ETH zürich

ETH Library

The relation between natural fracturing and stress heterogeneities in deep-seated crystalline rocks at Soultz-sous-Forêts (France)

Doctoral Thesis

Author(s):
Valley, Benoit C.

Publication date:
2007

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-005562794

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

Dissertation ETH Number 17385

The relation between natural fracturing and stress heterogeneities in deep-seated crystalline rocks at Soultz-sous-Forêts (France)

A dissertation submitted to the

Swiss Federal Institute of Technology Zurich

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

Benoît Christian Valley

Dipl. en Sciences de la Terre, Université de Neuchâtel, Switzerland
born March 2, 1979
citizen of Chevenez (JU), Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Simon Löw, examiner

Dr. Keith F. Evans, co-examiner

Dr. Albert Genter, co-examiner

Dr. François H. Cornet, co-examiner

2007

Abstract

ENHANCED Geothermal Systems (EGS) — initially called Hot Dry Rock (HDR) — is a technology which was developed since the 1970's in order to exploit the heat contained within the low-porosity rocks which underlie large areas of the continents at practically drillable depths. The challenge of this technology is to find the appropriate way of developing flow paths between deep boreholes which permit heat extraction at economic rates. This is usually attempted by performing massive fluids injections which serve to elevate pore pressures, thereby promoting shearing and permeability enhancement of natural fractures within the rock mass. Hence modelling of the permeability-enhancement processes requires quantitative knowledge of the characteristics of the natural fracture population, and the state of stress. The objective of the work presented in this thesis is to improve our understanding of both aspects of the 5 km deep reservoir at the Soultz-sous-Forêts geothermal site (France). The data analysed stem principally from the acoustic televiewer images acquired in the three 5 km deep boreholes of the Soultz site. An unusual feature of the data is that the wells are less than 20 m apart in the granite section down to 2.5 km depth. This allowed the lateral variation in both natural fracture characteristics and stress to be examined. Below 2.5 km, the wells spread apart reaching 700 m at 5 km depth where the natural formation temperature is about 200°C. The intention is to construct a geothermal electricity production plant that will become operational in 2008.

Thousands of natural fractures were identified and analysed on more than 7 km of borehole wall images. An important aspect of the analysis is to find ways to use the fracturing observed at the 30 cm diameter borehole walls for interpreting structures at the reservoir scale (i.e. up to 2 km). Innovative methods were developed that exploited the small spacing of the wells to 2.5 km in order to quantify the spacing and the size of the structures identified in each of the holes. Four major sets of fractures were identified on the basis of orientation. Fractures had mean true sizes of 15 to 40 m diameter. Spacings appeared to follow log-normal laws with arithmetic mean values of 1 to 6 m, although this could be an artefact of selective sampling of what is actually a power law due to the limited resolution of the televiewer. The distribution of fractures along the wells shows distinct clustering, reflecting the intersection of the well with fracture zones composed of an anastomosed network of fractures delimiting shear lenses. Large variations in both the internal structure and the thickness of fracture zones occur over distances of 10 to 20 m. These variations are believed to have a significant influence on the hydraulic behaviour of the zones by channelling the flow. The spacings of the fracture zones range from 40 to 400 m. The size of such

structures cannot be specified with our data set. Microseismic imaging shows they can extend over distances of several hundred metres.

Drilling induced tension fractures (DITFs) occur more or less continuously above 2.2 km, whereas breakouts occur below 3.6 km. This depth-partition, together with hydraulic data from the injections, allows constraints to be placed on the stress state at Soultz down to 5 km depth. The orientation of the maximum horizontal principal stress was found to be at 169°±14°. The magnitude of the vertical stress was evaluated by integrating density logs. The magnitude of the minimum principal horizontal stress was estimated from downhole pressure recorded during several massive fluid injections. The magnitude of the maximum principal horizontal stress was constrained using the distinct depth ranges where tensile (i.e. DITFs) and compressive (i.e. breakouts) failure occurred. Extraction of estimates of the far-field stress magnitudes from the DITFs observations required that the profile of maximum cooling of the borehole wall during drilling be specified. This was taken as the temperature at the bit during drilling, and was estimated from measurement-while-drilling data. The constraints on stress from the breakouts required the cooling profile prevailing along the hole at the time of the log be specified, as well as the compressive strength of the rock. The latter was obtained from UCS tests conducted as part of this study. The resulting constraints on $SHmax$ magnitude support the conclusion derived from the appearance of both normal and strike-slip fault plane solutions of induced microseismic events that $SHmax = 1.0Sv$. The utility of the present results is to place upper and lower bounds on permissible deviations from equality. A by-product of the analysis was the inference that the coefficient in the effective stress law for tensile failure for the Soultz granite must be less than 0.8, and probably significantly less.

Stress heterogeneity was studied by examining the deviation of the orientation of $SHmax$ from the mean direction. Stress variations were seen to occur at all scales and follow a self-affine scaling law. Examination of short-wavelength (<50 m) variations of the DITF orientations in the sections where the wells are about 20 m apart shows that they are correlated with natural fractures, but usually not correlated between wells. This suggests that fractures are for the most part not much larger than 40 m in diameter, in agreement with the results of the study of fracture size. Large wavelength variations are also seen and are principally associated with fracture zones. Indeed, the two most prominent large scale perturbations coincide with the two most significant fracture zones intersected by the wells. En-echelon DITFs were often seen to lie sub-parallel to natural fractures. This geometry could be explained if the natural fracture had suffered a large but not a total stress drop, so that one principle stress lies almost normal to its plane. DITFs forming within the zone of stress perturbation about the natural fracture would thus be sub-parallel to it. The natural fractures in question would all be critically stressed under the prevailing linear stress characterisation for the site. This, together with the frequency with which the geometry is seen suggests that the shear stress on the natural fractures was relieved relatively recently, possibly during drilling in response to high wellbore pressure at the drill bit.

Résumé

La technologie des 'Enhanced Geothermal Systems' (EGS, systèmes géothermiques stimulés) — appelée initialement 'Hot Dry Rock' (HDR) — a été développée dès les années 1970 afin d'exploiter les vastes réserves de chaleur contenues dans les roches de faible porosité que l'on trouve dans d'importantes portions des masses continentales à une profondeur atteignable par forage. Le défi de cette technologie est de trouver une méthode appropriée pour développer les chemins d'écoulement qui permettront d'extraire la chaleur de manière rentable. Une méthode possible — appelée stimulation hydraulique — consiste à effectuer des injections massives de fluides. Celles-ci ont pour conséquence d'élever la pression interstitielle dans le massif, ce qui favorise le cisaillement des fractures naturelles et permet d'élever leur perméabilité. Par conséquent, la modélisation des processus d'augmentation de la perméabilité nécessite d'acquérir des connaissances quantitatives concernant les caractéristiques de la fracturation naturelle, ainsi que de l'état des contraintes in-situ. L'objectif des recherches présentées dans cette thèse vise à améliorer notre compréhension de ces deux aspects sur le site géothermique de Soultz-sous-Forêts (France). Les principales sources de données pour cette étude sont les imageries acoustiques acquises dans les trois forages profonds du site de Soultz. Une particularité de ces données réside dans le fait que les forages sont distants de moins de 20 m le long de leur section granitique, ceci jusqu'à une profondeur de 2.5 km. Cette configuration est favorable à l'étude des variations latérales de la fracturation naturelle ainsi que celles des contraintes. Au-delà de 2.5 km de profondeur, les forages s'éloignent, atteignant une séparation de 700 m à la profondeur de 5 km, où la température du massif est d'environ 200°C. Le but général du projet est de construire une centrale géothermique pour la production d'électricité, opérationnelle dès 2008.

Plusieurs milliers de fractures naturelles ont été analysées le long de plus de 7 km d'images des parois des forages. Un aspect important de cette analyse est de trouver des méthodes permettant de prendre en compte la fracturation observée sur les parois de forage de 30 cm de diamètre, pour interpréter les structures à l'échelle du réservoir, c.-à-d. pour des tailles allant jusqu'à 2 km. Des méthodes innovantes exploitant la faible séparation des forages dans l'intervalle de profondeur 1.4 km – 2.5 km ont été développées afin de quantifier l'espacement et la taille des structures identifiées dans chaque forage. Quatre principales familles d'orientations des fractures ont été identifiées. Nous avons évalué que la taille moyenne des fractures individuelle se situe entre 15 et 40 m et que leurs espacements vrais suivent une loi log-normale avec une moyenne arithmétique entre 1 et 6 m. Cette distribution log-normale reflète probable-

ment l'échantillonnage sélectif lié à la résolution limitée des imageries de forage sur une distribution originale des espacements qui elle, suit une loi de puissance. Les fractures individuelles ont une organisation en cluster reflétant l'intersection des forages avec des zones de fractures ayant une structure interne suivant le modèle conceptuel de réseau anastomosé. Des variations importantes de l'épaisseur et de la structure interne de ces zones de fractures sont observées sur une distance de seulement 10 à 20 m. Ces variations pourraient jouer un rôle important dans le comportement hydraulique des zones de fractures en favorisant la formation de chenaux. Les espacements des zones de fractures sont d'environ 40 à 400 m. L'extension de telles structures ne peut pas être évaluée sur la base de nos données uniquement. L'étude de la microséismicité montre que ces zones peuvent s'étendre sur des distances de plusieurs centaines de mètres.

Les fractures induites en tension sont observées au-dessus de 2.2 km alors que les élargissements par fracturation et écaillage du forage ('breakouts') apparaissent au-dessous de 3.6 km. Cette répartition en profondeur des différents types de ruptures combinée avec les données recueillies lors des stimulations hydrauliques permet de caractériser l'état des contraintes à Soultz jusqu'à une profondeur de 5 km. La direction de la contrainte horizontale maximale est définie clairement par l'orientation des rupture des parois des puits et est de 169°±14°. La magnitude de la contrainte verticale est calculée en intégrant des profils de densité. Les enregistrements de la pression lors d'injections massives de fluides permettent d'estimer la magnitude de la contrainte horizontale minimale. L'analyse de la répartition des ruptures en tension et compression des parois des puits permet de borner la magnitude de la contrainte horizontale maximale. Afin de calculer les magnitudes des contraintes à partir de l'observation des fractures induites en tension, il est préalablement nécessaire de déterminer le refroidissement maximal des parois du forage lors de son percement. Ce dernier est donné par la température au trépan pendant le percement et a été estimée par des mesures en fond de trou lors du forage. Le calcul des contraintes basé sur les 'breakouts' nécessite de connaître le profil de refroidissement lors de l'acquisition des données d'imageries ainsi que la résistance en compression de la roche. Cette dernière a été obtenue par des tests en compression uniaxiale effectués dans le cadre de cette recherche. Les résultats obtenus concernant les magnitudes possibles de $SHmax$ sont en accord avec l'observation que les mécanismes au foyer des séismes induits par les stimulations hydrauliques sont de deux types : normaux et décrochants, impliquant que $SHmax = 1.0Sv$. L'utilité du résultat présenté ici est de placer des limites concernant les écarts possibles de cette égalité. Un résultat connexe de cette analyse indique que le coefficient dans la loi des contraintes effectives pour la rupture en tension doit être égal ou inférieur à 0.8.

Les hétérogénéités des contraintes ont été étudiées en examinant les écarts à la moyenne de la direction de $SHmax$. Ces variations des contraintes sont observées à toutes les échelles et suivent des lois fractales. L'étude des variations de courte longueur d'onde (<50 m) de l'orientation des fractures induites en tension là où la

distance entre les forages est de 20 m environ montre que ces variations sont généralement bien corrélées aux fractures naturelles, mais pas corrélées entre les forages. Cela suggère que les fractures sont pour la plupart pas plus longue que 40 m, en accord avec l'étude de la taille des fractures naturelles. Des variations de longue longueur d'onde sont également observées et sont principalement associées avec des zones de fractures. En effet, les deux perturbations les plus proéminentes à grande échelle coïncident avec les deux zones de fractures les plus importantes interceptées par les forages. Les fractures induites en échelon sont fréquemment orientées parallèlement aux fractures naturelles. Cette géométrie pourrait s'expliquer si le relâchement des contraintes sur les fractures naturelles est presque total, de telle sorte qu'une composante principale du tenseur des contraintes est presque perpendiculaire au plan de fracture. Les fractures en tension induites dans cette zone de perturbation des contraintes se formeraient alors sub-parallèlement aux fractures naturelles. Sous l'influence des contraintes telles que données par la caractérisation linéaire pour le site, les fractures naturelles en question seraient toutes sous un état de contraintes critique, proche de la limite de rupture. Ceci ainsi que la fréquence à laquelle cette géométrie particulière est observée suggèrent que les contraintes sur les fractures naturelles furent relâchées relativement récemment, possiblement lors du forage, en réponse à une pression élevée au niveau du trépan.

Zusammenfassung

ENHANCED Geothermal Systems (EGS, verbesserte oder stimulierte geothermale Systeme) — zunächst 'Hot Dry Rock' (HDR) genannt — ist ein Verfahren, das seit den 70iger Jahren entwickelt wurde, um die Wärme aus dem Gestein der Kontinente durch Bohrungen in erschließbarer Tiefe nutzbar zu machen. Die Herausforderung dieser Technologie liegt darin, eine Möglichkeit zu finden, Fliesswege zwischen Bohrungen derart zu entwickeln, die eine Wärmeextraktion aus der Tiefe mit einem ökonomisch vertretbaren Aufwand möglich wird. Eine erfolgversprechende Methode — die sogenannte hydraulische Stimulation — besteht darin, starke Injektionen von Flüssigkeiten in das Gebirge vorzunehmen. Diese führen zu einem Anstieg des Porendruckes im Gestein, was die Scherung von natürlich vorhandenen Klüften vorantreibt und es ermöglicht, ihre Permeabilität zu erhöhen. Die Modellierung dieses Prozesses der hydraulischen Stimulation setzt eine quantitative Kenntnis der Eigenschaften der natürlichen Bruchstrukturen und des in-situ Spannungsfeld voraus. Dies sind auch die Themen der vorliegenden Dissertation, welche im Rahmen des Soultz-sous-Forêts (Frankreich) Geothermie-Projekts im Detail untersucht wurden. In diesem Projekt soll ein geothermisches Elektrizitätswerk erstellt werden, das im Jahr 2008 seinen regulären Betrieb aufnehmen kann.

Die dieser Forschungsarbeit zugrunde liegenden Daten bestehen hauptsächlich aus akustischen Bohrlochwandbildern, die in drei tiefen Bohrlöchern bei Soultz gewonnen wurden. Eine ungewöhnliche Eigenschaft der Daten ist, daß die abgeteuften Bohrungen in einer Tiefe von bis zu 2.5 km in einem Granitabschnitt lateral weniger als 20 m voneinander entfernt sind. Diese Eigenschaft erlaubte es, auch die horizontalen Veränderungen der natürlichen Strukturen sowie des in-situ Spannungsfeldes zu untersuchen. Zwischen 2.5 km und 5 km Tiefe, wo eine Temperatur über 200°C herrscht, verbreitert sich der Abstand der Bohrungen auf bis zu 700 m.

Tausende natürlicher Strukturen sind entlang von mehr als 7 km akustischer Bohrlochwandbilder analysiert worden. Ein wichtiger Aspekt dieser Analyse war es, neue Methoden zu entwickeln, um die im Bohrloch beobachtete Klüftung für die Interpretation der Strukturen im Reservoirmaßstab (d.h. bis zu 2 km) zu nutzen. Hierbei wurden insbesondere der Kluftabstand und die Kluftgrößen in einer Tiefe von 1.4 km – 2.5 km quantitativ untersucht. Basierend auf der Raumstellung wurden vier vorherrschende Kluft-Systeme identifiziert. Diese Klüfte haben eine mittlere wahre Größe zwischen 15 und 40 m und einen Abstand, welcher dem Gesetz einer logarithmischen Normalverteilung folgt. Die mittleren Abstände liegen zwischen 1 bis 6 m. Die logarithmische Normalverteilung der Abstände ist möglicherweise ein Artefakt, wel-

cher auf eine selektive Beprobung einer tatsächlichen Potenzverteilung zurückzuführen ist. Dies steht im Zusammenhang mit der begrenzten Auflösung des akustischen Bohrloch-Televiewers. Die einzelnen Klüfte bilden Cluster, welche zu Bruchzonen gehören, die aus anastomosierenden Netzwerken von Klüften und intakten Scherlinsen bestehen. Über Distanzen von nur 10 bis 20 m finden grosse Variationen sowohl der internen Struktur wie auch der Mächtigkeit der Bruchzonen statt. Diese Variationen spielen vermutlich für das hydraulische Verhalten der Bruchzonen eine wichtige Rolle, da sie den Fluss kanalisieren. Die Abstände dieser Bruchzonen liegen zwischen 40 und 400 m. Ihre Ausdehnung kann mit dem uns vorliegenden Datensatz nicht ermittelt werden. Mikroseismische Analysen zeigen, dass diese Strukturen eine Ausdehnung von mehreren hundert Metern haben können.

Durch den Bohrvorgang induzierte Zugrisse traten nahezu kontinuierlich oberhalb einer Tiefe von 2.2 km auf, während kompressive Bohrlochrandausbrüche ('breakouts') unterhalb von 3.6 km auftraten. Dieses tiefenabhängige Bruchmuster erlaubt es, zusammen mit hydraulischen Daten von Injektionen, den Spannungszustand bei Soultz bis in eine Tiefe von 5 km zu charakterisieren. Die Richtung der maximalen horizontalen Spannung $SHmax$ beträgt 169°±14°. Der Betrag der vertikalen Spannung Sv wurde durch das Integrieren von Dichte-Logs ermittelt. Druckaufzeichnungen während massiver Fluid-Injektionen ermöglichten es, den Betrag der minimalen horizontalen Spannung $Shmin$ zu ermitteln. Dank der Beobachtung, dass Zugrisse und kompressive Bohrlochrandausbrüche in spezifischen Tiefenbereichen auftreten, konnte der Betrag der maximalen horizontalen Spannung eingegrenzt werden. Die Ableitung des in-situ Spannungsbetrags aus den Beobachtungen der Zugrisse erforderte, daß das Profil der maximalen Abkühlung der Bohrlochwand während des Bohrvorgangs ermittelt wurde. Die minimale Temperatur der Bohrlochwand wurde der Temperatur des Bohrmeißels gleichgesetzt, welche während des Bohrens gemessen wurde. Für die Eingrenzung der in-situ Spannungen aus den kompressiven Bohrlochrandausbrüchen musste das Abkühlungsprofil zur Zeit des Bohrloch-Loggings sowie die Druckfestigkeit des Gesteins ermittelt werden. Letztere wurde aus einaxialen Druckversuchen abgeleitet, die als Teil dieser Studie durchgeführt wurden. Die resultierenden Implikationen für den Betrag der maximalen Horizontalspannung unterstützen die Schlussfolgerungen aus den mikroseismischen Beobachtung, welche Herdflächenlösungen sowohl von Blattverschiebungen wie Abschiebungen ergeben und implizieren, dass die maximale Horizontalspannung der minimalen Horizontalspannung in etwa entspricht ($SHmax = 1.0Sv$). Die vorliegenden Resultate lassen sich nutzen, um obere und untere Grenzen für die zulässigen Abweichungen dieser Spannungsbeziehungen festzulegen. Eine weitere Erkenntnis der Analyse war die Folgerung, dass der Koeffizient β_T im Gestz der effektiven Zugspannung kleiner als 0.8 sein muss, und wahrscheinlich sogar wesentlich kleiner als dieser Wert ist.

Spannungs-Heterogenitäten wurde anhand von Abweichungen der lokalen Orientierung von $SHmax$ von der mittleren Richtung untersucht. Diese Spannungs-Variationen treten auf verschiedenen Maßstäben auf und folgen selbst-affinen Skal-

ierungs-Gesetzen. Die Beobachtung von Variationen der Zugrissorientierung mit kurzen Wellenlängen (<50m) in den Bohrlochabschnitten mit kleinem Abstand (20 m) zeigt, dass die Orientierung mit jener der natürlichen Klüfte korreliert, aber keine Korrelation zwischen den Bohrlöchern besteht. Dieses legt nahe, dass die Klüfte in den meisten Fällen nicht viel größer als 40 m sind, was in Übereinstimmung mit frühreren Studien der Bruchgrößen bei Soultz steht. Variationen großer Wellenlänge (> 50 m) sind in unserem Datensatz ebenfalls vorhanden. Diese werden hauptsächlich mit Bruchzonen in Verbindung gebracht. Die zwei wichtigsten großskaligen Variationen der horizontalen Hauptspannungs-Orientierung stimmen mit den zwei bedeutendsten Bruchzonen, die durch die Bohrungen angeschnitten wurden, überein. En-echelon Zugrisse, die durch Bohrvorgänge verursacht wurden, liegen oft sub-parallel zu natürlichen Klüften. Diese Geometrie der Zugrisse könnte dadurch erklärt werden, dass die natürlichen Klüfte einen großen aber nicht vollständigen Spannungsabbau erfahren haben, wodurch eine Hauptspannung fast normal auf die Kluftebene zu stehen kommt. Die Zugrisse, die sich innerhalb der durch diese Spannungsumlagerung beeinflussten Zone um den natürlichen Bruch bilden, würden folglich zu ihm sub-parallel sein. Die Frequenz mit der diese Geometrie beobachtet wurde und die Tatsache, dass alle diese natürliche Klüfte vermutlich in einem kritischen Spannungszustand sind, weist darauf hin, dass die Spannungsentlastung der natürlichen Klüfte vor verhältnismäßig kurzer Zeit, möglicherweise als Resultat des hohen Bohrlochdrucks am Bohrmeißel, stattgefunden hat.