



Doctoral Thesis

Evolution of permeability of natural fractures due to THMC processes in the context of CO₂-based reservoir applications

Author(s):

Grimm Lima, Marina Maria

Publication Date:

2020

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000445438> →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 27067

**EVOLUTION OF PERMEABILITY OF NATURAL
FRACTURES DUE TO THMC PROCESSES IN THE
CONTEXT OF CO₂-BASED RESERVOIR
APPLICATIONS**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

MARINA MARIA GRIMM LIMA

Dipl.-Eng. Electrical Engineering, Federal University of Bahia, Brazil
M.Sc. Petroleum Science and Engineering, University of Campinas, Brazil

Born on 23.02.1987

Citizen of Brazil

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Martin O. Saar

Dr. Xiang-Zhao Kong

Prof. Dr. Helge Hellevang

Dr. Flávia de Oliveira L. Falcão

2020

Abstract

As reserves decline and development costs increase, especially in frontier regions, understanding and preventing formation damage is crucial to guarantee the economic feasibility of exploitation of deep subsurface geological reservoirs. Formation damage is characterized by a zone of reduced permeability, potentially caused by coupled thermo-hydraulic-mechanical-chemical (THMC) processes that arise during typical operations, such as injection of fluids that are not preexisting in the reservoir, e.g., dry carbon dioxide. In this context, carbon dioxide injection can be considered as a perturbation to the presupposed equilibrated system. Injection of supercritical carbon dioxide (scCO₂) into geological reservoirs is involved in several geoenvironmental activities, such as geothermal energy extraction, hydrocarbon production, and geological CO₂ storage. In fractured-dominated reservoirs, THMC effects arising from scCO₂ injection into brine-filled formations have a high potential of impairing the reservoir permeability due to the particularities of flow through fractures. These THMC effects act in a coupled and complex manner. Despite wide research on different effects impacting reservoir permeability, there is a need to conduct further studies, especially through laboratory experiments, to determine the hydraulic conductivity of fractures under prescribed combinations of confining stress, temperature and fluid chemical imbalance.

This work focuses on fracture permeability behavior subjected to coupled THMC processes, by investigating: (1) the impact of effective normal stress on fracture absolute permeability in numerical simulations, supported by laboratory experiments, and on relative permeability curves in laboratory experiments; (2) the impact of temperature on fracture absolute permeability in laboratory experiments; and (3) the impact of mineral precipitation on fracture absolute permeability in numerical simulations. All rock specimens in this work are fractured granodiorite specimens obtained from the Grimsel Test Site (GTS), Switzerland, whose matrix has a negligible porosity. Therefore, the originality of this work lies in providing results on natural fractures submitted to coupled THMC effects, which are challenging to predict but, if the morphology of the fracture is available, the investigations potentially give valuable insights.

First, to evaluate the impact of effective normal stress, σ' , on fracture permeability, laboratory and numerical studies were performed. For the numerical studies, aperture fields of six naturally fractured specimens were first obtained under zero-stress conditions, via photogrammetric scans, and afterward under effective normal stress conditions of 2–30 MPa and temperatures of 25–400°C, by means of a contact mechanics model. Both, mechanical and hydraulic apertures decreased with an increasing σ' and temperature, and the results show that the distributions of fracture apertures have a direct impact

on the fracture permeability response. Laboratory single-phase flow-through tests conducted in a GTS fractured specimen under effective normal stress conditions of 2–15 MPa also showed decreases of fracture permeability due to increasing σ' . Additionally, laboratory tests were conducted to investigate the drying process of brine by scCO₂ injection into another GTS fractured specimen, under conditions of 5–10 MPa effective normal stresses. A novel approach was developed to delineate the evolution of brine saturation and relative permeability from measurements of fluid production and pressure gradient across the specimen. Results from the laboratory experiments revealed lower mobility of brine and higher mobility of the scCO₂ phase under higher effective normal compressive stresses. The analysis of relative permeabilities and fractional flow also suggested that higher effective normal compressive stresses increased channelling and decreased brine displacement efficiencies. Finally, lowering effective normal compressive stresses seems to hinder water evaporation.

Secondly, laboratory flow-through tests on naturally-fractured granodiorite specimens were performed to investigate the impact of temperature on fracture absolute permeability. Two specimens were subjected to a constant flow rate of deionized water and the pressure gradient across the fracture was measured, while step-wise and constant-rate changes in temperature were applied to the pressure cell. For different levels of confining stresses (20–40 MPa), the temperature varied from 25°C to 140°C, for 2 to 3 cycles, yielding decreases in hydraulic apertures of 20–75%. This decrease was more pronounced during the cycles subjected to higher confining stresses. The tests show hysteretic behavior during individual load cycles, indicating temperature path-dependent behavior of permeability. Chemical analysis of the effluent samples suggests that the decrease in fracture absolute permeability is caused by THMC processes such as thermal dilation, mechanical creep, and pressure dissolution, triggered by high temperatures.

Thirdly, to investigate the impact of mineral precipitation on fracture permeability, a novel numerical model was implemented into the MOOSE framework to simulate the injection of scCO₂ into a brine-filled heterogeneous single fracture. The numerical model captures the changes in the fracture aperture distribution due to the volume of precipitated salt, which arises from the supersaturation of brine after water evaporation into the scCO₂ stream. The simulations were carried out with aperture fields under effective normal stresses of 2–10 MPa. The results indicate impairments of fracture permeability due to mineral precipitation up to 21.98%, and larger impairments were observed for the cases of lower effective normal stresses. Interestingly, despite the experienced larger permeability reductions, lower effective normal stresses promoted lower volumes of precipitated salt, relative to the initial volume, when compared to the volumes of salt observed for higher σ' . For cases of higher effective normal stress, the salt precipitated in regions

that did not impair the permeability as much as it did for the cases of lower effective normal stresses. The simulation results demonstrate the importance of considering not only the overall reduction of the fracture volume when studying formation damage in heterogeneous fractures, but also the spatial distribution of the precipitate throughout the aperture field under the considered effective normal stress state.

To sum up, this thesis highlights the importance of fracture closure driven by increasing temperature and effective normal stress, as well as clogging by mineral precipitation, as these effects can compromise the long-term operation of enhanced geothermal systems or the operation of any reservoir where the performance depends strongly on the transmissivity of natural or stimulated fractures.

Keywords: Formation Damage · Permeability impairment · Fractures · CO₂ injection · Thermo-hydraulic-chemical-mechanical coupling · Flow-through testing · Injectivity

Zusammenfassung

Viele einfach verfügbare geologische Ressourcen der Welt neigen sich dem Ende zu. Unkonventionellere Energieträger (z. B. petrothermale geothermische Systeme) haben entsprechend höhere Erkundungs- und Erschliessungskosten. Ein entscheidender Faktor für die wirtschaftliche Förderung tiefer geologischer Ressourcen ist die Vermeidung von Formationsschäden. Man spricht von Formationsschäden, wenn es zu Permeabilitätsverlusten im Reservoir kommt. Diese Verluste können von thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemischen (THMC) Prozessen, welche typischerweise während des Betriebs eines Reservoirs auftreten, verursacht werden. Bei der Injektion von trockenem, kaltem Kohlendioxid in ein wassergesättigtes Reservoir wird beispielsweise das vorhandene chemische Gleichgewicht gestört, sodass chemische Reaktionen ausgelöst werden. Es gibt eine grosse Anzahl von Ingenieur Anwendungen im Untergrund, bei denen die Injektion von überkritischem Kohlendioxid ($scCO_2$) eine wichtige Rolle spielt z. B. geothermische Energiegewinnung, Kohlenwasserstoffproduktion und geologische CO_2 -Speicherung. In zerklüfteten Reservoirs haben THMC-Effekte, die bei der $scCO_2$ -Injektion entstehen, ein hohes Potential zur Reduktion der Permeabilität. Jedoch sind aufgrund der Ausbildung von präferenziellen Fliesspfaden in Klüften und der obengenannten komplexen und gekoppelten THMC-Prozesse die Auswirkungen schwer vorherzusagen. Trotz umfangreicher Forschungsarbeiten zum Einfluss verschiedener Effekte auf die Durchlässigkeit zerklüfteter Reservoirs besteht die Notwendigkeit, weitere Studien gestützt durch Laborexperimente durchzuführen. Hierbei sollte die Änderung der hydraulischen Durchlässigkeit von Klüften für unterschiedliche Spannungszustände, Temperatur und chemisches Ungleichgewicht untersucht werden.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Verhalten der Kluftpermeabilität bei gekoppelten THMC-Prozessen. In drei Studien wird: (1) der Einfluss der effektiven Normalspannung auf die absolute Permeabilität und die relative Permeabilitäts- Sättigungsbeziehung, (2) der Einfluss der Temperatur auf die absolute Permeabilität und (3) der Einfluss von mineralischer Ausfällung auf die absolute Permeabilität von Klüften untersucht. Hierbei werden sowohl numerische Simulationen als auch Laborexperimente herangezogen. Alle verwendeten zerklüfteten Gesteinsproben sind Granodiorite und stammen aus dem Schweizer Untergrundlabor am Grimsel (GTS). Dies erlaubt gekoppelte THMC-Prozesse in natürlichen Klüften im Labor zu untersuchen. Solche Prozesse sind normalerweise schwer zu untersuchen, da aber die Morphologie der Klüfte bekannt sind, lassen sich mit einer Kombination von numerischen Simulationen und Laborexperimente wertvolle Einblicke gewinnen.

In einer ersten Studie wurden Labor- und numerische Experimente durchgeführt, um den Einfluss der effektiven Normalspannung, σ' , auf die Kluftpermeabilität zu bewerten. Für die numerischen Experimente wurden Kluftöffnungsfelder von sechs natürlich gebrochenen Proben mittels photogrammetrischer Scans erstellt. Mit einem Modell für Kontaktmechanik wurden diese Kluftöffnungsfelder dann unter Null-Spannungsbedingungen und unter effektiven Normalspannungsbedingungen von 2-30 MPa bei Temperaturen von 25-400°C verändert. Hierbei nahmen sowohl die mechanische als auch die hydraulische Öffnungsweite mit zunehmendem σ' und Temperatur ab. Weiter zeigen die Ergebnisse, dass die Verteilungen der Kluftöffnungsweite einen direkten Einfluss auf die Änderung der Kluftpermeabilität haben. Einphasige Durchflussversuche im Labor, die an einer GTS-Kluftprobe unter effektiven Normalspannungsbedingungen von 2–15 MPa durchgeführt wurden, zeigten ebenfalls eine Abnahme der Kluftpermeabilität aufgrund eines Anstiegs von σ' . Zusätzlich wurden Laborexperimente durchgeführt, um den Trocknungsprozess der in der Kluft befindlichen Sole durch scCO_2 -Injektion bei unterschiedlicher effektiver Normalspannung zu untersuchen. Hierbei wurde ein neuartiger Ansatz entwickelt, um die Entwicklung der Sole-Sättigung und der relativen Permeabilität anhand von Messungen der Flüssigkeitsproduktion und des Druckgradienten über die Probe zu beschreiben. Die Ergebnisse aus den Laborexperimenten zeigten eine geringere Mobilität der Sole und eine höhere Mobilität der scCO_2 -Phase unter höheren effektiver Normalspannungen. Die Analyse der relativen Permeabilität und des fraktionierten Flusses deutete auch darauf hin, dass höhere effektive Normalkompressionsspannungen die Bildung präferenzierter Fließpfade erhöhen und die Effizienz der Solerdrängung verringern. Schließlich scheint die Senkung der effektiven Normalspannungen eine Wasserverdunstung zu behindern.

In einer zweiten Studie wurden Durchflussversuche im Labor an natürlich gebrochenen Granodiorit-Proben durchgeführt, um den Einfluss der Temperatur auf die absolute Permeabilität der Kluft zu untersuchen. An zwei Proben wurde eine konstante Injektionsflussrate mit entionisiertem Wasser angesetzt und dabei der Druckgradient über die Kluft gemessen. Zusätzlich wurde die Temperatur der Druckzelle schrittweise geändert. Hierbei variierte die Temperatur über 2 bis 3 Zyklen von 25°C bis 140°C, was bei verschiedenen allseitigen Umgebungsspannungen (20–40 MPa) zu einer Abnahme der absoluten Permeabilität um 20–75% führte. Diese Abnahme war während der Zyklen, die höheren allseitigen Spannungen ausgesetzt waren, stärker ausgeprägt. Die Tests zeigen ein hysteresches Verhalten während einzelner Belastungszyklen, was auf ein temperaturpfadabhängiges Verhalten der Permeabilität hinweist. Die chemische Analyse der Abflussproben legt nahe, dass die Abnahme der absoluten Kluftpermeabilität durch THMC-Prozesse wie thermische Dilatation, mechanisches Kriechen und Druckauflösung, ausgelöst durch hohe Temperaturen, verursacht wird.

In der dritten Studie wurde zur Untersuchung des Einflusses von mineralischen Ausfällungen auf die Kluftpermeabilität ein neuartiges numerisches Modell entwickelt um die Injektion von scCO_2 in eine mit Sole gefüllte heterogene Kluft zu simulieren. Das numerische Modell erfasst die Änderungen in der Verteilung der Kluftöffnungsweite aufgrund des Volumens des ausgefällten Salzes, das durch die Übersättigung der Sole nach der Wasserverdampfung in den scCO_2 -Strom entsteht. Die Simulationen wurden basierend auf Kluftöffnungsverteilung unter effektiven Normalspannungen von 2–10 MPa durchgeführt. Die Ergebnisse deuten auf eine Beeinträchtigung der Kluftpermeabilität durch mineralische Ausfällung von bis zu 21,98% hin. Die größeren Beeinträchtigungen wurden für die Fälle mit niedrigeren effektiven Normalspannungen beobachtet. Interessanterweise förderten niedrigere effektive Normalspannungen trotz der größeren Permeabilitätsreduktionen niedrigere Volumina an ausgefälltem Salz, relativ zum Ausgangsvolumen, im Vergleich zu den bei höheren σ' beobachteten Salzvolumina. In Fällen mit höheren effektiven Normalspannungen kam es vermehrt zu Salzausfällungen in Bereichen, die die Permeabilität nicht so stark beeinträchtigten. Die Simulationsergebnisse zeigten, wie wichtig es ist, bei der Untersuchung von Formationsschäden in heterogenen Klüften nicht nur die Gesamtreduktion des Kluftvolumens zu berücksichtigen, sondern auch die räumliche Verteilung des ausgefallenen Salzes im gesamten Kluftöffnungsfeld unter dem betrachteten effektiven Normalspannungszustand.

Zusammenfassend unterstreicht diese Arbeit die Bedeutung der durch Temperatur- und effektive Normalspannungserhöhungen angetriebenen Kluftschließung sowie der Verstopfung durch mineralische Ausfällung, insbesondere da diese Effekte den langfristigen Betrieb von Enhanced Geothermal Systems oder den Betrieb jedes Reservoirs, bei dem die Betriebsleistung stark von der Durchlässigkeit natürlicher oder stimulierter Klüfte abhängt, beeinträchtigen können.