

Abstract

Hydraulic fractures are driven by an internal fluid pressure exceeding the minimum compressive stress, propagating in a direction perpendicular to the latter. This class of tensile fractures has gained interest over the last fifty years due to the development of multiple engineering applications. The most-known industrial applications are well-stimulation treatments by hydraulic fracturing used in the petroleum industry to enhance the permeability of tight reservoirs. Other industrial applications include in-situ stress measurement techniques and stimulations of geothermal systems. Natural occurrences include magmatic intrusions and the ascent of geothermal fluids in subduction zones.

In sedimentary basins, the minimum compressive stress is usually horizontal and increases with depth, such that hydraulic fractures grow along vertical planes. A buoyant force emerges as the fracturing fluid is subjected to a hydrostatic pressure gradient different from the stress gradient in the solid. This buoyant force elongates the fracture in the direction of gravitational acceleration, and the propagation can become self-sustained without additional fluid released. For fluids lighter than the surrounding material, this favors an upward growth towards possibly environmentally sensitive upper aquifers. When and how such a buoyancy effect impacts three-dimensional hydraulic fracture growth remains quantitatively unexplored. It is notably unclear how the dominant energy dissipation mechanism (viscous flow or fracture creation) will affect the partition between horizontal and vertical growth.

This thesis investigates the impact of gravitational effects on the emergence, propagation, and arrest of planar three-dimensional hydraulic fractures using scaling, semi-analytical, and numerical methods. We study the process using linear elastic hydraulic fracture mechanics and consider continuous and finite volume releases from a point source. First, we analyze the behavior of finite-volume axisymmetric hydraulic fractures in the absence of buoyant forces. In impermeable media, we show that the arrested shape is independent of the release history. For a permeable solid, the arrested fracture characteristics are a function of fluid leak-off, fracture toughness, and release history. Second, we investigate buoyant hydraulic fracture propagation under continuous fluid releases in impermeable media. A family of solutions that depends on a single dimensionless number emerges. This dimensionless number combines the properties of the solid (density, elasticity, fracture resistance), the fracturing fluid (density, viscosity), and the fluid release rate. Third, we confirm that the emergence of self-sustained buoyant hydraulic fractures in impermeable media is independent of the release history. The release history governs, however, to the first order how the fracture propagation evolves (the partition between horizontal and vertical growth, ascent rate). We further demonstrate that

Abstract

fluid mass loss and stress barriers are the most efficient mechanisms to arrest buoyant fractures at depth. We additionally argue why a pulsating behavior may occur even if the fluid release is continuous.

Keywords: Hydraulic fracture, buoyant hydraulic fractures, self-sustained buoyant growth, fracture arrest, fluid leak-off, solidification of magmatic intrusion, stress barriers, fracture toughness variations, dike intrusions

Résumé

Les fractures hydrauliques sont des fractures par tension actionnées par une pression de fluide interne supérieure à la contrainte minimale de compression. Elles ont fait l'objet d'un intérêt croissant au cours des cinquante dernières années en raison du développement de multiples applications en ingénierie. Les applications industrielles les plus connues sont les traitements de stimulation de puits par fracturation hydraulique utilisés dans l'industrie pétrolière afin d'augmenter la perméabilité des réservoirs compacts. D'autres applications industrielles comprennent les techniques de mesure des contraintes in-situ et la stimulation des systèmes géothermiques. Les intrusions magmatiques et la remontée des fluides géothermiques dans les zones de subduction sont des exemples de fracturation hydraulique naturelle.

Dans le cas des bassins sédimentaires, la contrainte minimale de compression est généralement horizontale et augmente avec la profondeur, de sorte que les fractures hydrauliques se développent dans des plans verticaux. Une poussée d'Archimède émerge car le fluide de fracturation est soumis à un gradient de pression hydrostatique différent du gradient des contraintes. Cette poussée étend la fracture dans la direction de l'accélération gravitaire ce qui peut engendrer une propagation auto-entretenu sans injection supplémentaire de fluide. Pour les fluides avec une densité inférieure à la roche, la poussée d'Archimède favorise la remontée des fluides vers des aquifères supérieures, potentiellement vulnérables. La question de quand et comment les effets gravitaires influencent quantitativement la propagation des fractures hydrauliques tridimensionnelles reste ouverte. Notamment, le rôle de l'effet de dissipation d'énergie dominant (flux visqueux ou création des surfaces) sur la partition entre la croissance verticale et horizontale n'est pas encore clarifié.

Cette thèse explore les effets gravitaires pour comprendre la création, la propagation et l'arrêt des fractures hydrauliques tridimensionnelles planaires. Nous étudions le processus à l'aide de la mécanique élastique linéaire des fractures hydrauliques et en considérant des injections continues et à volume fini à partir d'une source ponctuelle. En premier, nous clarifions le comportement des fractures hydrauliques axisymétriques d'un volume fini injecté en négligeant les effets gravitaires. Pour les milieux imperméables, nous démontrons que la géométrie à l'arrêt est indépendante de l'historique d'injection. Si le solide est perméable, les caractéristiques de la fracture à l'arrêt dépendent de la perte de fluide dans l'environnement, de la ténacité, et du taux d'injections. En deuxième, nous étudions la propagation des fractures hydrauliques gouvernées par la poussée d'Archimède dans le cas d'une injection continue dans un milieu perméable. La solution est une famille de solutions dépendant d'un seul nombre adimensionnel. Ce nombre adimensionnel combine les propriétés du solide (densité,

Résumé

élasticité, ténacité), du fluide injecté (densité, viscosité), et le taux d'injections. En troisième, nous confirmons que la formation de fractures hydrauliques auto-entretenues gouvernées par la poussée d'Archimède dans des milieux imperméables est indépendante de l'historique d'injection. Ce dernier affecte toutefois la partition entre la croissance verticale et horizontale en première ordre. Nous démontrons également que la perte de fluide dans le milieu environnant, la solidification du fluide, et les barrières de contraintes sont les mécanismes les plus efficaces permettant d'arrêter les fractures gouvernées par la poussée d'Archimède et qu'un comportement pulsant peut se produire même à taux d'injection constant.

Mots-clés : Fracture hydraulique, fractures hydrauliques gouvernées par la poussée d'Archimède, propagation auto-entretenue des fractures hydrauliques gouvernées par la poussée d'Archimède, arrêt de fracture, échange de fluide avec l'environnement, solidification d'une intrusion magmatique, barrières de contraintes, variations de ténacité, intrusions de dykes

Zusammenfassung

Hydraulische Risse werden durch einen inneren Flüssigkeitsdruck, welcher die Mindestdruckspannung übersteigt, angetrieben und wachsen rechtwinklig dazu. Diese Klasse von Zugrissen hat durch die Entwicklung zahlreicher technischer Anwendungen in den letzten fünfzig Jahren kontinuierlich an Aufmerksamkeit gewonnen. Die bekannteste industrielle Anwendung ist das Einpressen von Flüssigkeiten in Bohrlöchern zur Erzeugung von hydraulischen Rissen. Diese Technik wird in der Erdölindustrie eingesetzt, um die Durchlässigkeit von dichten Lagerstätten zu erhöhen. Weitere industrielle Anwendungen sind Verfahren zur Bestimmung des Spannungsfeldes in geologischen Formationen und das Weiten und Erzeugen von Rissen zur Förderung des Wärmetransports in geothermischen Systemen. Zu den natürlichen Beispielen hydraulischer Risse gehören magmatische Intrusionen und das Aufsteigen geothermischer Flüssigkeiten in Subduktionszonen.

In Sedimentbecken ist die minimale Druckspannung in der Regel horizontal und nimmt mit der Tiefe zu, so dass sich die hydraulischen Risse in vertikalen Ebenen ausbilden. Dadurch entsteht eine Auftriebskraft, da die risstreibende Flüssigkeit einem hydrostatischen Druck ausgesetzt ist, welcher sich vom Spannungsgradienten des umschliessenden Gesteins unterscheidet. Diese Auftriebskraft zieht den Riss entlang des Gravitationsfeldes in die Länge und es kann ein selbsterhaltendes Wachstum entstehen, welches keine zusätzliche Flüssigkeitszufuhr erfordert. Bei Flüssigkeiten mit einer geringeren Dichte als die des umgebenden Materials ist dieses Wachstum aufwärtsgerichtet, so dass der Riss möglicherweise ökologisch empfindliche, höhergelegene Grundwasserleiter erreicht. Ob überhaupt und, falls ja, in wie fern, die Auftriebskraft die Ausbreitung von dreidimensionalen planaren Rissen beeinflusst, konnte bisher nicht quantitativ erörtert werden. Unter anderem ist unklar, wie der dominierende Mechanismus zur Energieumwandlung (viskose Strömung oder Rissflächenbildung) sich auf die Trennung zwischen horizontalem und vertikalem Wachstum auswirkt.

Diese Dissertation untersucht mittels dimensionaler und semi-analytischer Methoden und numerischen Simulationen die Effekte der Schwerkraft, um die Entstehung, Ausbreitung und das Anhalten von dreidimensionalen, planaren, hydraulischen Rissen zu verstehen. Wir untersuchen den Prozess mithilfe der Mechanik linear-elastischer hydraulischer Risse und betrachten dabei fortlaufende und endliche Einpressungen von Flüssigkeiten aus einer Punktquelle. Erstens klären wir das Verhalten von axialsymmetrischen hydraulischen Rissen endlichen Volumens und vernachlässigen dabei die Schwerkraft. Für undurchlässige Gesteine zeigen wir, dass die Geometrie des angehaltenen Risses nicht vom Ablauf der Einpressung abhängt. Wenn der Feststoff durchlässig ist, werden die Eigenschaften des gestoppten Risses durch den Flüssig-

Zusammenfassung

keitsabfluss in die Umgebung und die Rissfestigkeit definiert. Die genau Form hängt dabei vom Ablauf der Einpressung ab. Zweitens analysieren wir die Ausbreitung von auftriebsgetriebenen hydraulischen Rissen für ein fortlaufendes Einpressen in ein undurchlässiges Medium. Wir zeigen dabei, dass eine Lösungsfamilie in Abhängigkeit einer einzigen dimensionslosen Zahl existiert. Diese dimensionslose Zahl kombiniert die Eigenschaften des Festkörpers (Dichte, elastische Parameter, Rissfestigkeit), der Flüssigkeit (Dichte und Viskosität), und die Injektionsrate der Einpressung. Wir bestätigen drittens, dass die Entstehung von selbsterhaltenden auftriebskraftgetriebenen hydraulischen Rissen in undurchlässigem Material unabhängig vom Ablauf der Einpressung ist. Dieser dominiert jedoch das Verhalten während der auftriebsgetriebenen Ausbreitung (Teilung zwischen horizontalem und vertikalem Wachstum, Aufstiegs geschwindigkeit). Wir zeigen weiter, dass Masseverluste der treibenden Flüssigkeit und Spannungsbarrieren die wirksamsten Mechanismen sind, um auftriebsgetriebenen Risse anzuhalten. Zusätzlich legen wir Argumente dar, weshalb ein pulsierendes Wachstum auch bei einer konstanten Injektionsrate auftreten kann.

Stichworte: Hydraulische Risse, auftriebskraftgetriebene hydraulische Risse, selbsterhaltendes Wachstum von auftriebskraftgetriebene hydraulische Rissen, Anhalten von Rissen, Flüssigkeitsabfluss, Flüssigkeitsverfestigung von magmatischen Intrusionen, Spannungsbarrieren, veränderliche Rissfestigkeit, magmatische Intrusionen

Zämäfassig

Hydroulisch Risse wärde dürne innere Flüssigkeitsdruck überem Niveau vor Mindestdruckspanning atrybe u breitesech sänkrächt zu dere Mindestdruckspanning us. Die Art vo Zugrisse het dürt Entwicklig vo viune technische Awändige i dä letste füfzg Jahr geng meh Ufmerksamkeit becho. Ds Ipresser vo Flüssigkeite dürnes Bohrloch zum Erzüge vo hydraulische Risse isch di bekanntschti industrielli Awändig. Settegi Ipressige wärde vor Mineräuöuindustri gmacht zum d Durchlässigkeit vo dichte, mineräuöltragende Gschteisformation z erhöe. Angeri Awändige ir Industrie si o z mässe vom Spannigszustand im Ungergrund oder z Wyte u Ibringe vo Risse zur Förderig vor Wärmeleitig i geothermische Syschtem. Ir Natur gsehtme das Phänomen bispiuswis ir Form vo magmatische Ilagerige oder bim Ufstige vo geothermische Flüssigkeite i Subduktionszonäne.

Ds Spannigsfäud i Sedimentbecki isch i dr Regu so, das d Mindestdruckspanning horizontau isch u grösser wird, je töifer me geit. Hydraulische Risse biudesech drum ir Vertikale. So entsteht e Uftrybschraft, wüu di trybendi Flüssigkeit e hydrostatische Druck generiert wo andersch isch aus dä vom Schpannungsfäud. D Uftrybschraft zieht dr Riss i dr Richtig vom Gravitationsfäud id Längi. So chasesch es säubschterhautends Wachstum ischteue wo kes derzuetue vo meh Flüssigkeit brucht. Faus di trybendi Flüssigkeit liechter isch aus ds Gschtei rundume, wachst dr Riss gäge ufe u chönnt ökologisch sensybli Grundwasservorkomme erreiche. Öb u wie die gravitäre Effekte ds Wachstum vo so drüdimensionale Risse beinflusse, hetme noni quantitativ beschtimmt. Es isch vorauem unklar, wie dasesch d Ufteilig vor Energieumwandlig (dür zähflüssig fliessendi Flüssigkeite oder für ds Kreiere vo Oberflächine) ufts Verhältnis zwüsche horizontalem u vertikalem Wachstum uswürkt.

I dere Dokterarbeit ungersueche mir dr Ifluss vor Schwärchraft ufts Entschtah, Wachse, u Stoppe vo setigne äbenewegs wachsende, drüdimensionale hydroulisch Risse. Für ds Studierä vo dene Ablöif bruchemer d Mechanik vo linear-elastische hydroulische Risse, u luege, wiesch fortlaufendi und ändlechi Ipressige vo Flüssigkeite vomne Punkt us verhaute. Zersch vernachlässige mir d Schwärchraft u kläre, wi sech es ändlechs Volume vo ipresster Flüssigkeit verhaute. We ds Gschtei wo dripressert wird undurchlässig isch, chöimer zeige, dass d Form vom gestoppte Riss nüüt mitem Ablouf for Ipressig z tüe het. Angerersits schpiut genau dä Ablouf aber e grossi Roue faus ds Gschtei durchlässig isch. I däm Fau sis d Eigeschafte vom Materiau, vor trybende Flüssigkeit, u ihre Abfluss ids Gschtei wo di aghautnegi Form bestimme. Aus zwöits ungersueche mir Risse wo dürne stetigi Ipressig imne undurchlässige Materiau entstöh u ufttrybschrafttrybe si. Daderbi chöimer zeige, dases e ganzi Familie vo Lösige git wo dank ere Zau ohni Einheitä chöi bestimmt wärde. Die Zau setztsech us de Eigeschafte vom

Zämäfassig

Gschtei (sini Dychti, elastische Parameter, sini Rissfeschtigkei), vor trybende Flüssigkeit (sini Dychti und Viskosität), u dr Ipressrate zämä. Imne nächste Schritt chöimer bestätige, dass ds Entschtah vo seubschterhautende hydroulische Risse, tribe vo ihrer eige Uftrybschraft, nid vom Ablouf for Ipressig abhängig isch. Weme aber wot wüsse, wisech di Risse gnau bewege, de het dä Ablouf e grosse Ifluss. Mir zeige wyter, dass dr Abfluss oder ds Gfriere vor tribende Flüssigkeit oder aber Gümp im Spannigsfäud di effizientische Mechanisme si zum so Risse ufhautä. Usserdeäm chöi so uftrybschraftrybeni Risse pulsierend wachse, sogar we d'Ipressig konstant Flüssigkeit abgit.

Stichwörter: Hydroulische Riss, uftrybschraftrybene hydroulische Riss, Stoppe vo Risse, Flüssigkeitsabfluss i ds Materiau, Gfriere vo magmatische Ilagerige, Gümp im Spannigsfäud, Veränderige vor Rissfeschtigkei, magmatische Ilagerige, säubschterhautends Wachstum vo uftrybschraftrybene hydroulische Riss