

Deep-Heat-Mining-Projekt Basel – Erste Erkenntnisse bei der Entwicklung eines Enhanced Geothermal System (EGS)

Florentin Ladner¹, Ulrich Schanz¹, Markus O. Häring¹

Zusammenfassung

Dieser Beitrag fasst die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Deep-Heat-Mining-Projekt in Basel zusammen. Neben dem vollständigen Bohrprofil werden petrologische, strukturelle und hydrogeologische Erkenntnisse über das kristalline Grundgebirge präsentiert, welches in der Tiefbohrung Basel 1 (5000 m) angebohrt wurde. Zudem werden die angetroffenen Spannungsverhältnisse charakterisiert und mit Herdflächenlösungen einiger induzierter seismischer Ereignisse in Zusammenhang gebracht. Daraus wird ein Reservoirmodell abgeleitet, welches die Entwicklung des Reservoirs beschreibt.

Abstract

This paper summarizes new insights from the Deep Heat Mining Project in Basel. The complete well profile will be presented as well as petrological, structural and hydrogeological aspects of the crystalline basement. The present-day stress regime in the near-field of well Basel 1 will be characterized. In combination with fault plane solutions, obtained from a range of induced seismic events, a reservoir model will be presented which describes the development of the Basel 1 geothermal reservoir.

1. Einführung

Im Rahmen eines Gespräches mit Markus O. Häring und Stefan M. Schmid wurden bereits erste Erkenntnisse bei der Entwicklung eines Enhanced Geothermal System (EGS) publiziert (Häring & Schmid 2007). Der vorliegende Beitrag knüpft an dieses Gespräch an und liefert weitere neue Erkenntnisse, die seit dem Abbruch der hydraulischen Stimulation in der Bohrung Basel 1 erarbeitet wurden. Für den interessierten Leser sei an dieser Stelle auf einen Artikel (Häring et al., 2008) in *Geothermics* verwiesen, der in Kürze veröffentlicht wird und welcher die Erkenntnisse aus dem Basel 1 Reservoir im Detail beschreibt.

1.1 Ausgangslage Deep-Heat-Mining Projekt

Das Deep-Heat-Mining (DHM) Projekt in Basel hat eine geothermische Strom- und Wärme-Produktion zum Ziel. Dies soll erreicht werden, indem mindestens zwei Bohrungen auf

¹ Geothermal Explorers Ltd., Pratteln, Schweiz

Tiefen von 5 km abgeteuft werden, wo Temperaturen um die 200°C herrschen. Das Konzept für die geothermische Strom- und Wärmeproduktion sieht vor, dass Wasser über eine Injektionsbohrung in ein zum Teil künstlich geschaffenes Reservoir verpresst wird. Dieses Wasser erwärmt sich während der Zirkulation durch das Reservoir und wird dann über eine zweite Bohrung zurück an die Oberfläche gefördert. An der Oberfläche erfolgt dann mittels entsprechender technischer Anlagen die Umwandlung der Wärme in Strom. Die Vorteile des Standortes Basel für ein solches Projekt sind:

- Der erhöhte geothermische Gradient im Rheingraben;
- Das bereits vorhandene Fernwärmenetz, welches erlaubt, die gewonnene Wärme einzuspeisen;
- Die Nähe zum Rhein, dessen Wasser als Kühlmedium bei der Umwandlung von Wärme in Strom genutzt wird.

Die Herausforderung eines EGS besteht im Wesentlichen darin, dass es gelingt, bei minimalem Fremdenergieeinsatz genügend Wasser von der Injektionsbohrung zur Produktionsbohrung zu befördern. Es ist davon aus-

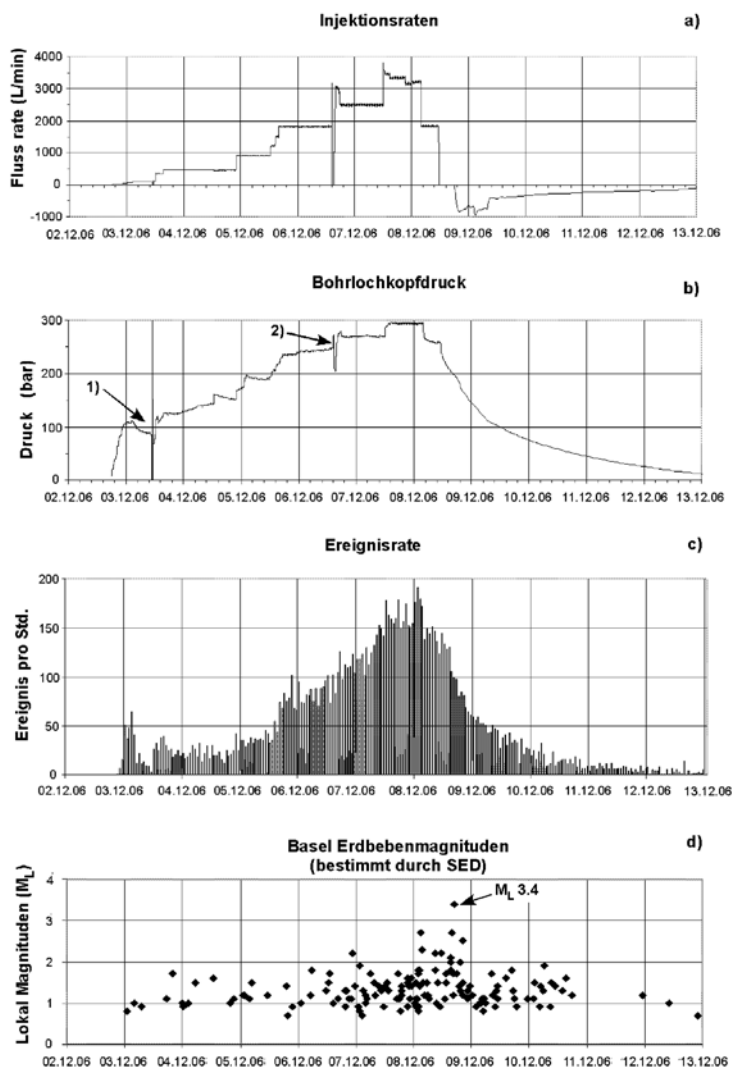


Fig. 1: Übersicht hydraulische Stimulation Basel 1. Angegeben sind a) Injektionsraten; b) Bohrlochkopfdruck; c) Seismische Aktivität und d) Erdbebenmagnituden. Im Diagramm b) sind die Druckschwankungen 1) auf einen Pumpenwechsel und 2) auf die Reparatur einer Leckage an der Druckschleuse (wireline blowout preventer) zurückzuführen.

zugehen, dass in Tiefen von 5000 m die natürlich vorhandene Wasserwegsamkeit sehr gering ist. Damit also eine entsprechend ausreichende Wasserzirkulation im Untergrund hergestellt werden kann, muss die Wasserwegsamkeit (Permeabilität) im Reservoir durch Anwendung von Stimulationsmassnahmen verbessert werden. Im Falle der Bohrung Basel 1 wurde dafür eine hydraulische Stimulation (2. bis 8. Dezember 2006) durchgeführt, bei der ein totales Wasservolumen von 11'570 m³ mit Bohrlochkopfdrücken von maximal 296 bar verpresst wurde (Fig. 1).

Es war geplant, die hydraulische Stimulation über einen Zeitraum von 21 Tagen durchzuführen. Nach 6 Tagen wurde eine erhöhte seismische Aktivität mit einer maximalen Magnitude M_L 2.6 im Reservoirbereich registriert. Daraufhin wurde die Injektionsrate reduziert. Da die seismische Aktivität dadurch nicht ausreichend vermindert werden konnte wurde beschlossen, die Stimulation zu beenden. Diese Entscheidung basierte auf einem im Voraus definierten Massnahmenplan, welcher von den kantonalen Behörden genehmigt wurde. Nachdem die Stimulation gestoppt wurde, ereignete sich während der Einschlussphase, als Vorbereitungen für das Ablassen des Druckes in der Bohrung unternommen wurden, ein seismisches Ereignis mit M_L 3.4. In den nachfolgenden 56 Tagen wurden insgesamt noch drei weitere Ereignisse mit $M_L > 3$ registriert.

1.2 Aktuelle Situation Deep-Heat-Mining-Projekt

Die aktuelle Situation des Projektes in Basel präsentiert sich so, dass das Projekt DHM momentan suspendiert ist und eine Risikoanalyse durch den Kanton Basel-Stadt in Auftrag gegeben wird. Die Risikoanalyse soll abklären, mit welchen seismischen Risiken eine Fortführung des DHM-Projektes verbunden ist. Den Zuschlag hierfür erhielt eine international zusammengesetzte Bieterge-

meinschaft Serianex Group (Seismic Risk Analysis Expert Group), die sich aus folgenden Firmen zusammensetzt: Q-con GmbH (Deutschland), Geoter S.A.S (Frankreich), Bureau d'Etudes Géologiques SA (Schweiz) und Résonance Ingénieurs-Conseils SA (Schweiz). Die Expertengruppe wird voraussichtlich im Herbst 2008 die Arbeit aufnehmen können, sofern der Grosse Rat des Kantons Basel-Stadt den benötigten Kredit von 1.2 Mio. CHF bewilligt. Erste Resultate werden bis Ende 2009 erwartet. Parallel zur Risikoanalyse wird Ende 2008 ein Risikodialog gestartet. Der Risikodialog hat zum Ziel, Politik und Bevölkerung über die Chancen und Risiken der Tiefengeothermie aufzuklären.

1.3 Tektonischer Rahmen

Basel liegt im Nordwesten der Schweiz am südöstlichen Rande des Rheingrabens. Der Rheingraben ist Teil eines prominenten, den gesamten europäischen Kontinent durchlaufenden Riftsystems, das sich von den Niederlanden im Norden bis nach Spanien im Süden erstreckt (Laubscher 2001, Dèzes et al. 2004). Das Südende des Rheingrabens markiert das Aufeinandertreffen des Rheingrabens im Norden, der Fortsetzung des Rheingrabens in der Rhein-Bresse-Transferzone gegen Westen sowie des Falten- und Tafeljura im Süden, respektive im Osten. Aus diesem Zusammentreffen resultiert ein komplexes Bruchmuster, das im Wesentlichen drei Bruchsysteme beinhaltet: NNE-streichende Brüche, die mit dem Rheingraben assoziiert werden; ENE-streichende Brüche, die mit der Rhein-Bresse-Transferzone verbunden werden und NW-streichende Brüche, die mit der variskischen Gebirgsbildung im Zusammenhang stehen (Fig. 2).

Kenntnisse zum rezenten Spannungsfeld in der Region Basel wurden vorwiegend aus Herdflächenlösungen von natürlichen Erdbeben abgeleitet. Es zeigt sich ein dominantes Strike-slip-Regime (Blattverschiebungen) mit einer NW-gerichteten maximalen horizonta-

len Spannungskomponente [SH_{max}] (Plenefisch & Bonjer 1997; Deichmann et al. 2000; Kastrup et al. 2004).

1.4 Seismizität im Raum Basel

Neben dem Wallis gehört der Raum Basel zu den Regionen mit erhöhter Seismizität in der Schweiz. Die Erdbeben sind im Allgemeinen von geringer Magnitude und Intensität. Eine Ausnahme stellt das Beben von 1356 dar, das mit einer Intensität von 9 und einer geschätzten Magnitude zwischen 6.5 und 6.9 als grösstes historisch bekanntes Beben in Nordeuropa gilt (Giardini et al. 2004).

Die seismische Gefährdung eines Gebietes wird häufig mit Hilfe eines Gutenberg-Richter Plots beschrieben (Fig. 3). Diese kumulative Magnituden-Häufigkeits-Verteilung natürlicher Beben gibt an, mit welchen Magnituden in welchem Zeitraum zu rechnen ist. Für die Region Basel ist gemäss dieser Darstellung pro Jahr mit einem Beben der Stärke M_L 2.7 zu rechnen oder alle 100 Jahre mit einem Beben der Stärke M_L 5.

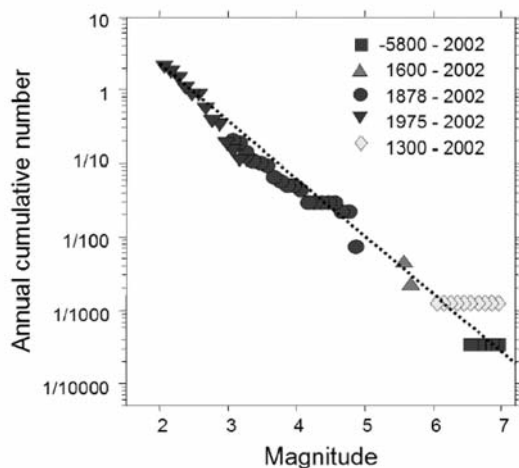


Fig. 3: Gutenberg-Richter Plot für die Region Basel (kumulative Magnituden-Häufigkeits-Verteilung). Die verschiedenen Symbole stehen für unterschiedliche Zeiträume (Giardini et al. 2004).

2. Neue Erkenntnisse

2.1 Geologische Erkenntnisse

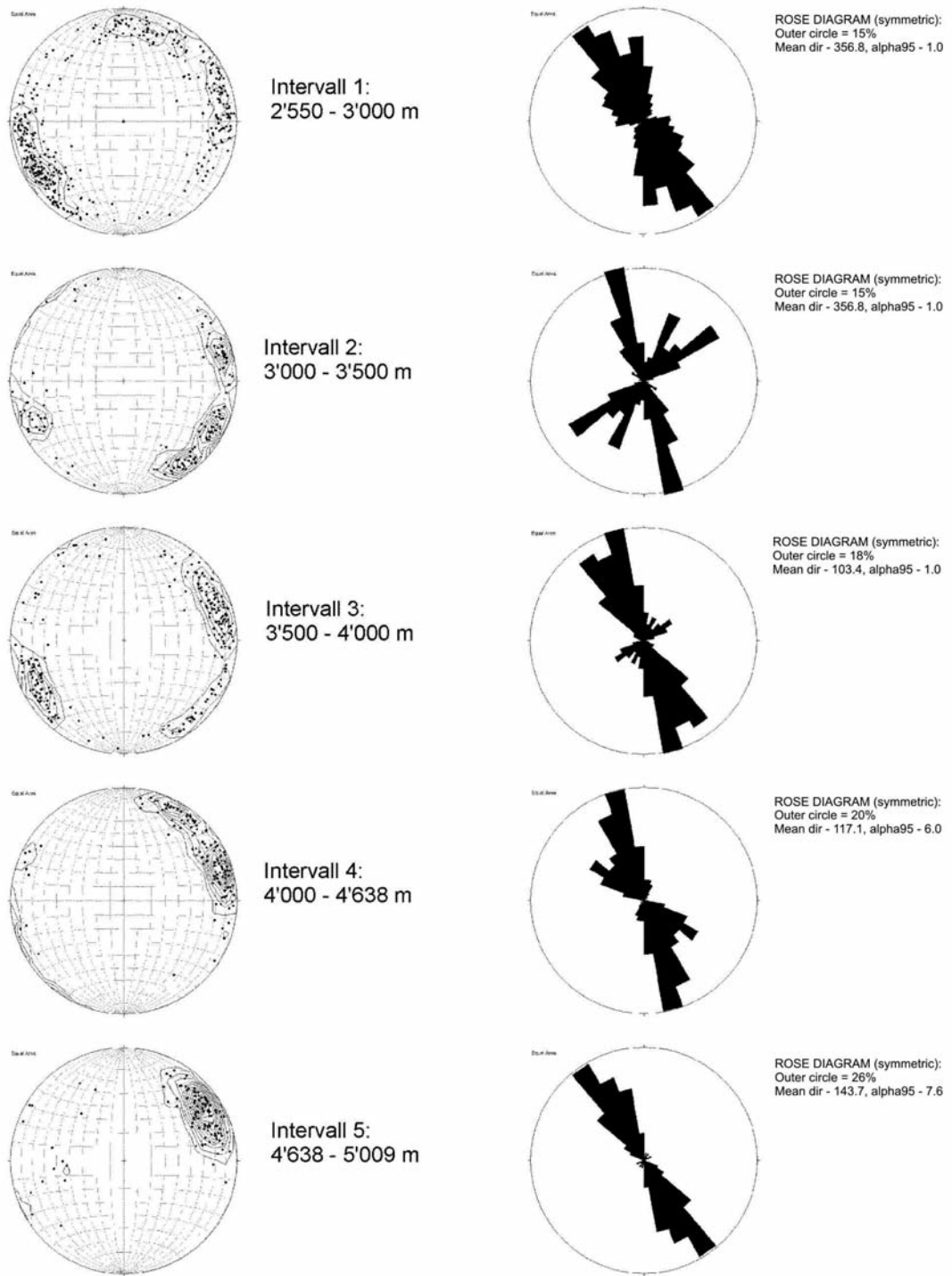
Die Bohrung Basel 1 lieferte ein vollständiges Bohrprofil bis auf eine Tiefe von 5000 m (Tab. 1). Zuerst wurde eine 2411 m mächtige Abfolge von quartären, tertiären, mesozoischen und permischen Sedimenten durchbohrt. Daran anschliessend folgte eine zirka 100 m mächtige Übergangszone, wo das Bohrlochklein sowohl aus permischen Siltsteinen wie auch aus granitischen Bruchstücken zusammengesetzt war. In einer Tiefe von 2507 m wurde dann zweifelsfrei kristallines Grundgebirge erreicht. Das Grundgebirge im Bereich der Bohrung Basel 1 besteht zur Hauptsache aus granitoiden Gesteinen (> 99%), Apliten und Lamprophyren. Es wurden keine metamorphen Gesteine angetroffen. Im Dach des Grundgebirges herrschen vorwiegend quarzreiche Hornblende-Biotit-Granite vor. Mit zunehmender Tiefe wurden quarzarme Hornblende-Biotit-Monzogranite und Monzonite angetroffen. Aus der geochemischen Analyse des Probenmaterials (Bohrklein und Bohrkern) konnte abgeleitet werden, dass die Monzogranite vom Typ-I sind, d.h. dass das Magma, aus dem die angetroffenen Monzogranite entstanden sind, ursprünglich aus einer Schmelze eines noch älteren magmatischen Gesteins stammen (Käser et al. 2007).

Für die strukturelle Analyse wurde das kristalline Grundgebirge von 2557 m bis 5000 m mit einem akustischen Bohrlochteleviewer befahren. Die Auswertung hat gezeigt, dass im oberen Teil des Grundgebirges die Trennflächendichte am grössten ist ($\sim 1/m$) und gegen Bohrlochende zunehmend abnimmt ($\sim 0.3/m$). Die dominante Streichrichtung der Trennflächen ist NW bis NNW mit steilem Einfallen sowohl nach NE wie SW (Fig. 4).

In der offenen Bohrlochstrecke befinden sich in Tiefen von 4700 m und 4835 m zwei markante Schwächezonen. Aus geochemischen Analysen des Bohrkleins und bohrlochphysikalischen Messungen (Spectral

Mächtigkeit [m]	Alter	Formationsbasis in mü. M. OKT = 250	Tiefe [m] unter OKT längs Bohrloch	Formation, Schichtglied
12	Quartär	238	0-12	Alluviale Rheinschotter
209	Oligocän	29	12-221	Blauer Letten (Septarienton)
10		19	221-231	Fischschiefer / Foraminiferenmergel
26		-8	231-257	«Meeressand»
112	Sannoisien	-119	257-369	Bunte Mergel («Sannoisien»)
28	Eocän	-147	369-397	Siderolithikum
21	Oberer Jura	-168	397-418	Verena-Schichten
17		-185	418-435	Humeralis- und Natica-Schichten
93		-278	435-528	Vorbourog-Kalke
15		-293	528-543	Liesberg-Schichten
63		-356	543-606	Oxfordien-Mergel
70		-425	606-676	Renggeri-Tone
51	Mittlerer Jura	-476	676-726	Dalle nacrée, Callovien-Tone Macrocephalus-/Varians-Schichten
15		-491	726-741	Oberer Hauptrogenstein
87		-578	741-828	Unterer Hauptrogenstein
91		-668	828-919	«Unterer Dogger»
147		-815	919-1066	Opalinus-Ton
30	Unterer Jura	-846	1066-1096	Jurensis-Mergel / Obtusus-Ton
8		-854	1096-1104	Arietenkalk / «Héttangien»
25	Obere Trias	-879	1104-1129	Rhät / «Obere Bunte Mergel»
9		-888	1129-1139	Gansinger Dolomit
12		-900	1139-1151	«Untere Bunte Mergel»
31		-931	1151-1182	Schilfsandsteingruppe
126		-1057	1182-1307	Gipskeuper
5		-1062	1307-1312	«Lettenkohle», Estherienschiefer
18		-1080	1312-1331	Trigonodus-Dolomit
26		-1106	1331-1356	Nodosus- bzw. Plattenkalk
30	Mittlere Trias	-1136	1356-1388	Trochitenkalk
13		-1149	1388-1400	Dolomit der Anhydritgruppe
29		-1178	1400-1429	Obere Sulfatzone
74		-1252	1429-1503	Steinsalz
11		-1263	1503-1514	Orbicularis-Mergel
42		-1305	1514-1556	Wellenmergel
7		-1312	1556-1563	Wellendolomit
4		Untere Trias	-1316	1563-1567
17	-1333		1567-1583	Plattensandstein
6	-1339		1583-1590	Karneolhorizont
56	-1394		1590-1646	Mittlerer / Unterer Buntsandstein
136	Perm	-1530	1646-1782	Oberes Oberrotliegend
25		-1555	1782-1807	Kristallinbrekzie / Oberrotliegend
450		-2005	1807-2257	Mittleres Oberrotliegend
153		-2158	2257-2411	Unteres Oberrotliegend
96		-2254	2411-2507	Übergangszone zwischen Rotliegendem und Granit
		-4742.2	2507-5000	Schwarzwaldgranit: - Mittelkörniger Granit - Monzonit

Tab. 1: Schichtfolge in der Bohrung Basel 1.



Geothermal Explorers Ltd

Fig. 4: Trennflächenanalyse für angegebene Tiefenintervalle. Links sind die Flächenpole dargestellt (flächentreues Netz, untere Halbkugel). Rechts ist das Streichen der Trennflächen als Rosendiagramm dargestellt.

Gamma Ray) wurde geschlossen, dass es sich dabei um zwei kataklastische Störzonen handelt. Beide Zonen weisen stark alterierte Feldspäte auf (Bildung von Tonmineralien) und einen bemerkenswerten Anteil an Anhydriten (Käser et al. 2007). Die Orientierung der beiden Störzonen konnte leider nicht bestimmt werden, weil der Bohrlochdurchmesser an diesen Stellen stark aufgeweitet war.

2.2 Hydrogeologische Erkenntnisse

Bereits die Beobachtung von relativ wenigen Trennflächen in der offenen Bohrlochstrecke deutete darauf hin, dass im Reservoirbereich mit geringen natürlichen Permeabilitäten zu rechnen ist. Hydraulische Bohrlochversuche im offenen Bohrlochbereich (4629-5000 m ab OKT) vor der Stimulation ergaben effektive Gebirgspermeabilitäten in der Größenordnung von 10^{-17} m², respektive hydraulische Durchlässigkeiten in der Größenordnung von 10^{-10} m/s. Als Vergleich aufgeführt seien hier k-Werte für den Opalinuston, die im Bereich von 2×10^{-14} m/s bis 2×10^{-12} m/s liegen

(NAGRA 2002). Eine weiterführende Analyse der Druckdaten zeigte auf, dass ein bilineares Fließregime dominiert. Bilineares Fließen bedeutet, dass sowohl die Wasserwegsamkeit entlang von Trennflächen wie auch die hydraulische Kommunikation zwischen Trennflächen und dem Gebirge das hydraulische Verhalten im Reservoir dominieren.

Eine weitere Erkenntnis, die aus den hydraulischen Bohrlochversuchen gewonnen werden konnte ist, dass die Bohrung, wenn sie mit Frischwasser gefüllt ist, einen artesischen Druck von 17-20 bar aufweist. Das Zufließen von Formationsfluid, dessen Dichte höher ist als die von Frischwasser, bewirkte in der Zwischenzeit eine Absenkung des Wasserspiegels, so dass die Bohrung heute nicht mehr artesisch ist. Automatische Pegelstandmessungen haben gezeigt, dass der Wasserspiegel bis zirka 15 m unter OKT fällt. Der Wasserspiegel ist aber nicht konstant, sondern er verhält sich sehr dynamisch (Fig. 5): Nach einer Phase des Druckaufbaus folgt der «Auswurf» von zirka 30 m³ Wasser, ähnlich einem Geysir,

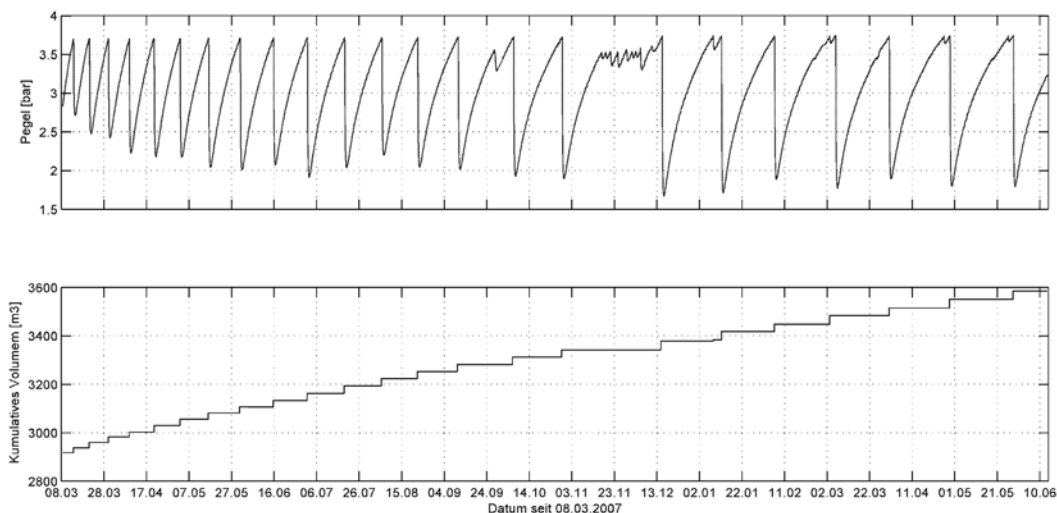


Fig. 5: Pegelstandmessungen und kumulatives Wasservolumen, das seit dem Abbruch der Stimulation zurückgeflossen ist. Der Pegelstand wird mit einer Druckmesssonde gemessen, die sich in einer Tiefe von 33 m unter OKT befindet und automatisch den Druck der darüber liegenden Wassersäule misst. Beim Erreichen eines Druckes von 3.7 bar fängt die Bohrung an Wasser «auszusucken».

das dann über eine Abführleitung in ein Auffangbecken geführt wird. Danach sinkt der Pegel schlagartig ab und baut sich erneut auf. Wir vermuten, dass dieses dynamische Verhalten im Zusammenhang mit einer Entgasung von CO₂, N₂ und CH₄ steht, das quantitativ nachgewiesen werden konnte. Bis zum heutigen Tage wurden dadurch zirka 3600 m³ von total 11'570 m³ eingepresstem Wasser zurückgefördert.

Dieses ausgeworfene Wasser wird periodisch beprobt und chemisch analysiert. Die Resultate zeigen, dass das Wasser zu Beginn noch stark mit dem injizierten Rheinwasser gemischt war und dass sich dieses Mischverhältnis mit der Zeit in Richtung eines Formationswassers verschiebt. Die Analyse der letzten Probe hatte folgende Zusammensetzung (Tab. 2):

Parameter	Messwert [mg/l]	Messwert [mmol/l]	Messwert [mmol(eq)/l]
Na	5110.0	222.3	222.3
K	439.0	11.2	11.2
Mg	0.6	0.0	0.0
Ca	465.0	11.6	23.2
Sr	11.6	0.1	0.3
Li	31.6	4.6	4.6
ΣKationen			261.6
Br	45.5	0.6	0.6
Cl	8990.0	253.6	253.6
SO ₄	235.0	2.4	4.9
HCO ₃	117.1	1.9	1.9
F	6.0	0.3	0.3
ΣAnionen			261.3
SiO ₂	141.4		
TDS	15451.0		
Bilanz [%]			0.1

Tab. 2: Chemische Zusammensetzung der Wasserprobe aus Basel 1 vom 06.02.2008.

Chemische Hauptbestandteile des geförderten Wassers sind Na und Cl. Der Gesamtlösungsinhalt (TDS) beträgt heute ~ 15.5 g/l. Dieser Wert ist im Vergleich zu den Gesamtlösungsinhalten der Tiefbohrungen in Soultz-sous-Forêts (Elsass, F), die sich ebenfalls im Rheingraben befinden und auf 5 km in den Granit abgeteuft wurden, bemerkenswert gering. Dort wurden Werte im Bereich von ~ 100 g/l festgestellt.

Die wahre Reservoirtemperatur konnte bis zum heutigen Tag nicht in situ gemessen werden. Sie konnte lediglich aus mehreren Temperaturmessungen, die nach Erreichen der Zieltiefe von 5000 m gefahren wurden, ermittelt werden. Diese gemessenen Temperaturen sind durch den vorgängigen Bohrprozess gestört und die wahre Reservoirtemperatur kann nur über Extrapolationsverfahren (z. B. Horner Plot) abgeschätzt werden. Die angewandten Extrapolationsverfahren lassen auf eine wahre Reservoirtemperatur von 190°C schliessen.

2.3 Herdmechanismen der induzierten Beben

Die Bestimmung des Herdmechanismus für die im Reservoir induzierten Beben wurde vom Schweizerischen Erdbebendienst (SED) vorgenommen. Bis heute wurden 27 Herdmechanismen von Beben der Stärke $1.7 \leq M_L \leq 3.4$ bestimmt (Deichmann et al. 2007a). Sie zeigen hauptsächlich links laterale Blattverschiebungen auf N-S streichenden Bruchflächen respektive rechts laterale Blattverschiebungen auf E-W streichenden Bruchflächen. Untergeordnet wurden zwei Herdflächenlösungen mit einem abschiebenden Charakter festgestellt.

2.4 Spannungsverhältnisse

Die Orientierung der Hauptspannungsachsen konnte anhand von einem akustischen Bohrlochteleviewer abgeleitet werden, der über eine Tiefe von 2600-5000 m gefahren wurde. Da die Bohrung Basel 1 praktisch vertikal ist, zeigen Bohrlochausbrüche die Richtung der minimalen horizontalen Hauptspannungsachse (S_{Hmin}) an und «drilling-induced tensile fractures» die Richtung der maximalen horizontalen Hauptspannung (S_{Hmax}) (Fig. 6). Die Auswertung ergibt eine Richtung für S_{Hmin} von $54 \pm 14^\circ$ und für S_{Hmax} von $144 \pm 14^\circ$ (Valley & Evans 2006). Diese Richtungen stimmen gut mit den Orientierungen der Hauptspannungsachsen, die aus

Herdflächenlösungen natürlicher Erdbeben abgeleitet wurden, überein.

Es wurden keine spezifischen Messungen (z. B. Hydrofrac-Messungen) zur Bestimmung der Gebirgsspannungsmagnituden durchgeführt. Trotzdem wurde versucht, dieselben abzuschätzen und/oder einzuschränken. Dafür wurden verschiedene Methoden und Beobachtungen miteinander kombiniert (Häring et al. 2008):

- Herdflächenlösungen der induzierten Ereignisse für die Bestimmung der relativen Spannungsmagnituden;
- Integration von Dichtemessungen in den Bohrungen Otterbach 2 und Basel 1 zur Bestimmung der vertikalen Gebirgsspannung S_V ;
- Maximaler Injektionsdruck während der hydraulischen Stimulation zur Einschränkung von S_{hmin} (Untergrenze für S_{hmin}).
- Abschätzung der beiden horizontalen Gebirgsspannungen S_{Hmax} und S_{hmin} anhand von Kernproben aus 4911 m Tiefe mit Hilfe von RACOS® (Rock Anisotropy Characterization on Samples, Braun 2007).
- Theoretische Einschränkung der beiden horizontalen Gebirgsspannungen S_{Hmax} und S_{hmin} unter Zugrundelegung der Annahme, dass die maximalen Spannungsdifferenzen in der Kruste durch den Reibungskoeffizienten μ von günstig zum

rezenten Spannungsfeld orientierten Brüchen kontrolliert und limitiert werden (Zoback 2007).

Zusammenfassend können folgende Schlussfolgerungen bezüglich der Gebirgsspannung in der Bohrung Basel 1 gezogen werden:

- Die angewandten Methoden und Beobachtungen sind als ein erster Versuch zu einer quantitativen Einschränkung der vorherrschenden Gebirgsspannungen in der Bohrung Basel 1 zu betrachten. Die angegebenen Werte sind als eine grobe Schätzung anzusehen.
- Die relativen Gebirgsspannungen in der Bohrung Basel 1 verhalten sich nach folgender Hierarchie: $S_{Hmax} > S_V > S_{hmin}$ ($S_1 = S_{Hmax}$; $S_2 = S_V$; $S_3 = S_{hmin}$), was darauf hindeutet, dass ein Spannungsregime vorliegt, das durch Horizontalverschiebungen dominiert wird. Dieses Resultat stimmt mit der Analyse der Herdflächenmechanismen natürlicher Beben in der Region überein (Plenefisch & Bonjer 1997; Deichmann et al. 2000; Kastrup et al. 2004).
- Die Beobachtungen der Bohrlochwandausbrüche und induzierten Zugrisse in der Bohrung Basel 1 lassen darauf schliessen, dass die Orientierung des Spannungsfeldes über das gemessene kristalline Grundgebirge relativ homogen ist. Darüber hinaus wird

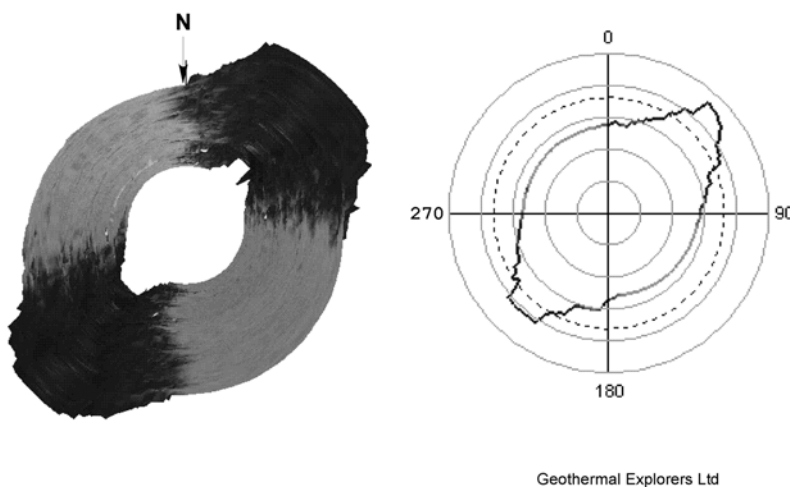


Fig. 6: Links: Bohrlochwandausbruch in der Bohrung Basel 1 (Tiefe 4965 m). Rechts: Horizontalschnitt auf dieser Tiefe. Bohrlochwandausbrüche geben für S_{hmin} eine Richtung von $54 \pm 14^\circ$ an.

Geothermal Explorers Ltd

angenommen, dass relativ grosse differentielle Spannungen zwischen S_{Hmax} und S_{Hmin} bestehen.

Insgesamt ergeben sich somit für die Hauptspannungskomponenten für eine Tiefe von 4911 m folgende grobe Abschätzungen:

- Kleinste Hauptspannung ($S_{Hmin} = S_3$):
74 MPa $\leq S_{Hmin} \leq$ 122 MPa;
- Mittlere Hauptspannung ($S_V = S_2$):
~122 MPa;
- Grösste Hauptspannung ($S_{Hmax} = S_1$):
160 MPa $\leq S_{Hmax} \leq$ 255 MPa.

Diese Angaben lassen sich noch verfeinern, wenn die Resultate der Herdflächenlösungen induzierter Beben und die Messresultate aus RACOS® mit einbezogen werden:

- Kleinste Hauptspannung ($S_{Hmin} = S_3$):
~ 84 MPa;
- Mittlere Hauptspannung ($S_V = S_2$):
~ 122 MPa;
- Grösste Hauptspannung ($S_{Hmax} = S_1$):
~ 160 MPa.

2.5 Reservoirentwicklungen

Die erste induzierte seismische Aktivität wurde bereits 3.75 Std. nach dem Start der hydraulischen Stimulationsoperation festgestellt. Die Reservoirentwicklung begann nahe dem Verrohrungsschuh bei 4630 m unter Terrain. Wiederholte Messungen mit einer Druck-Temperatur-Spinner-Sonde während der Stimulation erbrachten den Nachweis einer hydraulisch aktiven Trennfläche

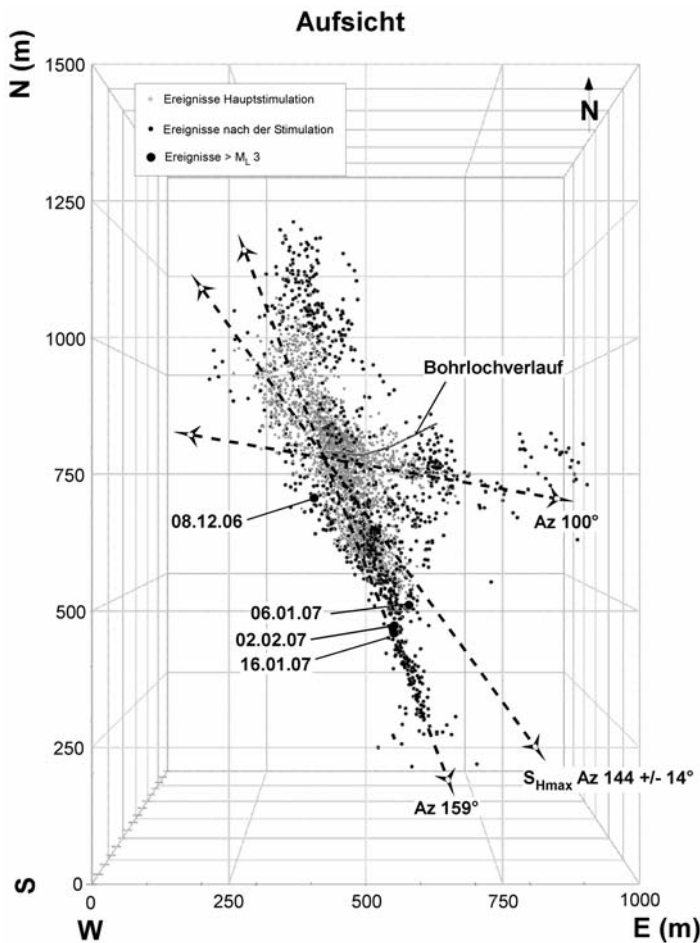


Fig. 7: Aufsicht der dominanten Reservoir-Streichrichtungen im Vergleich mit der Streichrichtung der maximalen horizontalen Hauptspannung. Die Punkte stellen absolute Hypozentren-Lokalisierungen der Ereignisse aus dem Zeitraum der Hauptstimulation und nach der Stimulation bis zum 28. April 2008 dar. Die grossen schwarzen Punkte repräsentieren Ereignisse mit $M_L > 3$.

in dieser Tiefe. Die weitere Reservoirentwicklung fand anschliessend bevorzugt entlang einer steilstehenden NNW-SSE gerichteten Struktur statt. Mit zunehmender Stimulationsdauer zeichnete sich ein weiterer steilstehender Ast ab, der ESE-WNW orientiert ist. Das seismische Abbild des insgesamt hydraulisch aktivierten Reservoirs besteht aus zwei steil stehenden, planar erscheinenden Elementen, die NNW-SSE und ESE-WNW

orientiert sind (Fig. 7 und Fig. 8). Das seismisch aktive Volumen beträgt näherungsweise 35 Mio. m³.

Nach dem Abbruch der Stimulation setzte sich die messbare seismische Aktivität fort. Beobachtet wurden noch drei Beben mit einer Stärke $M_L > 3$ und eine Vielzahl an weiteren nicht spürbaren Ereignissen. Diese Ereignisse traten überwiegend an der Peripherie des Reservoirs auf.

Seitenansicht

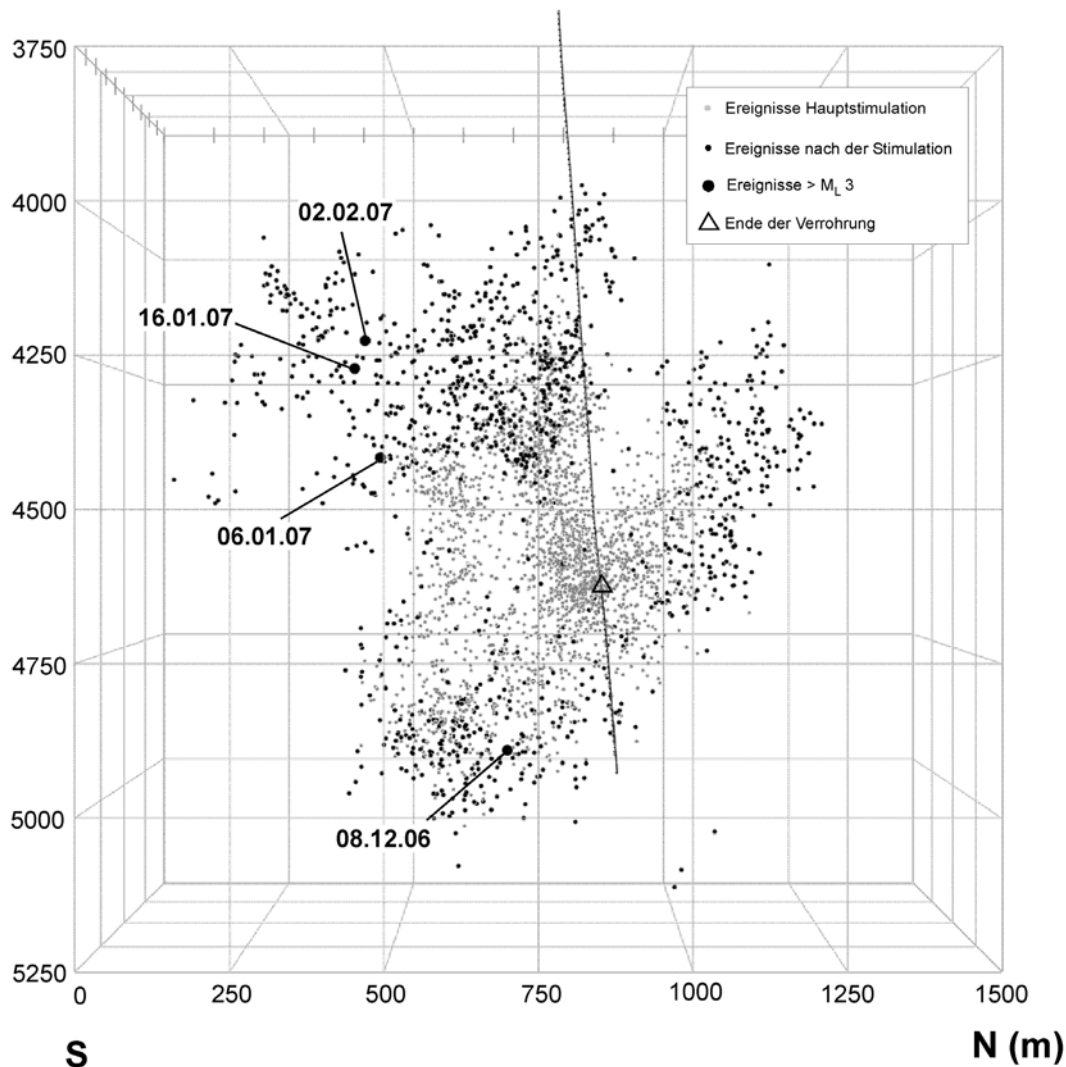


Fig. 8: Seitenansicht des Reservoir Basel 1. Das Dreieck markiert das Ende der Verrohrung und der Beginn der offenen Bohrstrecke (4638-5000 m). Übrige Parameter wie in Figur 7.

Inzwischen hat sich die seismische Aktivität stark beruhigt. Es werden bis zum heutigen Tage sporadisch Ereignisse im Reservoirbereich festgestellt, die aber meist zu schwach sind, als dass sie lokalisiert werden könnten.

3. Reservoirmodell

Ausgehend von den hier präsentierten neuen Erkenntnissen lässt sich ein Reservoirmodell ableiten. Der dominante Teil des stimulierten Reservoirs in Basel 1 entwickelte sich entlang einer NNW-SSE orientierten Struktur. Wir gehen davon aus, dass diese Struktur eine prä-existente, aber seismisch nicht aktive Störzone darstellt.

Durch die Erhöhung des Porenwasserdruckes während der Stimulation wurden prä-existente, günstig orientierte Trennflächen im Reservoir zur Scherung gebracht. Die bestimmten Herdmechanismen zeigen, dass diese Scherung mehrheitlich Blattverschiebungen sind mit Bruchflächen, die entweder näherungsweise N-S oder E-W orientiert sind. Es ist deshalb davon auszugehen, dass diese NNW-SSE orientierte kataklastische Störzone nicht als Ganzes aktiviert worden ist, sondern dass innerhalb dieser Störzone Scherprozesse ausgelöst wurden, die auf zueinander versetzten Bruchflächen mit tendenziell N-S respektive E-W gerichteten Knotenebenen stattgefunden haben (en-échelon Anordnung).

Mit zunehmendem Injektionsdruck während der Stimulation fand eine Kompensation der Normalspannung (in unserem Fall entspricht die Normalspannung annäherungsweise S_{hmin}) innerhalb dieser Struktur statt. Dies bewirkte eine elastische Entspannung und führte zu einer temporären Erhöhung der Permeabilität, so dass das verpresste Wasser noch besser in diese Struktur vordringen konnte, was zu einem dominanten Reservoirwachstum in dieser Richtung führte.

Für den ESE-WNW gerichteten Seitenast gibt es noch kein schlüssiges Erklärungsmodell, weil bis jetzt noch keine Herdflächenlösun-

gen aus diesem Reservoirabschnitt vorliegen.

4. Ausblick

In naher Zukunft werden die Aktivitäten des Deep-Heat-Mining-Projektes auf zwei Aspekte fokussiert sein: Erstens wird, wie bereits erwähnt, die Risikoanalyse in Angriff genommen und zweitens ist geplant, Nachmessungen in der Bohrung Basel 1 durchzuführen. Voraussichtlich werden in einem ersten Schritt eine Temperaturmessung und ein Niedrig-Raten Fördertest durchgeführt werden. Die dadurch erhaltenen Messdaten würden eine bessere Beurteilung des geschaffenen Reservoirs ermöglichen; sie würden eine zusätzliche Grundlage für die anstehende Risikoanalyse darstellen und sie würden mithelfen, alternative Nutzungsmöglichkeiten für die Bohrung Basel 1 zu prüfen. Notwendig ist auch eine Nachmessung der offenen Bohrlochstrecke mit einem akustischen Bohrlochteleviewer, um die Veränderung der Klüftung nach der hydraulischen Stimulation feststellen zu können. Allerdings sind die benötigten Mittel und Bewilligungen dazu noch nicht gesprochen.

Literatur

- Baer, M., Deichmann, N., Braunmiller, J., Clinton, J., Husen, S., Fäh, D., Giardini, D., Kästli, P., Kradolfer, U., Wiemer, S. 2007: Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2006. *Swiss J. Geosciences* 100, 517-528, 2007, doi: 10.1007/s00015-007-1242-0.
- Braun, R. 2007: Analyse gebirgsmechanischer Versagenszustände beim Geothermieprojekt Basel. Report to Geopower Basel AG for Swiss Deep Heat Mining Project Basel. Dr. Roland Braun. Consultancy in rock mechanics, Basel, Switzerland, 30 pp.
- Deichmann, N., Ballarin, D., Kastrup, U. 2000: Seismizität der Nord- und Zentralschweiz. Nagra technical report 00-05, Wettingen, Switzerland, 93 pp.
- Deichmann, N., Ernst, J. & Wöhlbier, S. 2007a: Data Analysis. In: Evaluation of the induced seismicity in Basel 2006/2007: locations, magnitudes, focal mechanisms, statistical forecasts and earthquake scenarios. Report of the Swiss Seismological Service to Geopower Basel AG, Basel, Switzerland, 152 pp.
- Dèzes, P., Schmid, S.M., Ziegler, P.A. 2004: Evolution of the European Cenozoic Rift System: interaction of the Alpine and Pyrenean orogens with their foreland lithosphere. *Tectonophysics* 389, 1-33.
- Giardini, D., Wiemer S., Fäh D., Deichmann N. 2004: Seismic Hazard Assessment of Switzerland. Swiss Seismological Service, ETH Zürich, Switzerland. 82 pp.
- Gürler, B., Hauber, L., Schwander, M. 1987: Die Geologie der Umgebung von Basel mit Hinweisen über die Nutzungsmöglichkeiten der Erdwärme. Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz. 33 pp.
- Häring, M.O., Schanz, U., Ladner, F. & Dyer, B.C. 2008: Characterisation of the Basel 1 Enhanced Geothermal System. *Geothermics*, doi: 10.1016/j.geothermics.2008.06.02.
- Häring, M.O. & Schmid, S.M. 2007: Deep-Heat-Mining-Projekt Basel-Kleinhüningen – Erschließung eines geothermischen Reservoirs. *Bull. angew. Geol.*, 12/1, 33-41.
- Kastrup, U., Zoback, M.L., Deichmann, N., Evans, K., Giardini, D. & Michael, A.J. 2004: Stress field variations in the Swiss Alps and the northern Alpine foreland derived from inversion of fault plane solutions. *Journal of Geophysical Research* 109, B01402, doi:10.1029/2003JB002550.
- Käser, B., Kalt, A. & Borel, J. 2007: The crystalline basement drilled at the Basel-1 geothermal site. A preliminary petrological-geochemical study. Institut de Géologie et d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel. Interner Bericht zu Handen von Geopower Basel AG.
- Laubscher, H., 2001: Plate interactions at the southern end of the Rhine graben. *Tectonophysics* 343, 1-19.
- Nagra 2002: Technischer Bericht 02-03. Projekt Opalinuston. Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle.
- Plenefisch, T. & Bonjer, K.-P. 1997: The stress field in the Rhine Graben area inferred from earthquake focal mechanisms and estimation of frictional parameters. *Tectonophysics* 275, 71-97.
- Valley, B. & Evans, K.F. 2006: Stress orientation at the Basel geothermal site from wellbore failure analysis in BS1. Report to Geopower Basel AG for Swiss Deep Heat Mining Project Basel. ETH Report Nr.: ETH 3465/56. Ingenieurgeologie ETH Zürich, Switzerland, 29 pp.
- Zoback, M.D. 2007: Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 449 pp.