



Laborversuche zur hydraulischen Risserzeugung für die Tiefengeothermie

Laboratory Tests on Hydraulic Fracturing for Deep Geothermal Energy

Philipp Siebert¹

¹ Dipl.-Ing. Philipp Siebert, Geotechnik im Bauwesen, RWTH Aachen, siebert@geotechnik.rwth-aachen.de

Zusammenfassung

In einem interdisziplinären Projektverbund arbeiten drei Institute der RWTH Aachen an einem Werkzeug zur Auslegung von HDR-Risssystemen. In der aktuellen Projektstufe wird eine numerisches Simulationstool zur Vorhersage der Geometrie von hydraulisch erzeugten Rissen entwickelt und an Laborversuchen verifiziert. Der hierfür konstruierte Versuchsstand wird die hydraulische Erzeugung von Rissen in großen Gesteinsquadern unter echt-dreiaxialen Ausgangsspannungen und die Überwachung der Rissausbreitung mittels der Analyse von akustischen Signalen ermöglichen. Während Planung und Bau des großen Versuchstands werden Vorversuche an kleineren Probekörpern durchgeführt, um Erfahrungen mit dem Hydraulic Fracturing im Labor zu gewinnen. Im Beitrag wird das Projekt beschrieben und wesentliche Grundlagen der Theorie des Hydraulic Fracturings werden erläutert. Die bisher durchgeführten Vorversuche werden beschrieben und deren Ergebnisse vorgestellt und interpretiert.

Schlüsselworte: HDR, Tiefe Geothermie, hydraulische Risserzeugung, Hydraulic Fracturing, Laborversuche

Abstract

Three institutes of the RWTH Aachen University are working together in a joint research project with the aim to provide a design tool for HDR fracture systems. At the current stage of the project a simulation tool is under development, that will be able to predict the properties of fluid driven fractures with a mesh independent code, the so called eXtended Finite Element Method (XFEM). The tool is going to be verified against hydraulic fracturing tests on laboratory scale. Therefore, a true triaxial loading frame, capable to prestress big rock specimens (300 mmx300 mmx450 mm) with up to 15 N/mm² horizontally and up to 30 N/mm² vertically, is under construction. The prestressed blocks will be fractured by injection of fluid with high pressure and Acoustic Emission (AE) analysis will be used to localize the fractures that are induced by the fluid. While this facility is build up, pretests are run to get first experiences in performing hydraulic fracturing in the laboratory. After a short introduction of the projects background and a explanation of the very basics of hydraulic fracturing theory the executed pretests are presented in this paper. We are going to begin with the main tests, when the device is built up completely. The main tests are scheduled to start in April 2013.

Keywords: HDR, deep geothermal energy, hydraulic fracturing, laboratory tests

1 Einleitung

An der RWTH Aachen arbeiten der Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen (GiB), das Institut für Applied Geophysics and Geothermal Energy (GGE) und der Lehrstuhl für computergestützte Analyse technischer Systeme (CATS) gemeinsam an einem Werkzeug zur ingenieurmäßigen Auslegung von Hot-Dry-Rock-(HDR-) Risssystemen. Beim HDR wird Fluid durch Risse in heißem Tiefengestein gepumpt und nachdem es sich dabei erwärmt hat zur Energienutzung an die Oberfläche gefördert. Die Risse wirken dabei als Wärmetauscher, über die das strömende Fluid dem Gestein Energie entziehen kann. Ziel des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Projekts (FKZ 0325167) ist, die hydraulische Risserzeugung (Hydraulic Fracturing) für die Tiefengeothermie plan- und kontrollierbarer zu machen. Dazu soll ein numerisches Werkzeug zur Simulation der Erzeugung und Stimulation von geothermischen Risssystemen entwickelt werden. Das aktuelle Projekt stellt dabei die erste

Stufe eines dreistufigen Gesamtvorhabens dar. In der bewilligten ersten Projektphase wird ein numerisches Programm zur Berechnung hydraulisch induzierter Risse entwickelt. Die Besonderheit des numerischen Ansatzes besteht in der netzunabhängigen Risssimulation durch Ansatz der Erweiterten Finite Elemente Methode (XFEM). Zur Verifizierung der Simulationen wird am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen (GiB) ein Versuchsstand geplant und erbaut. Der Versuchsaufbau wird eine reproduzierbare hydraulische Risserzeugung in großen Gesteinsquadern aus Basalt und Granit unter echt dreiaxialen Belastungsspannungen ermöglichen. Während der Planung und des Aufbaus dieses Versuchstands werden am GiB Vorversuche durchgeführt. Im Folgenden werden zunächst einige notwendige Grundlagen des Hydraulic Fracturing (HF) dargestellt. Anschließend werden die durchgeführten Vorversuche vorgestellt. An eine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse aus den Vorversuchen schließt ein Ausblick auf die geplanten Versuche an.

2 Grundlagen des Hydraulic Fracturing

2.1 Einsatz

Hydraulic Fracturing steht für die Risserzeugung durch hohen Fluiddruck. Das Verfahren stammt ursprünglich aus der Petro-Industrie und wird dort zur Ertragssteigerung bei der Erdöl- und Erdgasgewinnung eingesetzt. Als Hilfsmittel zur Gewinnung von Schiefergasen ist das Verfahren publik geworden und gegenwärtig Gegenstand kontroverser Diskussionen. Darüber hinaus wird HF auch zur Messung der Hauptspannungen im tiefen Untergrund eingesetzt. In der tiefen Geothermie wird das HF zur Schaffung ausreichender Durchlässigkeiten im heißen Zielhorizont eingesetzt. Beim HDR sollen die erzeugten Rissflächen als Wärmetauscher genutzt werden. Diese Anwendung stellt den Hintergrund des Projekts dar.

2.2 Beschreibung des HF - Prozesses

2.2.1 Allgemein

Beim HF wird in einen mit einem Packer abgetrennten Bohrlochabschnitt (s. Abb. 1, links) Fluid eingepumpt, bis der dort herrschende Innendruck so groß ist, dass das umliegende Gestein aufreißt (oder vorhandene Risse geweitet werden). Durch weiteres Einpumpen von Flüssigkeit können die Risse vergrößert werden. In Abb. 1 ist rechts die idealisierte Druckkurve einer hydraulischen Risserzeugung aufgetragen.

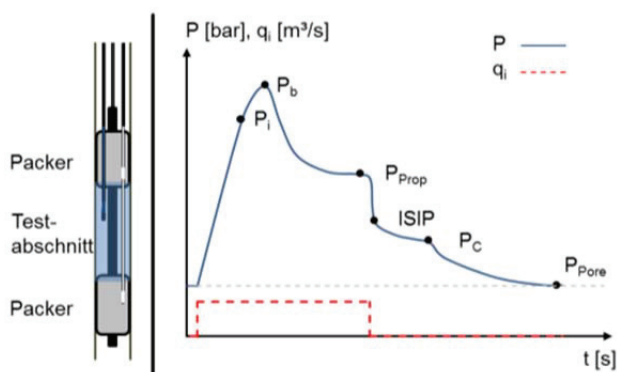


Abb. 1: Prinzip eines Doppelpackers (links); Druckkurve mit charakteristischen Druckwerten nach WEIJERS (1995) (rechts).

Fig. 1: Straddle Packer (left); Pressure curve after WEIJERS (1995) (right).

Mit Beginn der Injektion, hier mit konstanter Injektionsrate q_i , steigt der Druck im Bohrloch ausgehend vom hydrostatischen Druckniveau P_{Pore} an. Solange der Fels um das „abgepackerte“ Bohrloch intakt ist, folgt die Druckkurve einem nahezu linearen Verlauf. Infolge der steigenden Zugbeanspruchung in Richtung des Bohrlochumfangs entstehen bei einem gewissen Druck P_1 erste kleine (Mikro-)Risse im Gestein, in die das Fluid eindringen kann (WEIJERS 1995). Die Druckzunahme verlangsamt sich mit schneller wachsendem Volumen der Mikrorisse. Durch die Verzweigung der Mikrorisse entsteht der eigentliche (Makro-)Riss (ATKINSON 1989). Im Punkt des Druckmaximums P_b entspricht die Rate der Volumenzunahme des Risses der Injektionsrate, mit der Fluid eingepumpt wird. Das Bohrloch versagt und das Volumen des Risses wächst schlagartig. Die Volu-

menzunahme des Risses ist deutlich größer, als das mit der Zeit injizierte Fluidvolumen, der Druck im Bohrloch fällt stark ab. Ist der Riss auf eine gewisse Größe gewachsen und wird weiter injiziert, stellt sich ein Druckniveau ein, in dem ein stabiles Risswachstum erfolgt. Der dabei vorherrschende Druck wird als Fortschrittsdruck P_{Prop} bezeichnet. Dieser Druck ist erforderlich, um den Riss zu vergrößern. Wird die Injektion gestoppt und das System pumpenseitig geschlossen, fällt der Druck im Bohrloch schlagartig um den Betrag der Strömungswiderstände auf den sogenannten Instantaneous Shut-In Pressure (ISIP) ab. Der Druck im ruhenden Fluid in Bohrloch und Riss gleicht sich an und wird durch das Eindringen des Fluids in das Gestein abgebaut. Der Druck fällt ab und der Riss schließt bei einem Wert P_c . Im weiteren Verlauf nähert sich der Bohrlochdruck asymptotisch dem Ausgangsporendruck im Gestein P_{Pore} an.

Im Folgenden werden einige Grundlagen zur Beschreibung, der beim HF ablaufenden Prozesse kurz vorgestellt.

2.2.2 Rissentstehung und -wachstum

Die Fragen nach dem hydraulischen Druck, bei dem ein Riss entsteht und danach, wann ein Riss fortschreitet, können nur getrennt beantwortet werden (ATKINSON 1989). Ein Riss wird sich nach dem Pfad des lokalen Widerstands entwickeln. Nimmt man ein homogenes, isotropes, ideal-elastisches Material mit einer bestimmten Zugfestigkeit σ_1 an, wird sich ein Riss allein in Abhängigkeit des Spannungszustands orientieren.

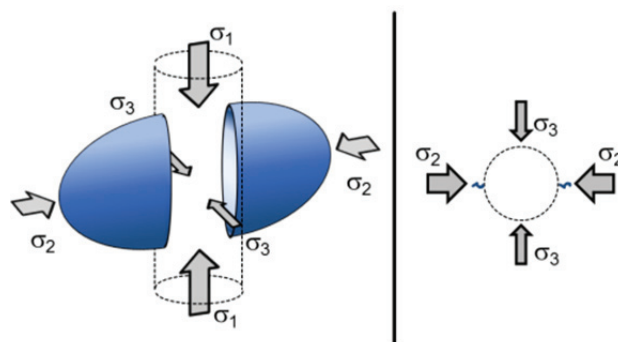


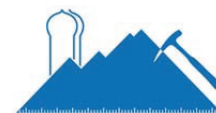
Abb. 2: Spannungen am Bohrloch mit parallelem Riss (links.); Ebene Betrachtung der Rissentstehung (rechts).

Fig. 2: Borehole stresses with a parallel fracture (left.); Plane view of the initiation of a fracture (right).

Verläuft der mit Druck beaufschlagte Bohrlochabschnitt parallel zur maximalen Hauptspannung σ_1 , kann die Rissentstehung als ebenes, durch σ_2 und σ_3 definiertes Problem betrachtet werden (s. Abb. 2, rechts). Der theoretisch erforderliche Fluiddruck zur Erzeugung eines Risses P_b ergibt sich dann nach HUBBERT & WILLIS (1957) mit der Zugfestigkeit σ_1 zu

$$P_b = 3 \cdot \sigma_3 - \sigma_2 + \sigma_1 .$$

Über die vereinfachenden Grundannahmen hinaus vernachlässigt dieser Ansatz Einflüsse aus der Porosität des Gesteins, der Injektionsrate, der Druckrate und der Fluidviskosität. Um auch den Rissfortschritt beschreiben zu können, wurden in der Vergangenheit verschiedene separate Lösungen entwickelt (s. VALKÓ & ECONOMIDES (1995)). Sie basieren auf der Betrachtung der parallel und wechselwirkend



ablaufenden Prozesse beim HF: Rissfortschritt = Trennung des Gesteins, Rissweitung = Verformung des Gesteins, Fluidströmung und Fluidverlust. Zur Lösung des Problems werden diese Prozesse über die Kontinuität gekoppelt. Den Ansätzen ist gemein, dass sie das Risswachstum in einer präferierten Ebene voraussetzen, d.h. dass der Riss in einem homogenen Material- und Spannungsbereich wächst. Entsprechend der zugrunde liegenden Rissmechanik setzen alle Ansätze das Vorhandensein eines anfänglichen Risses voraus. Der Unterschied der Ansätze besteht maßgeblich in der angenommenen Grundform des Risses. Die tatsächlichen Randbedingungen und so auch die beim HF erzeugten Risse weichen mehr oder weniger stark von den getroffenen Annahmen ab. Eins der wenigen Werkzeuge zur Überprüfung der tatsächlichen Geometrie eines Risses ist die Analyse aufgezeichneter akustischer Emissionen (AE), die durch den Prozess der Rissentstehung verursacht werden.

3 Vorversuche an Zementkörpern

3.1 Hintergrund

Die im Folgenden dargestellten Vorversuche wurden durchgeführt, um während der Planung der Hauptversuche erste praktische Erfahrungen in der hydraulischen Risserzeugung zu gewinnen. Zunächst wurden einige unbelastete Würfel aus einem Zement-Sand-Gemisch gefract. Dann wurde ein einfaches System zur dreiaxialen Belastung kleiner Probenwürfel entwickelt, um Ausgangsspannungszustände beim HF abbilden zu können.

3.2 Unbelastete Würfel

3.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Probewürfel der unbelasteten Versuche wiesen eine Kantenlänge von 20 cm auf. Sie wurden aus einem Zement-Sand-Gemisch hergestellt, dessen Rezeptur WEIJERS (1995) entnommen wurde. Dort wurde das Material bereits für zahlreiche Frac-Versuche verwendet. Die Mischung aus Zement, Feinsand und Wasser wurde in eine Schalung gegossen, mit einem Innenrüttler verdichtet und dann einen Tag in der Schalung belassen. Anschließend wurde die erstarrte Probe ausgeschalt und zum Aushärten für einen Zeitraum von ca. 28 Tagen unter Wasser gelagert. Drei Tage vor dem jeweiligen Versuch wurde die Probe aus dem Wasserbad entnommen und an der Luft getrocknet. Die mechanischen Eigenschaften des erhärteten Zement-Sand-Steins wurden in felsmechanischen Versuchen ermittelt. Die mittlere Dichte des Materials beträgt $2,1 \text{ g/cm}^3$, die Spaltzugfestigkeit beträgt im Mittel $8,2 \text{ N/mm}^2$ und der E-Modul wurde zu 13.350 N/mm^2 bestimmt.

In ein zentrisch gebohrtes, durchgehendes Loch wird dann ein Packer im Würfel positioniert. Über diesen wird während der Injektion ein 10 mm hoher Abschnitt in der Probenmitte mit Druck beaufschlagt. Zur Fixierung und Abdichtung des Packers wird das verbleibende Bohrloch ober- und unterhalb mit Kunstharz vergossen. Nach dem Aushärten des Kunstharzes wird der Probekörper an die Injektionsleitung angeschlossen und das gesamte System mit Fluid befüllt. Hier wurde ein Hydrauliköl mit einer dynamischen Viskosität von ca. 52 mPas bei $23 \text{ }^\circ\text{C}$ verwendet. Nachdem die Druckerfassung tariert und gestartet ist, beginnt mit dem

Start der Injektion durch die Spritzenpumpe das Experiment. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abb. 3 schematisch dargestellt.

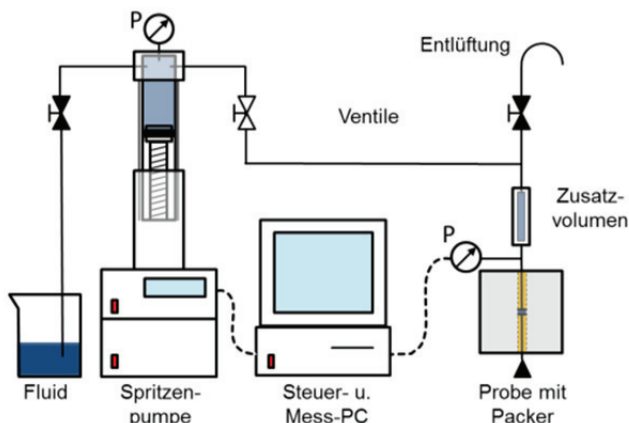


Abb. 3: Versuchsaufbau der unbelasteten Versuche.
Fig. 3: Experimental set-up for unconfined tests

Nach dem Versuch werden die Probekörper in Scheiben geschnitten und die Schnittlinien der Rissflächen eingemessen. Zunächst wurden die Probekörper Ze32, 33 und 35 geprüft. Dann wurden drei Versuche durchgeführt, bei denen in der Mitte des abgepackten Bohrlochabschnitts mit einer kleinen Trennscheibe ringsum eine 4 mm tiefe ringförmige Kerbe als Vorschädigung eingebracht wurde (Ze36, 37, 38). Die gewählte Injektionsrate betrug bei allen sechs Versuchen $q_i = 1,0 \text{ ml/min}$.

3.2.2 Versuchsergebnisse

In Tab. 1 sind die wesentlichen Vergleichswerte, der Druck bei der Rissinitiierung P_i , der Versagensdruck P_b der sechs unbelasteten Versuche zusammengestellt.

Tab. 1: Charakteristische Druckwerte der unbelasteten Versuche.
Tab. 1: Characteristic pressure values of the unconfined tests.

Versuch	Vergleichswerte	
	P_i [bar]	P_b [bar]
Ze32/33/35	114/141/138	138/157/152
Ze36/37/38	100/107/97	117/121/114

Beispielhaft ist in Abb. 4 der zeitliche Verlauf der wesentlichen Mess- und Ergebniswerte für die Versuche Ze33 und Ze38 aufgetragen. Dies sind der Druck am Bohrloch P, das verbleibende Pumpenkolbenvolumen V_{pump} , die berechnete Druckrate dP/dt und die Injektionsrate q_i . Für diese beiden Versuche ist in Abb. 5 außerdem das im Anschluss an das jeweilige Experiment aufgenommene Rissbild aufgezeigt.

3.2.3 Interpretation

Der Druckaufbau bei den Versuchen Ze33 und Ze38 beginnt langsam, da zunächst die im System verbliebene Luft komprimiert wird, bevor die inkompressiblere Flüssigkeit der Verringerung der Systemvolumens Widerstand leistet und der Druckanstieg rapide beschleunigt. Bis die Druckrate im Punkt P_i ihr Maximum erreicht, steigt der Druck fast linear an. Dann verlangsamt sich der Druckanstieg, bis die

Druckrate im Versagensdruck P_b gleich Null ist. Die Auswirkung der eingepprägten Vorschädigung beim Versuch Ze36 ist deutlich erkennbar. Der Mittelwert von P_b liegt für die Versuchsserie mit Vorschädigung rund 30 bar unterhalb des Mittelwerts P_b der Serie ohne Vorschädigung. Außerdem ist die Abweichung der Einzelergebnisse vom Mittelwert bei den Versuchen Ze36-38 deutlich geringer. Die Wiederholbarkeit der Ergebnisse wurde durch die Vorschädigung demnach verbessert.

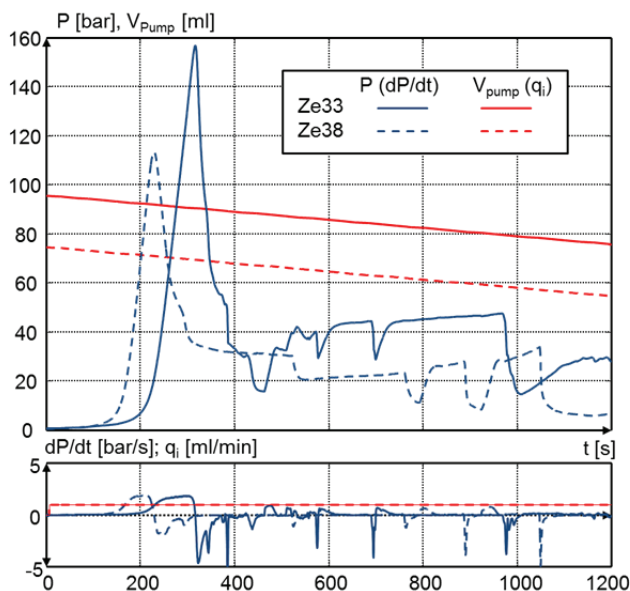


Abb. 4: Ze33 und Ze38 – Druck, Pumpenkolbenvolumen, Druckrate und Injektionsrate.

Fig. 4: Ze33 & Ze38 – Pressure, remaining piston volume, pressure rate and injection rate.

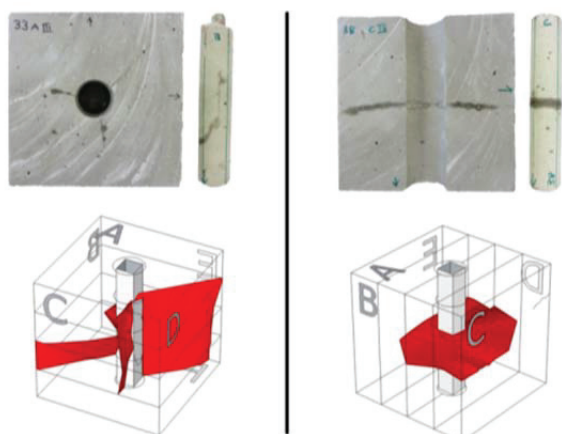


Abb.5: Rissbilder: Ze33 (links) und Ze38 (rechts) (Axmann 2012).

Fig.5: Fractures of Ze33 (left) and Ze38 (right) (AXMANN 2012).

Nachdem P_b erreicht ist, fällt der Druck ab, bis die minimale Druckrate erreicht ist. Dann nimmt die Druckrate wieder zu, der Druckabfall wird gebremst. Abweichend von der idealisierten Druckkurve, stellt sich hier aber bei keinem der Versuche ein stabiles Risswachstum ein. Stattdessen fällt die Druckrate erneut ab, der Druck sinkt wieder schneller. Als mögliche Ursache dafür wird das Austreten des Risses aus dem Probekörper vermutet. Diese Annahme konnte aber nur in einem Fall visuell bestätigt werden. Während der

Druck beim Ze33 nach dem Versagen innerhalb von knapp 200 s in kurzen Stufen auf einen Wert von ca. 16 bar abfällt, sinkt der Druck beim Versuch Ze38 deutlich langsamer auf einen Wert von ca. 21 bar bei $t = 500$ s ab. Betrachtet man die Rissbilder in Abb. 5 kann der langsamere Druckabfall beim Ze38 dadurch erklärt werden, dass nur ein großer, horizontaler Riss entstanden ist, wohingegen beim Ze33 gleich drei erkennbare Risse Fluid aufnehmen konnten.

Nach dem Erreichen der Minimalwerte steigt der Druck bei beiden Versuchen wieder an, zunächst steil und dann flacher. Erreicht der Druck einen gewissen Wert fällt er kurz und steil ab, steigt dann wieder schnell auf den Druckwert vor dem Druckabfall an und wächst von dort wieder flacher an. Dieser Vorgang wiederholt sich in beiden Versuchen und wird als schrittweises Risswachstum interpretiert. Während der Phasen des flachen Druckanstiegs wird ein Riss bei konstanter Ausbreitung geweitet. Dabei wird die Beanspruchung an der Risspitze erhöht. Wird die Risspitze ausreichend stark beansprucht, wächst der Riss um ein Stück. Das neu entstandene Rissvolumen verursacht einen kurzen, steilen Druckabfall. Anschließend wird der „verlängerte“ Riss wieder geöffnet (steiler Druckanstieg) und dann geweitet (flacher Druckanstieg) bis es zu einem erneuten Risswachstum (Druckabfall) kommt. Nach mehreren solcher Schritte ist ein Riss entstanden, der so durchlässig ist, dass der zum Durchpumpen erforderliche Druck nicht mehr weiter ansteigt und kein weiteres Risswachstum erfolgen kann. Die unbelasteten Versuche haben gezeigt, dass es schon im ersten Druckabfall nach Erreichen von P_b zum Rissaustritt kam. Es konnte kein stabiler Rissfortschritt beobachtet werden. Schlagartige Druckabfälle von P_b bis auf den atmosphärischen Druck haben in zwei Versuchen den erheblichen Einfluss von Schwindrissen verdeutlicht. Diese entstehen oberflächlich beim Abbinden des Zements und reichen bis einige Millimeter in den Beton hinein. Die normal zur Bohrlochachse eingebrachte Vorschädigung führte immer zu großflächigen, horizontalen Rissen. In direkter Bohrlochnähe wurden aber bei zwei Versuchen trotz der horizontalen Sollbruchstelle kurze vertikale Risse festgestellt. Aufgrund dieser Beobachtungen wurde beschlossen einen einfachen dreiaxialen Versuchsstand zu konstruieren AXMANN (2012), um den Einfluss von Ausgangsspannungszuständen berücksichtigen zu können und so die genannten Fehlereinflüsse zu relativieren.

3.3 Dreiaxial belastete Würfel

3.3.1 Versuchseinrichtung und -durchführung

Zur Aufbringung von dreiaxialen Ausgangsspannungszuständen werden die Probekörper in den horizontalen Richtungen mittels Gewindestangen und massiver Stahlplatten vorgespannt und in vertikaler Richtung mit Hilfe eines Prüfrahmens mit einem Hydraulikstempel belastet (s. Abb. 6). Die vertikale Belastung wird mit einer Kraftmessdose gemessen. Die horizontalen Belastungen werden mit Dehnungsmessstreifen (DMS) über die Dehnungen der vorgespannten Spannstrangen bestimmt. Aus statischen Gründen konnten nur kleinere Würfel mit einer Kantenlänge von 15 cm verwendet werden. Der fertig eingerichtete Belastungsapparat ist in Abb. 6 dargestellt.

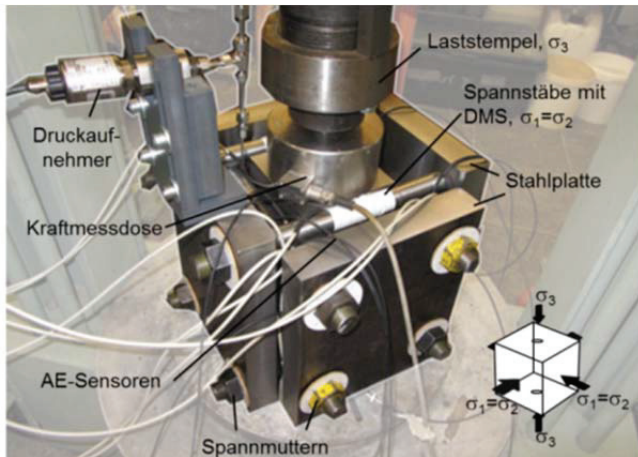


Abb. 6: Aufbau für Frac-Versuche unter dreiaxialer Belastung.
Fig. 6: Experimental set-up for triaxially loaded fracturing tests.

Die Vorbereitung der Probekörper und des Versuchs gleichen weitestgehend der bei den unbelasteten Versuchen. Zusätzlich zum oben beschriebenen Ablauf muss der Ausgangsspannungszustand aufgebracht werden. Während einiger Versuche werden von GGE akustische Emissionen (AE) gemessen, um den Rissprozess lokalisieren zu können. Dazu können bis zu 14 Sensoren an die kleinen Probekörper angekoppelt werden.

3.3.2 Versuchsbeschreibung und Ergebnisse

In Tab. 2 sind die Randbedingungen und die charakteristischen Druckwerte von sechs durchgeführten Versuchen zusammengefasst.

Tab. 2: Randbedingungen und charakteristische Druckwerte.
Tab. 2: Confining stresses an characteristic pressure values.

Versuch	Ausgangsspannung [N/mm ²]		Drücke [bar]	
	$\sigma_1 = \sigma_2$	σ_3	P_i	P_b
Ze46/48/50	9,5/9,3/8,7	4,8/5,3/4,6	226,8/219,6/162,7	237/273,2/166
Ze47/51/52	12,6/14/14	9,3/9,3/9,4	261,4/263,7/279,3	273,2/271,9/290,6

Die Versuche wurden mit einer, im Vergleich zu den unbelasteten Versuchen, geringeren Injektionsrate $q_i = 0,5$ ml/min durchgeführt. Um alleine den Einfluss des Spannungszustands untersuchen zu können, wurden keine Vorschädigungen an der Bohrlochwand eingefügt. Der Spannungszustand wurde so eingestellt, dass die präferierte Rissebene normal zur Bohrlochachse, also horizontal liegt (s. Abb. 6). Beispielhaft werden hier die Ergebnisse des Versuchs Ze46 dargestellt. Die Injektion wurde in zwei Zyklen durchgeführt. Im ersten Zyklus wurde die Injektion nach dem Überschreiten des Drucks P_b abgeschaltet und so versucht, den Initialriss am Austreten aus dem Probekörper zu hindern.

In Abb. 7 sind über der Druck- und der Druckratenkurve Punkte für jedes registrierte und lokalisierte akustische Ereignis eingetragen. In Abb. 8 (rechts) sind die berechneten Orte dieser Rissereignisse, in die y-z-Ebene (parallel zur Würfelvorderseite in den Fotos) projiziert, dargestellt. An-

hand der Farbe eines Punktes kann mit Hilfe von Abb. 7 abgelesen werden, zu welchem ungefähren Zeitpunkt das zugehörige akustische Ereignis aufgetreten ist. Nach dem Versuch wurde die Probe parallel zum Bohrloch in zwei Hälften gesägt und dann im Bereich der erkennbar induzierten Risse aufgespalten. In Abb. 8 (links) sind die dabei geöffneten Rissflächen dargestellt.

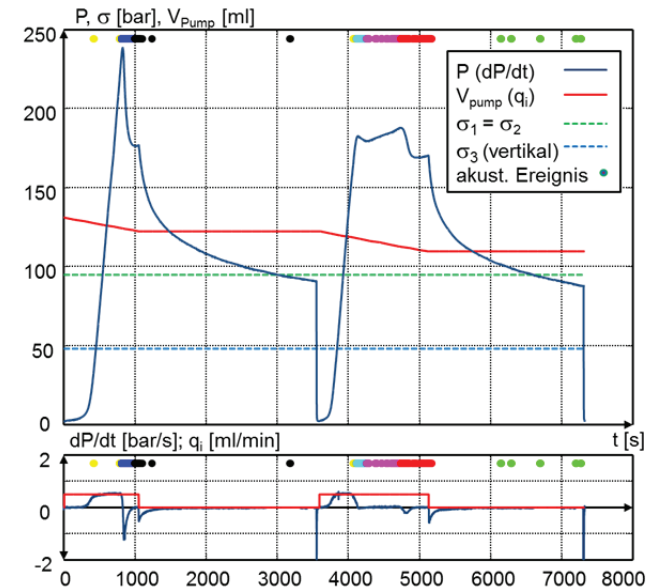


Abb. 7: Ze46 – Druck, AE-Zeitpunkte, Pumpenkolbenvolumen, äußere Belastung, Druck- und Injektionsrate.
Fig. 7: Ze46 – Pressure, AE-timepoints, remaining piston volume, stress-state, pressure and injection rate.

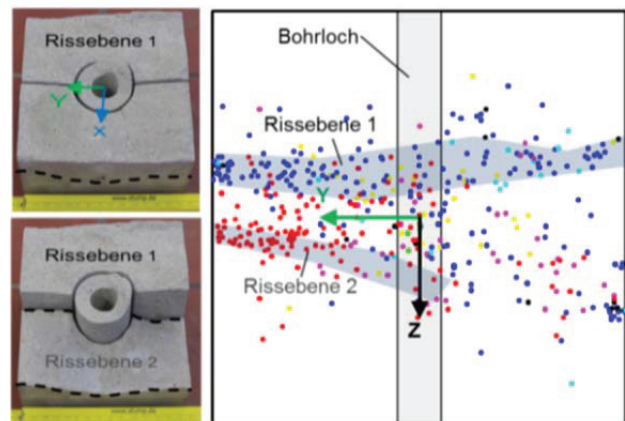


Abb. 8: Rissbild Block Ze46 (links); Projektion der lokalisierten Rissereignisse und der eingemessenen Rissebenen (rechts).
Fig. 8: Fractures of Ze46 (left); Projection of the localized AE and the measured fracture planes (right).

3.3.3 Interpretation

Der Versagensdruck liegt mit $P_b = 237$ bar deutlich höher als in den unbelasteten Versuchen. Nach dem Versagen fällt der Druck auf rund 177 bar ab und steigt kurz wieder an, bevor die Injektion gestoppt wird. Der Druck sinkt, erreicht das Niveau der minimalen Hauptspannung (blau gestrichelte Linie, Abb. 7) aber nicht. Nach 2500 s wird das System geöffnet und der Druck fällt schlagartig ab. Ein Schließen des Risses kann im Kurvenverlauf nicht erkannt werden.

Der Druckanstieg im zweiten Zyklus verläuft ähnlich wie im Zyklus 1, verlangsamt sich aber bei einem Druck knapp über 180 bar. Nach einem Abschnitt mit flacherem Druckanstieg fällt der Druck auf einen Wert von rund 170 bar ab. Nach einem kurzen erneuten Druckanstieg wurde die Injektion gestoppt und das System rund 2100 s später geöffnet.

Rissebene 1 liegt auf Höhe des oberen Packerendes und ist allseitig gleichmäßig ausgebreitet. Die Rissebene 2 setzt am unteren Packerende an und konnte beim Aufspalten des Würfels nur in einer der Hälften gefunden werden. Die projizierten lokalisierten AE stimmen gut mit den aufgefundenen Rissebenen überein (blau markierte Bereiche in Abb. 7) und geben Aufschluss über die zeitliche Ausbreitung der beiden Rissebenen. Demnach hat sich während des ersten Belastungszyklus die Ebene 1 und erst im zweiten Zyklus die Ebene 2 ausgebreitet. Die AE weisen außerdem darauf hin, dass nicht die gesamte beim Aufspalten nach dem Versuch aufgedeckte Rissebene 2 im Frac-Versuch entstanden ist, sondern nur das in Abb. 7 unten, links zu sehende Viertel. Wesentlich ist die Feststellung, dass hier ein Einfluss des eingeklebten Packers deutlich wird, da sich die Rissebenen in Höhe des Übergangs vom Packer zum Epoxidharz ausbreiten.

3.4 Fazit

Mit Hilfe der Vorversuche konnten wichtige Erkenntnisse für das Projektvorhaben gewonnen werden. Bei allen Versuchen ist davon auszugehen, dass die Hauptrisse sehr schnell nach dem Versagen bis zum Probekörperperrand gewachsen sind. Ob die in den belasteten Versuchen aufgebrauchten Spannungen und die verringerte Injektionsrate das Risswachstum wirksam bremsen konnten, kann aufgrund der kleineren Probekörper nicht bestätigt werden. In weiteren Vorversuchen soll nun zusätzlich eine hochviskose Flüssigkeit anstelle der bisherigen injiziert und das im System befindliche Fluidvolumen minimiert werden.

Vermutlich durch den eingeklebten Packer bedingt, sind in Bohrlochnähe trotz horizontaler Vorschädigung kurze vertikale Risse entstanden, die dann in Höhe der Packerenden horizontal weiterwuchsen. Eine Minimierung des Einflusses durch den Packer wird erfolgen.

In den unbelasteten Versuchen wurde der Einfluss von Schwindrissen deutlich. Bei den belasteten Versuchen kann ein Einfluss nicht ausgeschlossen werden. Zukünftige Vorversuche werden an kompakten Natursteinen wie Granit und Basalt durchgeführt.

Die ersten Ergebnisse der akustischen Messungen sind vielversprechend und helfen, die Rissausbreitung während der Injektion nachzuvollziehen. Die initiale Rissentstehung konnte in den bisherigen Versuchen nicht lokalisiert werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In einem interdisziplinären Verbundprojekt wird an der RWTH Aachen an einem Werkzeug zur Auslegung von HDR-Risssystemen geforscht. In der ersten Stufe des Vorhabens wird die hydraulische Risserzeugung gesondert betrachtet. Es wird ein numerisches Werkzeug entwickelt, das die Ausbildung von hydraulischen Rissen netzunabhängig (XFEM) simulieren kann. Das Werkzeug soll durch eigene Laborversuche verifiziert werden. In den letzten Monaten wurden erste Vorversuche durchgeführt. Diese werden im vorliegenden Paper beschrieben. Für die Hauptversuche wird am GiB der in Abb. 9 dargestellte Versuchstand geplant, gebaut und später betrieben. In diesem können Gesteinskörper ($300 \times 300 \times 450 \text{ mm}^3$) unter kontrollierten, echt dreiaxialen Spannungen gefract werden.

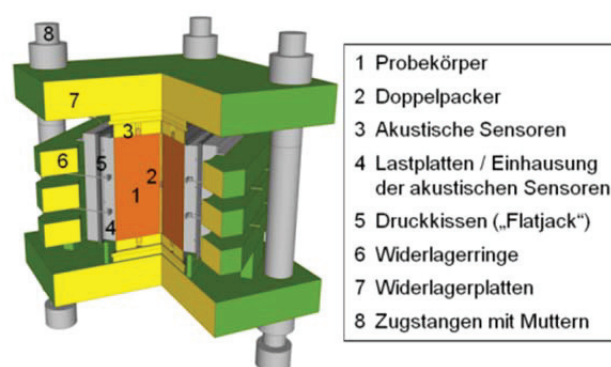


Abb. 9: Im Bau befindlicher Versuchstand für die Hauptversuche.

Fig. 9: Experimental set-up for the main tests (currently under construction).

Im Projekt sind gut 30 Versuche an großen Probekörpern aus Basalt, Granit und Gneis vorgesehen. Nach derzeitigem Stand wird der Versuchstand erstmals Ende März 2013 in Betrieb genommen. Die geplanten Versuche werden voraussichtlich bis Ende 2014 durchgeführt.

Literatur

- ATKINSON, B. (1989) : Fracture Mechanics of Rock – 534 S., London, England (Academic Press).
- AXMANN, D. (2012): Konzepte zur Auswertung von Druck-Zeit-Kurven aus Hydraulic Fracturing Laborexperimenten, Masterarbeit – Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen, RWTH Aachen, September 2012 (unveröffentlicht).
- HUBBERT, M. & WILLIS, D. (1957) : Mechanics of hydraulic fracturing – AIME, **210**: 153 – 163.
- WEIJERS, L. (1995): The Near-Wellbore Geometry of Hydraulic Fractures Initiated from Horizontal and Deviated Wells – Ph. D. Thesis, TU Delft, Niederlande, Februar 1995.
- VALKÓ, P. & ECONOMIDES, J. (1995): Hydraulic Fracture Mechanics – 320 S., Chichester, England (John Wiley & Sons).