

Experimental study of seismic attenuation in reservoir rocks

Doctoral Thesis

Author(s):

Subramaniyan, Shankar

Publication date:

2016

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010736536>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

ETH-Diss. No. 23456

Experimental study of seismic attenuation in reservoir rocks

DISSERTATION

submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

by

SHANKAR SUBRAMANIYAN

M.Sc. in Applied Geophysics, TU Delft, ETH Zurich, RWTH Aachen

Date of birth: 18.12.1985

Citizen of India

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Jean-Pierre Burg	ETH Zurich	Examiner
Dr. Beatriz Quintal	University of Lausanne	Co-examiner
Dr. Claudio Madonna	ETH Zurich	Co-examiner
Prof. Dr. Erik Hans Saenger	Ruhr Universität Bochum	Co-examiner
Dr. Angus Best	National Oceanography Centre Southampton	Co-examiner

2016

Summary

Seismic surveys are widely employed to study the Earth's subsurface for applications that include oil and gas exploration, monitoring of geological sequestration of CO₂ and investigation of nuclear waste disposal sites. Ideally, all aspects of the recorded seismic waves, such as amplitude, phase and frequency content could be utilized to infer information about subsurface properties such as permeability, porosity, fluid content and fracture connectivity. Attenuation of seismic waves is the fraction of energy lost due to anelastic absorption and it is known to be strongly dependent on rock/fluid properties. The physical mechanisms causing attenuation determine the relationship between attenuation and rock/fluid properties. In order to determine the predominant physical mechanisms responsible for attenuation in reservoir rocks, i.e., sandstones and carbonates, systematic laboratory studies are necessary.

Laboratory studies in the past have mostly focused on investigating attenuation in sandstones. There is a broad understanding that the high and frequency dependent attenuation observed in sandstones could be attributed to viscous fluid flow occurring in the rock at various scales. In carbonates, the controlling mechanisms are still largely unknown. Hence, more data is needed to deepen the current understanding of attenuation in fluid saturated reservoir rocks. In this thesis, I present several experimental datasets of attenuation and dispersion, acquired in the seismic frequency range (1-100 Hz). The Seismic Wave Attenuation Module (SWAM), which works on the principle of forced oscillation was employed to measure Young's modulus (E) and the corresponding attenuation ($1/Q_E$) in carbonates and sandstones at the confining pressures of 5, 10 and 15 MPa. Though these pressures may seem low when compared to the overburden pressure typical reservoirs are subjected to, since the pore pressure in the reservoir acts against the overburden pressure, the resultant pressure, i.e., the effective pressure is of the order as the confining pressure chosen in the experiments. Attenuation/dispersion was measured in rock samples under dry as well as fluid saturated conditions and mixtures of glycerin and water were used to simulate hydrocarbon oils as they are more viscous than water.

First, an overview of forced oscillation based experimental setups built in the last 30 years and used to measure attenuation in fluid saturated and/or dry reservoir rocks under small strains (10^{-8} - 10^{-5}) is presented. As technical challenges kept the forced oscillation

technique from being widely used, there is a need for the standardization of devices employing this method and a comparison of existing setups is a step towards it. A brief summary of attenuation measurements is then presented, followed by a discussion of technical aspects to be taken into account while conducting these experiments.

Second, attenuation/dispersion data in a carbonate (porosity: 15.5% and permeability: 45 mD) is presented. To assess the role of pore fluids, the carbonate was partially and fully saturated with water (viscosity: 1 cP) and fully saturated with a glycerin-water mixture (viscosity: 8 cP). Attenuation varied in the range ~ 0 -0.04 for both the dry and fluid saturated cases and increased with an increase in frequency. At any particular confining pressure, the attenuation data seemed to represent the lower flank of a bell-shaped attenuation curve, which shifted to lower frequencies as the confining pressure was increased. This is probably due to the reduction in aspect ratio of the compliant pores in the carbonate, as suggested by the squirt flow mechanism.

Third, attenuation/dispersion data in a Fontainebleau sandstone (porosity: 10%, permeability: 10 mD), including a study of the effect of sample strain on attenuation are presented. At the confining pressure of 5 MPa, the strain effect on attenuation was investigated in the sandstone for 11 different strains across the range 10^{-6} to $\sim 10^{-5}$. This comparison showed that a strain of at least 5×10^{-6} is necessary to obtain a good signal to noise ratio, while a strain as high as 8×10^{-6} can be applied on the sample without causing nonlinear effects in the rock. At all confining pressures, attenuation in the dry sandstone varied in the range ~ 0 -0.02. Partial and full saturation with water yielded a higher magnitude and frequency dependence of attenuation that can be interpreted as being caused by squirt flow.

Last, attenuation/dispersion data in a Fontainebleau sandstone (porosity: 8%, permeability: 12 mD), involving a gradual increase in the viscosity of pore fluids are presented. At all confining pressures, while the dry rock exhibited negligible attenuation, partial and full saturation with water (viscosity: 1 cP) led to attenuation values that gradually increased from nearly zero to ~ 0.02 with increasing frequency. The sample was then fully saturated with glycerin-water mixtures of varying viscosities, up to that of glycerin (8, 92, 485 and 1414 cP). At the confining pressure of 5 MPa, a bell-shaped attenuation curve peaking at ~ 6 Hz with a magnitude of ~ 0.11 was observed when the sample was fully saturated with glycerin (viscosity: 1414 cP). A decrease in viscosity of the saturating fluid shifted the attenuation curve to higher frequencies and an increase in confining pressure caused a decrease in the overall magnitude of attenuation. The data obtained for glycerin

was then compared to a simple squirt flow model with sufficient agreement, implying that squirt flow is the dominant mechanism responsible for the observed attenuation. The simple squirt flow model used is based on the assumption of a compliant crack being connected to a stiff pore, as the building block of the pore network. The corresponding rock/fluid parameters required as input for the model were derived using additional ultrasonic velocity data, acquired for the sandstone. Upon the introduction of a Gaussian distribution of aspect ratios for the compliant cracks, the squirt flow model traced the shape of the attenuation/dispersion data for full saturation with glycerin very well, with an offset in magnitude, which decreased with an increase in confining pressure.

Zusammenfassung

Seismische Messungen werden vielfach angewendet um den Erduntergrund mit Hilfe von Schallwellen zu charakterisieren. Solche Messungen kommen zum Beispiel in der Erdöl- und Erdgasexploration, für die Überwachung von geologischer CO₂-Bindung oder bei der Erforschung möglicher Endlagerstätten radioaktiver Abfälle zum Einsatz. Um möglichst viel über den Untergrund zu erfahren, wie zum Beispiel Permeabilität, Porosität, Flüssigkeitsgehalt oder die Konnektivität von Klüften, werden idealerweise sämtliche Aspekte des aufgezeichneten seismischen Wellenfelds berücksichtigt, zum Beispiel Amplitude, Phase oder Frequenzgehalt. Unelastisches Materialverhalten führt zur Abschwächung seismischer Wellenenergie. Dieser auch als seismische Dämpfung bekannte Prozess hängt stark von den Gesteins- und Flüssigkeitseigenschaften ab. Dabei spielt der physikalische Prozess, der die seismische Dämpfung hervorruft, eine zentrale Rolle. Um die vorherrschenden physikalischen Prozesse zu bestimmen, die für die seismische Dämpfung in unterschiedlichen Gesteinstypen verantwortlich sind, sind systematische Laborversuche notwendig.

Der Grossteil vergangener Laborversuche haben sich auf die seismische Dämpfung in Sandsteinen konzentriert. Folglich existiert auch ein fundiertes Wissen über die Mechanismen, die für die starke und frequenzabhängige Dämpfung in Sandsteinen verantwortlich sind. In erster Linie ist dies die Bewegung von viskosen Flüssigkeiten auf unterschiedlichen Längenskalen. Im Gegensatz dazu sind die kontrollierenden Mechanismen in Karbonatgesteinen weitgehend unbekannt. Weiterführende Laborversuche sind daher nötig um die seismische Dämpfung in flüssigkeitsgesättigten Reservoirgesteinen besser zu verstehen. In der vorliegenden Doktorarbeit präsentiere ich unterschiedliche experimentelle Datensätze über die seismische Dämpfung und Dispersion im seismischen Frequenzbereich (1-100 Hz). Dabei verwendete ich ein spezielles Labormodul (*Seismic Wave Attenuation Module*; SWAM) um das Elastizitätsmodul (E) und die entsprechende Dämpfung ($1/Q_E$) in Karbonatgesteinen und Sandsteinen zu messen. Das SWAM basiert auf dem Prinzip der erzwungenen Oszillation und die Gesteinsproben wurden einem Umgebungsdruck von 5, 10 und 15 MPa ausgesetzt. Die seismische Dämpfung und Dispersion wurde in trockenen sowie in flüssigkeitsgesättigten Gesteinen gemessen und ich

verwendete Glycerin-Wasser-Gemische um Flüssigkeiten mit einer höheren Viskosität als Wasser zu simulieren.

Die Doktorarbeit beginnt mit einem Überblick über Laborexperimente der vergangenen 30 Jahre, welche das Prinzip der erzwungenen Oszillation für seismische Dämpfungsstudien genutzt haben. Diese Experimente haben trockene und/oder flüssigkeitsgesättigte Reservoirgesteine bei kleinen Verformungen (10^{-8} - 10^{-5}) untersucht. Technische Hürden verhinderten, dass diese spezielle Labormethode im grossen Stil Verwendung fand. Umso mehr besteht ein Bedarf nach Standardisierung. Meine Vergleichsstudie der existierenden Laborgeräte ist ein erster Schritt in diese Richtung. Des Weiteren fasse ich die existierenden Datensätze über die seismische Dämpfung zusammen und diskutiere die technischen Aspekte, die es bei den jeweiligen Messungen zu berücksichtigen gilt.

Als zweites werden Labordaten zur seismischen Dämpfung und Dispersion in einem Karbonatgestein (Porosität: 15.5% und Permeabilität: 45 mD) präsentiert. Um den Einfluss von Porenflüssigkeiten zu untersuchen, wurde das Karbonat teilweise und vollständig mit Wasser (Viskosität: 1 cP) und ebenfalls vollständig mit einem Glycerin-Wasser-Gemisch (Viskosität: 8 cP) gesättigt. Die seismische Dämpfung variierte im Bereich ~ 0 -0.04 sowohl für den trockenen als auch den flüssigkeitsgesättigten Zustand. Mit erhöhtem Frequenzen nahm die seismische Dämpfung leicht zu. Bei jedem beliebigen Umgebungsdruck repräsentierten die Dämpfungsdaten die auslaufende Flanke einer glockenförmigen Dämpfungskurve, welche sich zu niedrigeren Frequenzen verschiebt wenn der Umgebungsdruck erhöht wird. Dies ist vermutlich auf die Reduzierung des Länge-Breite Verhältnisses der Mikrobrüche im Karbonate zurückzuführen, wie es der *squirt flow* Mechanismus vorhersagt.

Als drittes werden Labordaten zur seismischen Dämpfung und Dispersion im Fontainebleau Sandstein (Porosität: 10% und Permeabilität: 10 mD) präsentiert. Ferner wurde untersucht ob und wie sich die seismische Dämpfung bei unterschiedlichen Verformungsintensitäten verändert. Dieser Verformungseffekt im Sandstein wurde bei 5 MPa Umgebungsdruck und 11 verschiedene Verformungsintensitäten zwischen 10^{-6} und $\sim 10^{-5}$ untersucht. Ein Vergleich zeigt, dass eine Verformung von mindestens 5×10^{-6} nötig ist um ein gutes Verhältnis von Nutz- zu Rauschsignal zu erzielen. Zudem kann eine Verformung von bis zu 8×10^{-6} angesetzt werden ohne dabei eine permanente Deformation der Gesteinsprobe hervorzurufen. Im trockenen Zustand variierte die seismische Dämpfung bei allen Umgebungsdrücken im Bereich ~ 0 -0.02 ohne erkennbare Frequenzabhängigkeit.

Eine teilweise oder vollständige Sättigung des Porenraums mit Wasser ergab eine höhere Magnitude sowie Frequenzabhängigkeit der seismischen Dämpfung, welches durch das *squirt flow* Model erklärt werden kann.

Zuletzt präsentiere ich weitere Labordaten über die seismische Dämpfung und Dispersion in Fontainebleau Sandstein (Porosität: 8%; Permeabilität: 12 mD) und untersuche den Einfluss der Viskosität der Porenflüssigkeit. Im trockenen Zustand war die seismische Dämpfung vernachlässigbar. Im teilweise oder vollständig mit Wasser (Viskosität: 1 cP) gesättigten Zustand jedoch nahm die seismische Dämpfung mit ansteigender Frequenz von nahezu Null bis ~ 0.02 zu, und dies bei allen Umgebungsdrücken. Anschliessend sättigte ich die Gesteinsprobe vollständig mit einem Glycerin-Wasser-Gemisch mit unterschiedlichen Viskositäten (8, 92, 485 und 1414 cP). Bei einer vollständigen Sättigung mit Glycerin (Viskosität: 1414 cP) und einem Umgebungsdruck von 5 MPa beschrieben die seismischen Dämpfungsdaten eine frequenzabhängige Glockenkurve mit einem Maximalwert von ~ 0.11 bei ~ 6 Hz. Eine Erniedrigung der Viskosität der Porenflüssigkeit führte dazu, dass sich die Glockenkurve zu höheren Frequenzen verschiebt. Eine Erhöhung des Umgebungsdrucks verringerte hingegen die Magnitude der seismischen Dämpfung. Für das Experiment mit reinem Glycerin verglich ich die experimentellen Daten mit einem einfachen physikalischen Modell (*squirt flow* Modell). Die gute Übereinstimmung deutet darauf hin, dass bei den gegebenen Parametern die seismische Dämpfung durch squirt-flow dominiert wird. Das verwendete physikalische Modell nimmt an, dass der Grundbaustein des Porennetzwerks aus einem leicht komprimierbaren Riss besteht, der mit einer weniger leicht komprimierbaren Gesteinspore verbunden ist. Dabei wurde für das Seitenverhältnis des Risses eine Gaussverteilung angenommen. In zusätzlichen Ultraschall-Experimenten an Fontainebleau Sandsteinproben bestimmte ich die nötigen Gesteins- und Flüssigkeitsparameter, die dem Modell zugrunde liegen. Das so generierte squirt-flow Modell bildet die frequenzabhängige seismische Dämpfungs- und Dispersionskurve für den vollständig mit Glycerin gesättigten Sandstein sehr gut ab. Einzig ein kleiner Unterschied in der Magnitude existiert zwischen dem Modell und den Daten, welcher jedoch mit zunehmendem Umgebungsdruck abnimmt.