

Gekoppelte petrophysikalisch-mechanische Laborexperimente zur porendruckabhängigen Permeabilitätsentwicklung im deviatorischen Spannungsfeld

Ute Trautwein,

GeoForschungsZentrum Potsdam, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, email: trautw@gfz-potsdam.de

Einleitung

Gewinnung geothermischer Energie in Deutschland erfordert bei normalen geothermischen Gradienten das Erbohren tiefer hydrothormaler Lagerstätten. Am Standort Groß Schönebeck untersucht das GeoForschungsZentrums im „Insitu Geothermie-Labor“ die Nutzung der Geothermie im Norddeutschen Becken (siehe HUENGES ET AL, 2002). Zielhorizont ist dort das Rotliegende in einer Tiefe von über 4000 m. In solchen Tiefen sind die hydraulischen Gesteinseigenschaften für die Förderung von Wasser von Natur aus ungünstig. Wird zudem Fluid aus einem Reservoir produziert, sinkt der Porendruck und die Effektivspannungen steigen, was zu Kompaktion und damit zu einer Verschlechterung der petrophysikalischen Eigenschaften des Reservoirs, insbesondere der Permeabilität, führt. Es ist deshalb für eine erfolgreiche Gewinnung geohydrothormaler Energie wichtig, das porendruckabhängige Spannungs-Verformungs-Verhalten der Lagerstätte und die damit verbundenen Änderungen der Permeabilität zu verstehen.

Zur Untersuchung der porendruckabhängigen Permeabilitätsentwicklung im Labor wurden in einer triaxialen Hochdruckpresse zwei verschiedene gekoppelt mechanisch-petrophysikalische Laborexperimente an Sandsteinen durchgeführt, ein triaxialer Druckversuch („single failure test“) und ein einaxialer Verformungs-Test („uniaxial strain test“). Im folgenden werden die Experimente und erste Ergebnisse vorgestellt.

Testequipment

Das triaxiale Hochdruck-Test Equipment besteht aus einer triaxialen Hochdruckpresse und einem Fluidpumpensystem zur Erzeugung von Porendruck (P_p) und Durchströmung (Q). Die Axiallast (s_1) kann bis zu 4600 kN aufgebracht werden. Manteldruck ($s_2 = s_3$) wird hydraulisch bis zu 140 MPa erzeugt. Hoch präzise Sensoren zur Messung von Axiallast (Lastzelle) und axialer sowie lateraler Verformung (Extensometer) befinden sich innerhalb der Zelle.

Das Pumpensystem besteht aus 4 Zylindern, die durch Schrittmotoren angetrieben werden. Nutzt man die Zylinder in einem paarig angeordneten Modus, kann Fluid (hier 0,1 molare NaCl-Lösung) kontinuierlich mit einem definierten Druckgradienten axial durch die Probe gepumpt und bei konstantem Durchfluß und Druckgradient die Permeabilität nach Darcy bestimmt werden. Elektroden erfassen die über der Probe abfallende Spannung, aus der Probenwiderstand, Leitfähigkeit sowie Formationsfaktor berechnet werden. Werden langsame Deformationsraten verwendet, so ist es mit diesem Aufbau möglich, während der Deformation gleichzeitig die hydraulische und elektrische Leitfähigkeit der Gesteinsprobe zu erfassen.

Für die folgenden Experimente wurden zylinderförmigen Sandsteinproben von 50 mm Durchmesser und 100 mm Länge verwendet.

Experiment 1: Triaxialer Druckversuch (single failure test)

Die Durchführung eines triaxialen Druckversuches mit dem oben beschriebenen Messaufbau liefert eine kontinuierliche Erfassung hydraulischer und elektrischer Leitfähigkeit während der Kompaktion und Auflockerung des Gesteins bis zum Bruch (Abb.1).

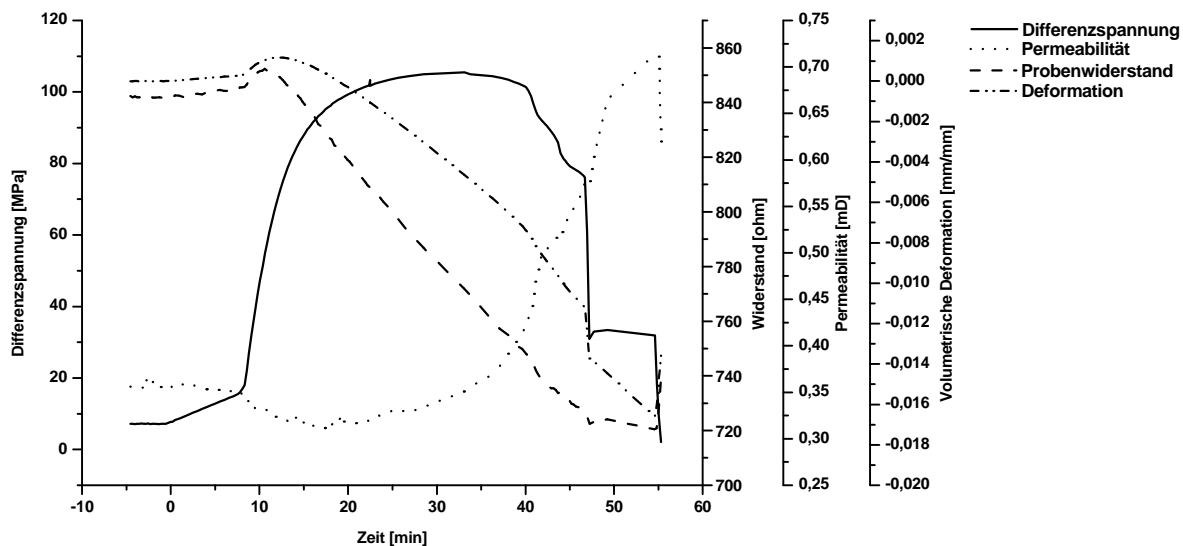


Abb.1: Bei einem „single failure test“ wird die Differenzspannung bis zum Bruch erhöht. Deformation, Permeabilität und Widerstand werden während der Deformation gemessen.

Für dieses Experiment wurde ein Buntsandstein (Friedewalder Quarzsandstein, Hessen) verwendet. Er besitzt eine Porosität von 15 % und eine Gaspermeabilität von 5 mD. Die Gesteinsprobe wird mit einem Manteldruck von 10 MPa belastet. Der Porendruck beträgt am Probeneingang 4 MPa und am Probenausgang 3 MPa. Die Axiallast wird mit konstanter Deformationsrate von $3 \cdot 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$ bis zum Versagen der Probe bei 105,5 MPa erhöht. Die volumetrische Deformation zeigt mit ihrer Zunahme die Kompaktion der Probe bis zu einer Versuchslaufzeit von 12 min an, danach setzt Dilatation ein. Die Permeabilität sinkt von 0,36 mD auf ein Minimum von 0,31 mD und steigt dann wieder auf 0,35 mD bei Maximalfestigkeit der Probe an. Der Probenwiderstand zeigt sein Maximum, das ebenfalls der maximalen Kompaktion entspricht, bei einer Versuchslaufzeit von 10,85 min, also vor dem Maximum in der Deformationskurve, und sinkt dann um 9 % vom Maximalwert bis zum Erreichen der Maximalfestigkeit der Gesteinsprobe.

Experiment 2: Einaxialer Verformungs-Versuch (uniaxial strain test)

Gewöhnlich nehmen Reservoir-Ingenieure an, dass Reservoirs bei Produktion oder Injektion einaxialen Verformungsbedingungen folgen (RUISTUEN et al., 1999). Zur experimentellen Simulation im Labor wird

deshalb häufig das sogenannte „uniaxial strain“ Modell angewendet. Dabei ist Verformung nur in eine Richtung zugelassen. Bei konstant gehaltener Querdehnung und konstanter Axiallast entsprechend kristalliner Einspannung und Überlagerungsdruck wird der Porendruck entsprechend der Produktion oder Injektion variiert. Damit verändern sich der effektive axiale und laterale Druck auf das Gestein und damit auch seine physikalischen Eigenschaften.

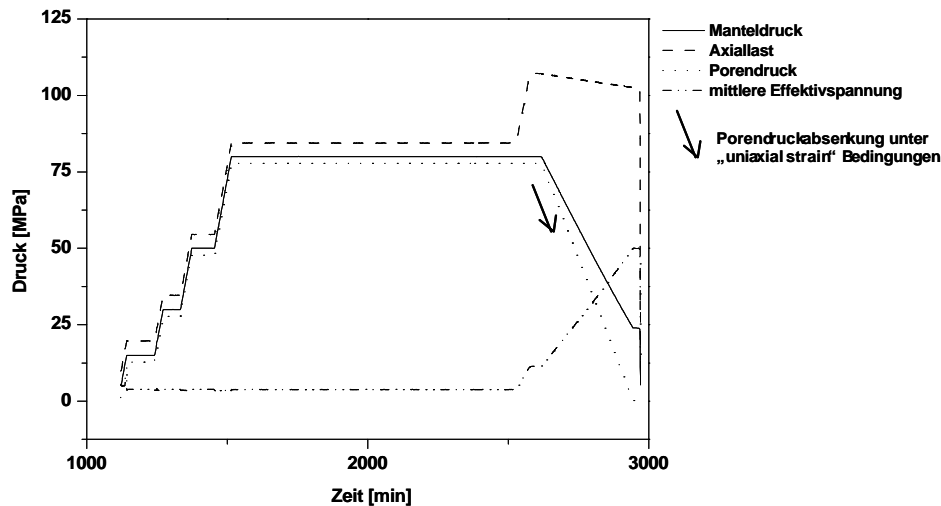


Abb.2: Ablauf des „uniaxial strain test“.

Die Gesteinsprobe wird in der Triaxialzelle stufenweise in ein angenommenes Insitu-Druckregime gebracht (Abb.2). In diesem Experiment liegt der Manteldruck bei 80 MPa und die Axiallast bei 110 MPa. Der Porendruck befindet sich nur wenig unter dem Manteldruck bei 78 MPa. Nun wird unter „uniaxial strain“ Bedingungen der Porendruck mit 0,24 ml/min auf 0,5 MPa abgesenkt. Der bei diesem Experiment verwendete Keupersandstein (Steinbruch Neuenstein, Baden-Württemberg), mit einer Porosität von 17,7 % sowie einer Permeabilität von 2 mD, zeigt folgende Ergebnisse:

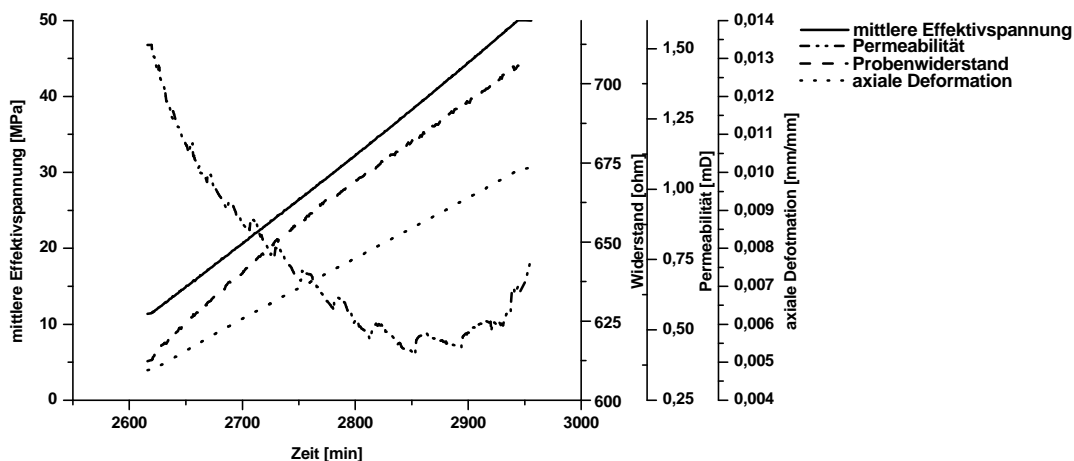


Abb.3: Entwicklung von Deformation, Permeabilität und Widerstand bei Porendruckabsenkung unter „uniaxial strain“ Bedingungen.

Um die laterale Deformation konstant zu halten, sinkt der Manteldruck passiv um 56 MPa auf 24 MPa. Durch Anstieg der deviatorischen Belastung bleibt die Axiallast auf 110 MPa. Abb.3 zeigt die mittlere Effektivspannung ($s_{\text{eff}} = (2(s_3 - P_p) + (s_{\text{eff}} - P_p))/3$) und die daraus resultierende Deformation, Permeabilität sowie den Widerstand über der Zeit. Die mittlere Effektivspannung steigt linear von 11,4 MPa auf 50,2 MPa und hat eine Verdoppelung der axiale Deformation (laterale Deformation = const.) von $4,8 \cdot 10^{-3}$ mm/mm auf $1 \cdot 10^{-2}$ mm/mm zur Folge. Die Permeabilität fällt einer polynomischen Kurve folgend von 1,5 mD auf ein Minimum von 0,45 mD bei einer Versuchslaufzeit von 2850 min und steigt danach wieder auf 0,75 mD an. Der gemessene Probenwiderstand nimmt während der Porendruckabsenkung um 15 % zu. Auffällig ist bei einer Versuchslaufzeit von 2775 min eine leichte Verringerung der Widerstandszunahme mit der Zeit. Diese Beobachtungen könnten analog Experiment 1 auf beginnende Auflockerung des Gesteins zurückzuführen sein.

Diskussion und Ausblick

Beide Experimente zeigen, dass die zeitliche Varianz der Permeabilität und des Widerstandes deutlich von der mittleren Effektivlast bzw. der deviatorischen Spannung abhängen. Bei vergleichbarer Änderung der mittleren Effektivlast ist die Permeabilitätsabnahme bei einer Belastung unter „uniaxial strain“ Bedingungen größer als bei einem triaxialen Stresspfad, da bei letzterem die deviatorische Belastung größer ist. Zunehmende deviatorische Belastung bewirkt die Öffnung von Mikrorissen, die sich bevorzugt in Richtung der größten Maximalspannung, die bei den Experimenten der Durchströmungsrichtung entspricht, ausbilden. Die Abhängigkeit der Permeabilitätsentwicklung vom Stresspfad wurde beispielsweise von KHAN & TEUFEL (2000) untersucht.

Der „single failure test“ zeigt deutlich, dass der Übergang von Kompaktion zu Dilatation zuerst in der elektrischen Messung durch ein Maximum in der Widerstandskurve detektiert wird, noch bevor er sich in der von den Extensometer gemessenen Volumenverformung zeigt. Ein Anstieg der Fließrate tritt erst wesentlich später auf. Dieses ist ein Beispiel für die Sensibilität des Probenwiderstandes auf Strukturveränderungen im Gestein. So können elektrische Messungen als Indikator für stressinduzierte Strukturveränderungen verwendet werden.

Beide Experimententypen bieten sich zur Untersuchung des porendruckabhängigen Spannungs-Verformungsverhaltens von Reservoirgesteinen im Labor an. Der Vorteil der gekoppelten Messung von mechanischen und petrophysikalischen Parametern liegt in der simultanen Erfassung von Deformation und hydraulischer sowie elektrischer Leitfähigkeit an derselben Gesteinsprobe, zur selben Zeit, in demselben Druckregime, nach derselben Behandlung. Der „uniaxial strain test“ ermöglicht zudem Aussagen über die Entwicklung eines Reservoirs bei produktions- oder injektionsinduzierten Porendruckänderungen zu treffen, da der Porendruck als einziger Parameter aktiv gesteuert wird, während sich Druckregime, Deformation, Permeabilität und Widerstand passiv einstellen.

Literatur

HUENGENS, E., HURTER, S., SAADAT, A., KÖHLER, S., AND TRAUTWEIN, U. (2002): „ The in-situ geothermal laboratory Groß Schönebeck - learning to use low permeability aquifers for geothermal power.” - Twenty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, January 28-30, 2002

KHAN, M. AND TEUFEL, L.W. (2000): “The Effect of Geological and Geomechanical Parameters on Reservoir Stress Path and Its Importance in Studying Permeability Anisotropie.” – SPE Reservoir Eval. & Eng. 3 (5), paper SPE 66184.

RUISTUEN, H., TEUFEL, L.W. AND RHETT, D.W. (1999): “Influence of Reservoir Stress Path on Deformation and Permeability of Weakly Cemented Sandstone Reservoirs.” – SPE Reservoir Eval. & Eng. 2 (3), paper SPE 56989.