



Geo-Forschungs-Zentrum (Potsdam)
Sektion 4.1 Dynamik der Lithosphäre

Fachbereich für Tektonik und Sedimentäre Geologie
Institut für geologische Wissenschaften (Berlin)

Erzeugung eines Analogmodells zur Simulation der hydraulischen Risserzeugung in petrothermalen Reservoiren zur Validierung von numerischen Modellen

Masterarbeit

von

Robert Gentzmann

Gutachter:

Prof. Dr. Mark Handy (FU Berlin)
Prof. Dr. Günter Zimmermann (GFZ-Potsdam)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.	4
Abstract	6
1. Einleitung.	8
2. Geothermie.	10
2.1. Geothermische Energien.	10
2.2. Oberflächennahe und tiefe Geothermie.	11
2.3. Petrothermale Systeme.	12
2.3.1. Stimulationsmethoden.	14
2.3.2. Petrothermale Nutzung	18
2.4. Tiefe Geothermie in Soultz-sous-Forêts.	19
2.4.1. Geologie und Spannungsfeld der Oberrheingrabens.	20
2.4.2. Stimulationskonzept von Soultz-sous-Forêts	22
3. Aufbau eines Analogmodells für die hydraulische Risserzeugung.	25
3.1. Grundprinzip der Analogmodellierung.	25
3.1.1. Physikalische Ähnlichkeit und Skalierung	25
3.1.2. Kontrolle und Beobachtung im Analogexperiment	26
3.2. Vorgehensweise der Analogmodellierung.	27
4. Gelatine als Analogmaterial	28
4.1. Skalierung von Gelatine als Analogmaterial für magmatische Intrusionen	28
4.2. Skalierungsgesetze für hydraulische Stimulation.	30
4.3. Skalierung von Gelatine als Analogmaterial	
für die hydraulische Risserzeugung	34
4.3.1. Beispiel von Soultz-sous-Forêts.	35

4.3.2	Skalierung von Gelatine.	36
5.	Mechanische Eigenschaften von Gelatine.	38
5.1	Festigkeit von Gelatine	38
5.2	Ermittlung des Elastizitätsmoduls von Gelatine	40
5.2.1	Literaturwerte	40
5.2.2	Berechnung aus der Bloomzahl	41
5.2.3	Ermittlung des Elastizitätsmoduls mittels Uniaxialtest	43
5.2.4	Diskussion und Vergleich.	46
5.3	Ermittlung der Risszähigkeit.	47
6.	Beobachtung: Photoelastizität.	48
6.1	Ebene Spannungszustand und der ebene Formänderungszustand.	49
6.2	Spannungsoptisches Modell: Aufbau und Funktionsweise	51
6.3	Spannungsoptische Konstante S	55
6.4	Ermittlung der spannungsoptischen Konstante S.	55
6.5	Räumliche Spannungsoptik.	59
7.	Aufbau und Vorbereitung der Versuche	61
7.1	Zusammenfassung- Kontroll und - Beobachtungsparameter.	66
8.	Pilotexperimente.	68
8.1	Durchführung	69
8.2	Beobachtungen.	72
8.2.1	Generelle Beobachtungen.	72
8.2.2	Erster Versuch (isotropes Spannungsfeld)- Referenzexperiment	75
8.2.3	Zweiter Versuch (biaxiales Spannungsfeld)-Referenzexperiment	78
8.3	Reproduzierbarkeit.	80

8.4	Interpretation.....	83
8.5	Schlussfolgerung.....	84
9.	Diskussion.....	86

Ausblick

Danksagung

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Quellenverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung

Zusammenfassung

Petrothermale Systeme wie Enhanced Geothermal Systems (EGS) oder Hot-Dry-Rock-Systems (HDR) besitzen ein enormes Potential an Energie, die in Form von Erdwärme im Gestein gespeichert ist. Da es den meist magmatischen Gesteinsverbänden an natürlicher Permeabilität mangelt, müssen petrothermale Systeme hydraulisch stimuliert werden. Um Risse zu erzeugen, die dann als Fließwege fungieren, werden unter hohem Druck Fluide in den Gesteinsverband gepresst. Mithilfe von Daten aus experimentellen Gesteinsversuchen und dem Einsatz von numerischen Modellen, kann die Ausbreitung der Risse vorhergesagt werden.

Gegenstand dieser Arbeit ist es, ein experimentelles Analogmodell zu entwickeln, in dem die hydraulische Risserzeugung in einem Analogmaterial simuliert wird. Um einen natürlichen Prozess auf ein experimentelles Modell übertragen zu können, muss eine Skalierung vorgenommen werden, siehe Hubbert (1937). Erfahrungswerte aus der Modellierung von magmatischen Intrusionen haben gezeigt, dass Gelatine als Analogmaterial geeignet ist. In dieser Arbeit wird festgestellt, ob Gelatine als Analogmaterial für die hydraulische Stimulation und Rissbildung ebenfalls geeignet ist.

Als Analogmaterial wurde Pig-Skin Gelatine 280 Bloom, mit einer Konzentration von 5 Gew% ausgewählt und mit dem Skalierungsansatz von Bunger et al. (2005) überprüft. In diesem Ansatz wird der Prozess der hydraulischen Stimulation von drei dimensionslosen, voneinander unabhängigen Parametern gesteuert. Dies sind die Viskosität des Injektionsfluides, die minimale Hauptspannungskomponente im Gebirge und das Leak-Off, das den Flüssigkeitsverlust während der Stimulation durch Porosität und Permeabilität darstellt. Für die Berechnungsschritte wurden die Materialeigenschaften der Gelatine im Labor gemessen. Als Ergebnis der Skalierung wird Gelatine nur zu gewissen Teilen als geeignet eingeschätzt. Im Analogmaterial wird die Rissausbreitung am stärksten durch die Spannungskomponente beeinflusst. Ein wesentliches Problem der Skalierung stellt jedoch die Abhängigkeit von Risszähigkeit und Elastizitätsmodul dar.

Das Analogmodell ist so konstruiert, dass man Versuche unter unterschiedlichen Spannungsbedingungen durchführen kann: isotrop indem das Probegefäß komplett befüllt wird, und biaxial indem die Gelatine an zwei Seiten sich frei bewegen kann. Über eine Spitzenapparatur ist die Injektionsrate steuerbar und der Fluiddruck messbar. Die

Änderung der internen Spannungen wird während des Versuchs mit Hilfe des photoelastischen Effekts sichtbar gemacht. Dabei zeigen farbige Linien (sog. Isochromaten) gleiche Differenzialspannungen im Material an, siehe Wolf (1961). Die photoelastische Methode ist nur im zweidimensionalen (2D) quantitativ anwendbar und gibt im dreidimensionalen (3D) allerdings einen qualitativen Eindruck der Spannungsverteilung.

Als Ergebnis der zwei Versuchsreihen hat sich gezeigt, dass im Modell die Rissausbreitung von der Form des Probekörpers und vom anliegenden Spannungsfeld abhängt.

Das Analogmodell bietet eine Vielzahl Kontroll- und Beobachtungsparametern und kann somit vielfach auf weitere Fragestellungen in Bezug zur hydraulischen Rissbildung benutzt werden.

Abstract

In enhanced geothermal systems (EGS), or "hot dry rock" geothermal plays, sufficient thermal potential is available for commercial use, but the rock generally lacks the permeability needed to transfer heat to a fluid medium which is then pumped to a heat-exchanger at the surface. Mechanically "stimulating" the rock by introducing an overpressured fluid leads to fracturing, thus increasing the effective surface area for subsurface heat exchange and providing pathways for fluid flow. Much of the research in this field is conducted by means of numerical modeling, supported by data from (experimental) rock physics.

Scaled experimental modelling of rock deformation using physically analogue materials ("analogue modelling") allows us to investigate processes in real time which are otherwise inaccessible to direct observation due to their large span of operative time and length scales, see also Hubbert (1937).

The scaling of this work is carried out according to Bunger et al. (2005). Bunger considers the problem of the propagation of a penny-shaped fracture in which a fluid is injected at a constant rate in a brittle elastic solid. The evolution of the crack with time depends on a certain amount of parameters such as the Youngs-Moduls, Fracture toughness, Stress field, leak-off, viscosity and injection rate of the fluid. By Identification of controlling parameters and derivation of dimensional parameters, Bunger presents three dimensional parameters, which are independent from each other due to viscosity, Leak-off and Stress field, see Bunger et al. (2005).

Using values for an applied hydraulic fracture-process in a HDR-System and comparing this data to the gelatin-model, we are able to define gelatin as an appropriate analogue material if the dimensional parameters are the same for granite and gelatin. As a result the stress field is the most controlling factor and both model and Process in nature are similar. In case of viscosity the similarity is not given due to the large fracture toughness of gelatin compared to the young's modulus.

The photoelastic effect was used to determine the stress distribution in the experiments. This experimental method relies on the birefringence, which persist while the material is under load. When polarized light passes through the stressed model, interference patterns known as isochromatic develop and appear as a series of distinct black or multi-colored

lines or fringes, depending for the light source. Each isochromatic represents an area of the same stress difference, depending on a certain material parameter. (Wolf, 1961)

In the final experiments a single hydraulic fracture will be generated under different types of stress (isotropic and biaxial). After that a series of multiple fractures will be generated to estimate the critical distance for interaction due to internal stress field changes.

As a result the crack's evolution is influenced by the size of the box but is also dominated by the external stress field. In the end due to a series of controlling and observable parameters the setup is changeable for other types of experiments.