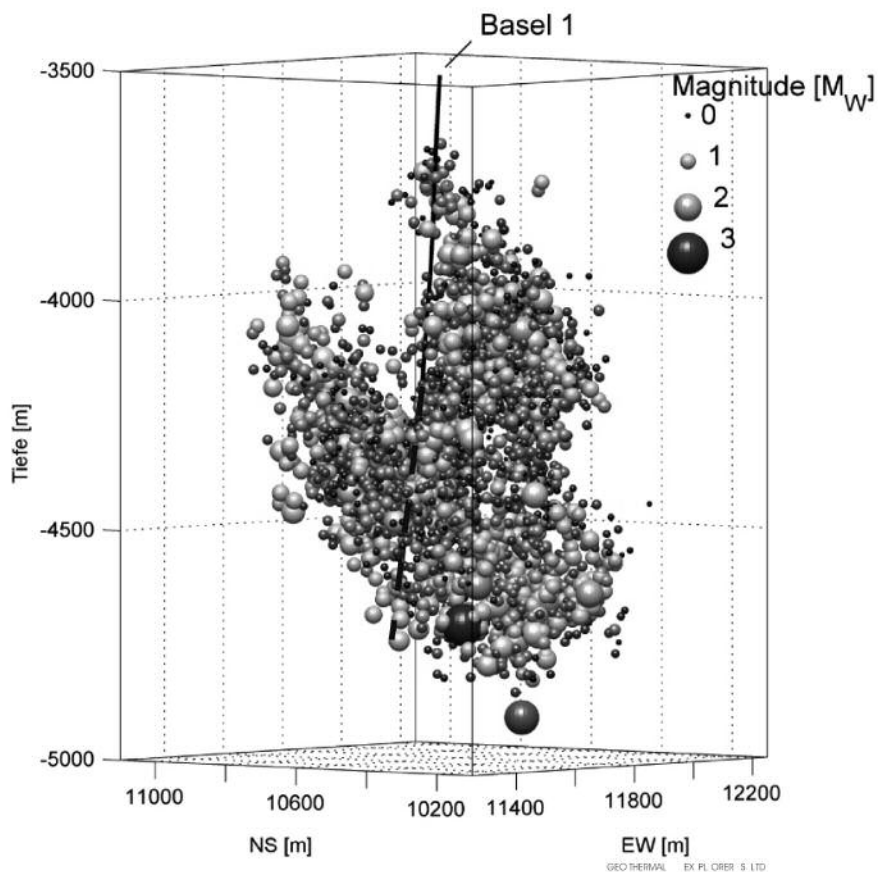


Fig. 6: Räumliche Verteilung der mikroseismischen Ereignisse aus der Hauptsimulation. Die Grösse der Symbole entspricht den Momentmagnituden. Im Zentrum liegt die Bohrung Basel 1 (Quelle: Geothermal Explorers Ltd.).

Nach Abbruch des hydraulischen «fracking» musste bilanziert werden, dass die erforderliche Reservoirgrösse im Umfeld des Bohrlochs von etwa 300-400 m Radius noch nicht erreicht ist. Durch das Einpressen von 12'000 m³ Wasser konnte das Reservoir noch nicht ausreichend stimuliert werden. In Soultz-sous-Forêts, wo in eine bestehende Bruchzone injiziert wurde, reichten 90 bar aus, um Klüfte zu öffnen. In Kleinhüningen waren zur Generierung von Fracs etwa 150 bar erforderlich. Ohne genaue Kenntnisse der Strukturen im Umfeld der Injektionsbohrung ist der Ablauf einer Stimulation in Raum und Zeit nur sehr schwierig zu bestimmen. Aus der Wellenfeldmigration der mikroseismischen Signale konnten in Basel-Kleinhüningen Strukturen in der Nachbarschaft des stimulierten Bereichs erkannt werden. Ob das Bruchstrukturen sind und wie sich diese seismisch verhalten würden, werden erst die Resultate der angelaufenen Untersuchungen zeigen.

«Fracking» ist die wirksamste Methode zur Generierung der erforderlichen Wärmetauscherflächen im Gebirge. Andere Verfahren, wie zum Beispiel der Einsatz von Säuren, sind keine wirklichen Alternativen, sondern ergänzende Methoden zur Verbesserung der Wirksamkeit. In der Geothermiebohrung Soultz-sous-Forêts wurde beispielsweise Salzsäure eingesetzt, um die Durchlässigkeit bestehender Klüfte durch Ätzung der Kluffläche zu verbessern. Zudem bewirkt der Druck des dabei produzierten CO₂ (falls mit der Säure Karbonate gelöst werden) einen zusätzlichen «Frac-Effekt».

Wahrscheinlichkeit eines «getriggerten» Schadenbebens

Im Zusammenhang mit den spürbaren Beben fokussierte die Diskussion unmittelbar auf die Frage nach der Wahrscheinlichkeit eines künstlich generierten Schadenbebens. Vor allem aus Kreisen der deutschen Geothermie-Szene wurde dabei auch argumentiert, dass

die verursachten Beben gar zu einer Verminderung des Erdbebenrisikos im Raum Basel beitragen.

Um ein starkes Schadenbeben vergleichbar jenem von Basel 1356 zu erzeugen, bedarf es der Aktivierung einer präexistenten Störung mit einer Ausdehnung von approximativ 30-40 km. Dies würde bedingen, dass die künstlich eingeleitete Stimulation in eine solche Struktur drifftet, die überdies in einem «überkritischen» Spannungszustand stehen müsste. Dies ist theoretisch denkbar, aber äusserst unwahrscheinlich. Die im Zusammenhang mit der Reservoirstimulation aufgetretenen Beben haben lediglich einen Spannungsabbau auf lokalen Bruchflächen bewirkt. Es kann somit auch nicht davon ausgegangen werden, dass die in der Bohrung Basel 1 ausgelösten schwachen Beben zur Reduktion des Risikos eines Starkbebens beitragen.

Überdies zeigen die Reservoirstimulationen sowohl in Soultz-sous-Forêts als auch in Kleinhüningen, dass nicht «junge» Strukturen (NNE-SSW) des Rheingrabens aktiviert wurden - welche von vielen Autoren immer wieder mit dem Beben von 1356 in Verbindung gebracht werden - sondern eher «hercynische», das heisst NW-SE-verlaufende Störungen (Ustaszewski & Schmid 2007).

Ausblick

Wie geht es mit dem Deep-Heat-Mining-Projekt in Basel-Kleinhüningen weiter?

Durch den frühzeitigen Abbruch der hydraulischen Stimulation und der weiteren Operationen sind die bisher durchgeführten Tests unvollständig, so dass noch keine definitiven Schlussfolgerungen zur Qualität des erzeugten Reservoirs gemacht werden können. Dazu sollten baldmöglichst mit «wireline tools» Nachmessungen im Bohrloch durchgeführt werden. Eine Risikoanalyse von unabhängigen Experten sollte bis Ende 2008 vor-

liegen. Bis dann wird eine Weiterführung des Projekts nicht möglich sein. Und auch dann würden Operationen erst wieder aufgenommen, wenn man in Basel auf die notwendige Akzeptanz und Unterstützung zählen kann. Hingegen werden anderweitige Nutzungen der Bohrung geprüft, darunter auch eine hydrothermale Option, wie die Anlage in Riehen.

Dass mit den bisherigen Arbeiten einmalige und wertvollste Erkenntnisse zur Weiterentwicklung der Geothermie gewonnen wurden, ist unbestritten. Deshalb wollen massgebende Partner des Projekts diese Erkenntnisse nutzen und einerseits die Forschung und Entwicklung sicherer Methoden unterstützen, andererseits aber auch in neue Projekte investieren.

Die Geschehnisse im Zusammenhang mit dem Deep-Heat-Mining-Projekt in Kleinhünningen zeigen eines deutlich: Für die Anwendung einer zukunftsweisenden Technologie in komplexem geologisch-tektonischem Umfeld braucht es umfassender Untersuchungen und Analysen. Wegen der dazu erforderlichen, beträchtlichen Investitionen bedarf es des Verbunds verschiedener Akteure aus Wirtschaft, öffentlicher Hand und Hochschulen. Dabei kommt gerade den Hochschulen eine äusserst wichtige Rolle zu, sind doch nur sie in der Lage, durch jahrelange Forschung jene Grundlagen bereit zu stellen, welche letztlich indirekt durch den Einsatz neuer Technologien der breiten Öffentlichkeit von Nutzen sein können.

Literatur

- Baudepartement des Kantons Basel-Stadt
<http://www.bd.bs.ch/geothermie>.
- Evans, K., Genter, A., Susse, J. 2005: Permeability creation and damage due to massive fluid injections into granite at 3.5 km at Soultz: 1. Borehole observations. *Journal of geophysical research*, V. 110.
- Gürler, B., Hauber, L. & Schwander, M. 1987: Die Geologie der Umgebung von Basel mit Hinweisen über die Nutzungsmöglichkeiten der Erdwärme. *Beitr. Geol. Karte der Schweiz*. 160.
- Hinsken, S., Ustaszewski, K. & Wetzel, A. 2007: Graben width controlling syn-rift sedimentation: the Palaeogene southern Upper Rhine Graben as an example. *Int. J. Earth Sci.* DOI 10.1007/s00531-006-0162-y. Online First.
- Rybach, L. 2007: The geothermal conditions in the Rhine Graben - a summary. *Bull. angew. Geol.* 12{1}, 29-32.
- Ustaszewski, K. 2004: Reactivation of pre-existing crustal discontinuities: the southern Upper Rhine Graben and the northern Jura Mountains - a natural laboratory. PhD thesis, Geologisch-Paläontologisches Institut, Universität Basel, 176pp. Erhältlich unter http://pages.unibas.ch/diss/2004/DissB_7362.pdf
- Ustaszewski, K. & Schmid, S.M. 2007. Neotectonic activity in the Upper Rhine Graben - Jura Mountains junction (North-Western Switzerland and adjacent France). *Bull. angew. Geol.* 12{1}, 3-19.