

Laboratory measurements of seismic attenuation and computation of elastic moduli of reservoir rocks

Doctoral Thesis

Author(s):

Madonna, Claudio

Publication date:

2012

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007606672>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NO. 20709

**LABORATORY MEASUREMENTS OF SEISMIC
ATTENUATION AND COMPUTATION OF ELASTIC
MODULI OF RESERVOIR ROCKS**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

CLAUDIO MADONNA
MSc ETH in Earth Sciences

born 17.02.1983

citizen of
Centovalli (TI)

Accepted on the recommendation of

| | | |
|----------------------------|------------------------|-------------|
| Prof. Dr. Jean-Pierre Burg | ETH Zurich | Examiner |
| PD Dr. Erik H. Saenger | ETH Zurich / FU Berlin | Co-examiner |
| Prof. Dr. Yves Guéguen | ENS Paris | Co-examiner |

2012

Abstract

Seismic velocities are sensitive to pore fluids and pore shapes. Thus, seismic attributes can provide qualitative and quantitative information on underground structures and processes. Among these attributes, seismic attenuation can be valuable to identify the pore fluid type and to monitor sub-surface reservoir processes. There is currently an enormous lack of attenuation data for many lithologies under various physical conditions and dramatic ambiguity on theories explaining attenuation mechanisms and velocity dispersion. Laboratory experiments are required to close the data gap and validate theories. One goal of this research was to create a laboratory apparatus to understand attenuation with respect to rock type, anisotropy, fluid type and fluid saturation. The Seismic Wave Attenuation Module (SWAM) was developed to experimentally measure the attenuation in extensional-mode (Q_E^{-1}) and the Young's modulus inside a pressure rig (Paterson). The sub-resonance method was employed to measure attenuation in the seismic frequency range. It allows performing measurements at low strain magnitudes ($\epsilon < 10^{-6}$) for which the rock behaves as a Linear Time Invariant (LTI) system. A series of measurements on different materials in a dry condition saturated with different fluids is presented. Berea sandstone, Fontainebleau sandstone, Crab Orchard sandstone and shale rocks were tested.

Many theories postulate that the pore shapes influence attenuation and the effective elastic properties of rocks. Hence, the second goal of the thesis was to combine images from micro-computed tomography with elastic-wave propagation modeling to estimate the elastic properties of a rock. This study describes how digital rock physics compares with laboratory experiments. Pressure-dependent ultrasonic velocities and the pore size distribution were also experimentally measured. The effective elastic properties resulting from numerical simulations based on micro-computed tomography images were systematically stiffer than laboratory measurements. Because tomographic images do not resolve the small-scale pore and crack network of the sample, we hypothesize that the numerical over-prediction is due to the smallest pores and grain-to-grain contacts invisible in the images. A method that uses laboratory measurements in conjunction with numeri-

cal simulations to overcome these restrictions is presented. Grain-to-grain contacts are thereby included in the computation as a separate segmented phase. Linearly varying the contact moduli, $M_{contacts}$ and $G_{contacts}$, in the numerical simulation leads to a non-linear outcome of the effective elastic moduli. Similarly, a linear change in confining pressure of laboratory experiments produces a non-linear increase of the measured velocities. As a result, pressure-dependent effective moduli using micro tomographic images can be predicted.

Finally, ultra-high resolution three-dimensional digital volumes of rock microstructures are presented for four rock types: Berea sandstone, Fontainebleau sandstone, dolomite and calcite-dolomite. These represent a new database that can be used for future digital rock experiments.

A laboratory tool to investigate seismic attenuation was designed and constructed so that further investigations are now possible at ETH Zurich. A new workflow in the Digital Rock physic frame was presented. A calibration technique to numerically predict pressure-dependent velocities for a rock sample is proposed. The calibration provides a starting point for further dynamic simulations of wave propagation in solid media. X-ray tomography images are described and provided to the scientific community to incentivize the integration of X-ray tomography images in the rock physics workflow.

Zusammenfassung

Seismische Geschwindigkeiten werden leicht von Porenfluiden und der Form der Gesteinsporen beeinflusst. Deshalb können seismische Merkmale qualitative und quantitative Informationen über Strukturen und Prozesse im Untergrund liefern. Als eines dieser Merkmale kann insbesondere die seismische Dämpfung dazu beitragen, die Art des Porenfluids zu bestimmen und Prozesse in unterirdischen Reservoirs zu überwachen. Zur Zeit gibt es nur spärliche Daten über die seismische Dämpfung von verschiedenen Gesteinstypen unter verschiedenen physikalischen Bedingungen und es herrscht Uneinigkeit bezüglich der Theorien, die die Mechanismen der Dämpfung und die Dispersion von seismischen Wellengeschwindigkeiten erklären. Um diese Lücke zu schliessen und die Theorien zu überprüfen, benötigt es Laborexperimente. Ein Ziel der präsentierten Forschungsarbeit war es, eine Maschine zu bauen, um Dämpfung in Abhängigkeit vom Gesteinstyp, der Anisotropie, der Art des Fluids und der Sättigung zu untersuchen. Um Dämpfung in Extension (Q_E^{-1}) und das Young's Modul innerhalb einer Druck-Kammer (Patterson rig) zu messen, wurde ein Seismisches-Wellen-Dämpfungs-System (Seismic Wave Attenuation Module - SWAM) entwickelt. Um Dämpfung im Bereich seismischer Frequenzen zu messen wurde die Sub-Resonanz Methode angewandt. Diese erlaubt, Messungen unter geringer Verformung ($\epsilon < 10^{-6}$) durchzuführen, wodurch sich das Gestein als ein lineares zeitunabhängiges System verhält. Messungen unter trockenen Bedingungen an verschiedenen Materialien, saturiert mit verschiedenen Fluiden, werden aufgezeigt. Getestet wurden Berea Sandstein, Fontainebleau Sandstein, Crab Orchard Sandstein und Schiefer.

Viele Theorien besagen, dass die Form der Poren die Dämpfung und die effektiven elastischen Eigenschaften von Gesteinen beeinflussen. Ein zweites Ziel dieser Arbeit war es daher Mikro-Computertomographie-Bilder mit Modellen zur elastischen Wellenausbreitung zu kombinieren, um die elastischen Eigenschaften eines Gesteins zu bestimmen. Diese Studie beschreibt, wie sich digitale Gesteinsphysik zu Laborexperimenten verhält. Ausserdem wurden die druckabhängigen Ultraschall-Geschwindigkeiten und die Verteilung der Porengrößen experimentell bestimmt. Die effektiven elastischen Eigen-

schaften, die aus den numerischen Simulationen, basierend auf Computertomographie-Bildern, hervor gingen, waren systematisch steifer als die Labormessungen. Da tomographische Bilder die kleinskaligen Poren und Rissnetzwerke nicht auflösen, nehmen wir an, dass die numerische Überbewertung aus den, in den Bildern nicht sichtbaren, kleinsten Poren und Korn-Korn-Kontakten resultiert. Eine Methode wird aufgezeigt, die Labormessungen mit numerischen Simulationen kombiniert und diese Einschränkungen beseitigen kann. Dabei werden Korn-Korn-Kontakte als zusätzlich unterschiedene Phase in die Berechnungen miteinbezogen. Variiert man in den numerischen Simulationen die Kontakt-Moduli, $M_{Kontakte}$ und $G_{Kontakte}$, linear, resultieren nicht-lineare effektive elastische Moduli. Ähnlich führt auch eine lineare Änderung des Umgebungsdruckes der Laborexperimente zu einer nicht-linearen Zunahme der gemessenen Geschwindigkeiten. Daraus folgt, dass druckabhängige effektive Moduli mit Hilfe von Mikrotomographie-Bildern vorhergesagt werden können.

Schliesslich werden digitale, ultra-hochauflösende 3D Volumen von Mikrostrukturen für vier Gesteinstypen aufgeführt: Berea Sandstein, Fontainebleau Sandstein, Dolomit und Kalzit-Dolomit. Diese stellen eine Datenbank dar, die für zukünftige digitale Gesteinsexperimente verwendet werden kann.

Ein Laborwerkzeug, um seismische Dämpfung zu messen, wurde entworfen und hergestellt. Dies ermöglicht nun weitere Untersuchungen an der ETH Zürich. Ausserdem wurde eine neue Vorgehensweise in der digitalen Gesteinsphysik vorgestellt. Numerisch vorhergesagte druckabhängige Geschwindigkeiten innerhalb von Gesteinsproben können kalibriert werden. Diese Kalibrierung stellt einen Anfangspunkt dar, um weitere dynamische Simulationen zur Wellenausbreitung in festen Medien durchzuführen. Die beschriebenen Röntgenstrahlen-Tomographie-Bilder sind für die wissenschaftliche Gemeinschaft bereitgestellt, um die Integration von solchen Bildern in die Gesteinsphysik voranzutreiben.

Riassunto

Le velocità sismiche sono sensibili ai fluidi contenuti nei pori e alla morfologia dei pori stessi. Per questo motivo gli attributi sismici forniscono informazioni quantitative e qualitative sulle strutture e sui processi sotto la superficie terrestre. Uno di questi attributi è l'attenuazione sismica, che può essere utile per identificare il tipo di fluido presente nei pori e per monitorare i processi nelle rocce serbatoio (reservoir). Al momento i dati sull'attenuazione per le diverse litologie a diverse condizioni fisiche sono scarsi e le teorie che spiegano i meccanismi di attenuazione e la dispersione in velocità sono estremamente ambigue. Per colmare questo divario e convalidare le differenti teorie sono necessari esperimenti in laboratorio.

Uno degli obiettivi di questa ricerca è stato la realizzazione di un apparecchio da laboratorio per studiare l'attenuazione in funzione del tipo di roccia, dell'anisotropia, del tipo di fluido permeante e del grado di saturazione dei campioni. Il "Seismic Wave Attenuation Module" (SWAM, Modulo di Attenuazione Sismica dell'Onda) è stato sviluppato per misurare sperimentalmente l'attenuazione in regime estensionale e il modulo di Young all'interno di un'autoclave di tipo Paterson (Paterson rig). Il metodo di *sub-resonance* è stato utilizzato per misurare l'attenuazione nella gamma delle frequenze sismiche. Esso permette di eseguire misurazioni per piccole deformazioni ($\epsilon < 10^{-6}$) dove la roccia si comporta come un sistema lineare invariato nel tempo. Nella ricerca sono state compiute misure su argilliti e su diversi tipi di arenarie standard (Berea, di Fointainbleau, e di Crab Orchard), portate a diversi gradi di saturazione con fluidi diversi.

Molte teorie indicano che la morfologia dei pori influenza l'attenuazione e le proprietà effettive delle rocce. Il secondo scopo della tesi è stato dunque di combinare immagini acquisite tramite tecniche di micro-tomografia (micro-CT) con simulazioni di propagazione delle onde elastiche, per stimare le proprietà elastiche di una roccia. Questa ricerca mette in relazione la fisica digitale delle rocce (Digital Rock Physics) con gli esperimenti in laboratorio. Sono state misurate sperimentalmente le velocità ultrasoniche in funzione della pressione confinante e della distribuzione della dimensione dei pori. Le effettive proprietà elastiche calcolate tramite simulazioni numeriche basate su immagini da micro-

CT sono risultate sistematicamente più rigide delle misurazioni in laboratorio. Dato che le immagini tomografiche non sono in grado di rilevare i pori e il reticolo di fessure al di sotto di una specifica dimensione limite, abbiamo ipotizzato che la sopravvalutazione numerica è dovuta ai pori più piccoli e ai contatti tra i grani non visibili nelle immagini. Per ridurre queste limitazioni viene presentato un metodo che usa esperimenti in laboratorio combinati con simulazioni numeriche. I contatti tra i grani vengono inclusi nel modello matematico come un'ulteriore fase distinta. Variando linearmente i moduli di contatto, $M_{contatti}$ e $G_{contatti}$, nella simulazione numerica si genera un effetto non lineare degli effettivi moduli elastici. In maniera analoga un cambiamento lineare della pressione confinante degli esperimenti in laboratorio genera un aumento non lineare delle velocità misurate. Da ciò risulta che i moduli effettivi dipendenti dalla pressione possono essere previsti usando immagini micro-tomografiche.

Infine vengono presentati dei volumi di microstrutture di quattro tipi di roccia a ultra-alta risoluzione a tre dimensioni: arenaria di Berea, arenaria di Fontainbleu, dolomite e calcite-dolomite. Questi rappresentano una nuova banca dati che può essere usata per futuri esperimenti digitali sulle rocce.

È stato progettato e costruito uno strumento da laboratorio per misurare l'attenuazione sismica rendendo possibili ulteriori misurazioni al politecnico di Zurigo. Inoltre è stata presentata una nuova procedura nell'ambito della fisica digitale delle rocce. Nella ricerca viene anche proposta una tecnica di calibrazione per prevedere numericamente le velocità in funzione della pressione per il campione di roccia considerato. La calibrazione rappresenta un punto di partenza per ulteriori simulazioni dinamiche di propagazione delle onde in campioni solidi. Inoltre sono state descritte delle immagini tomografiche a raggi X, che vengono messe a disposizione della comunità scientifica per far avanzare l'integrazione delle immagini tomografiche a raggi X nell'ambito della fisica delle rocce.