



Doctoral Thesis

Physical anisotropies in deformed carbonate rocks

Author(s):

Almqvist, Bjarne S.G.

Publication Date:

2010

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006264311> →

Rights / License:

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

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 19068

**PHYSICAL ANISOTROPIES IN DEFORMED
CARBONATE ROCKS**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

BJARNE S. G. ALMQVIST

M.Sc. Geology, Lakehead University, Canada

Born October 29, 1978

Citizen of Sweden

Prof. Dr. A. M. Hirt, examiner

Prof. Dr. A. Jackson, co-examiner

PD. Dr. M. Herwegh, co-examiner

Prof. Dr. D. Mainprice, co-examiner

2010

Abstract

Carbonate rocks make up ~10 % of the sedimentary rocks on Earth. In crustal deformation they play an important role because of their mechanical weakness relative to other crustal lithologies, and they often accommodate localized tectonic strain along narrow zones. Calcite deformation processes gives rise to crystallographic preferred orientation (CPO) and deformation-related microstructures, which impart anisotropy on physical properties. From another viewpoint knowing physical anisotropies provides information on CPO and microstructure development. This thesis addresses magnetic and elastic properties for deformed carbonate rocks, with emphasis on determining the origin of anisotropy for these properties. It further establishes the relationship that exists between the physical anisotropies themselves together with CPO and deformation. For this purpose the physical anisotropies are studied in 1) naturally deformed carbonates from the Morcles nappe, and 2) deformed synthetic aggregates of calcite and muscovite.

The Morcles nappe is a recumbent fold located in southwest Switzerland, which was emplaced as the basal structure in the Helvetic Nappe stack. Along the base of the nappe, i.e., overturned limb, the sedimentary layers have been intensely elongated and thinned, as part of a large scale shear zone. In contrast, the deformation of the normal and outer limbs of the fold is much less. The matrix mineral is calcite and the second-phase mineral content varies from < 1 vol% to 40 vol%, depending on lithology.

Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) is measured using low- and high-field techniques, at room temperature and 77 K. The combination of techniques allow for separation of ferrimagnetic, paramagnetic and diamagnetic subfabrics, providing results that can be directly related to the petrofabric. The separation is generally successful for samples containing all three subfabrics, and is very reliable when the rock has a simple mineral composition. Fe^{2+} , substituting for Ca^{2+} in the calcite crystal lattice, is prevalent throughout the shear zone and has a large influence on bulk susceptibility and the magnetic anisotropy. A quantitative relationship is established among the amount of Fe^{2+} , CPO and AMS.

The elastic properties were measured and predicted for consolidated synthetic mixtures of calcite and muscovite. The aggregates were synthesized with different modal mineral

compositions, ranging from pure calcite to pure muscovite. Compaction imparts a CPO, as observed from neutron diffraction goniometry and AMS, where the strength of the CPO correlates with the uniaxial load used during synthesis. Seismic wave propagation depends on 1) the modal fraction of calcite to muscovite and 2) the porosity subsequent to sample synthesis. The seismic anisotropy is strongly influenced by the concentration and CPO of muscovite. The volume of pores affects the propagation and anisotropy of compressional waves, in contrast to its comparatively weak influence on shear wave anisotropy. Seismic velocities are calculated from the CPO and compared to measured seismic velocities. The calculated velocities successfully predict measured values when the model accounts for the modal mineral composition, CPO of calcite and muscovite, and the volume and shape of pores.

The volume averaged geometrical pore shape is investigated by saturating the synthetic aggregates with a ferrofluid. The magnetic anisotropy of the ferrofluid saturated sample illustrates the magnetic pore fabric. Permeability is the most important factor for successful saturation and application of the magnetic pore fabric, which depends on the pore size and shape, mineral composition and the wettability of the solid phases of the aggregates.

Magnetic and elastic wave anisotropies were measured and calculated for samples collected from the highly strained overturned limb of the Morcles nappe, investigating their dependence on 1) second-phase content and microstructures, and 2) strain-gradient along the shear zone. The physical anisotropies decrease as a function of increasing second-phase content, and correlate with the strength of the calcite CPO. In addition, the magnitude of anisotropy depends on the strain-gradient along the shear zone.

In summary, this thesis has addressed the link between physical anisotropies and the components that constitute deformed natural and synthetic carbonate rocks, in terms of their: 1) CPO, 2) microstructure, 3) chemical composition, and 4) pore network. Magnetic and seismic anisotropy, as observed in synthetic aggregates and naturally deformed calcite mylonites, are strongly correlated. Successful separation of magnetic subfabrics shows that magnetic anisotropy is a useful proxy for CPO and indirectly for seismic anisotropy. Separation of the different components that give rise to physical anisotropy helps shed light on the mechanisms that produce the anisotropy in the carbonates, and their tectonic history.

Zusammenfassung

Karbonate bilden etwa 10 % der Sedimentgesteine der Erde. Im Vergleich zu anderen Gesteinen der Erdkruste zeigen sie relativ schwache mechanische Eigenschaften. Diese Eigenschaften sind Grund für Spannungen in tektonischen Zonen, und bilden deshalb einen entscheidenden Faktor bei der Krustendeformation. Deformationsprozesse der Kalzite können kristallographisch bevorzugte Orientierungen (crystallographic preferred orientation CPO) und Mikrostrukturen verursachen, die zu Anisotropien der physikalischen Eigenschaften im Gestein führen. Deshalb kann aufgrund physikalischer Anisotropien Rückschlüsse auf CPO und die Entwicklung der Mikrostrukturen gezogen werden. Die magnetischen und elastischen Eigenschaften deformierter Karbonatgesteine werden in dieser Arbeit genutzt um den Ursprung dieser Anisotropie zu untersuchen. Anhand von 1) natürlich verformten Karbonaten der Morcles Decke und 2) verformten synthetischen Mischungen von Kalziten und Muskovit, wurden diese physikalischen Anisotropien experimentell bestimmt.

Die Morcle Decke ist eine liegende Falte in der südwestlichen Schweiz, welche die Stellung einer basalen Struktur im Deckenstapel des Helvetikums einnimmt. Im Liegenden der Decke d.h. im überkippten Faltenschenkel, wurden die Sedimentschichten gestreckt und ausgedünnt, wobei sich eine grossflächige Scherzone ausbildete. Im Vergleich dazu sind die normalen und äusseren Bereiche der Falte wesentlich weniger verformt wurden. Kalzit bildet die Mineralmatrix der Deckensdimente und der Anteil weiterer Mineralphasen ist stark abhängig von der Lithologie und variiert von weniger als 1 vol% zu 40 vol%.

Die Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität (AMS) wurde durch Tief- und Hochfeldtechniken bei Raumtemperatur und 77 K gemessen. Dieser experimentelle Ansatz erlaubt die Separation von ferri-, para- und diamagnetischen Texturkomponenten, deren Kombination direkt mit der Gesteinstextur zusammenhängt. Die Separation ist generell erfolgreich für Proben, die alle drei Texturkomponenten enthalten und hat sich auch bewährt für Proben mit nur para- und diamagnetische Texturen. Die Substitution von Ca^{2+} durch Fe^{2+} in der Kristallgitterstruktur von Kalziten ist allgegenwärtig in der Scherzone der Morcle Decke und beeinflusst stark die Gesamtsuszeptibilität und die magnetische

Anisotropie. Aufgrund der experimentellen Ergebnisse wird eine allgemein gültige quantitative Beziehung zwischen dem Fe^{2+} -gehalt, CPO und der AMS hergeleitet.

Die elastischen Eigenschaften wurden an synthetischen Mischungen aus Kalzit und Muskovit gemessen. Die modalen Mineralanteile variieren zwischen reinem Kalzit und Muskovit. Neutronendiffraktion-Goniometrie und AMS Messungen zeigten, dass Kompaktion die CPO der Körner beeinflusst. Die Stärke der CPO korrespondiert mit der monoaxialen Auflast während der Synthese. Die Ausbreitung seismischer Wellen ist abhängig von 1) der modalen Verteilung von Kalzit und Muskovit und 2) der Porosität der Probe nach der Synthese. Die seismische Anisotropie ist stark geprägt durch die Konzentration und der CPO von Muskovit. Das Porenvolumen beeinflusst die Ausbreitung und Anisotropie der Druckwelle stark, hat aber einen verhältnismässig schwachen Einfluss auf die Scherwellenanisotropie. Die elastischen Geschwindigkeiten wurden anhand der CPO berechnet und mit gemessenen seismischen Daten verglichen. Die theoretischen Werte der seismischen Wellengeschwindigkeit reproduzieren die gemessenen Werte, sind dabei allerdings abhängig von der modalen Mineralzusammensetzung, der CPO von Kalzit und Muskovit, sowie dem Volumen und der Form der Poren.

Das Volumen, gemittelt über die geometrische Porenform, wurde durch Sättigung der synthetischen Aggregate mit Ferrofluiden untersucht. Die magnetische Anisotropie der mit Ferrofluiden gesättigten Proben veranschaulicht die magnetische Porenstruktur. Für die erfolgreiche Sättigung ist die Durchlässigkeit der kritische Faktor, welcher von Porengrösse, Porenform, Mineralzusammensetzung und Benetzbarkeit der festen Phase des Aggregates abhängt.

Magnetische und elastische Wellenanisotropien wurden gemessen und berechnet für Proben vom stark verformten, überkippten Bereiche der Morcle Decke. Dabei wurde die Abhängigkeit von 1) der sekundären Mineralphase und der Mikrostruktur, und 2) der Verformungsgradient der Scherzone untersucht. Der Grad der physikalischen Anisotropie nimmt ab, als Funktion des steigenden Gehalts der nicht-karbonatischen Mineralphase und korreliert mit der Stärke der Kalzit CPO. Zusätzlich ist die Grössenordnung abhängig von dem Verformungsgrad entlang der Scherzone.

Die Arbeit zeigt die Beziehung auf zwischen der physikalischen Anisotropie und natürlich und synthetisch verformten Karbonatgesteinen, im Bezug auf 1) CPO, 2)

Mikrostrukturen, 3) chemischer Zusammensetzung und 4) Porennetzwerk. Die magnetische und seismische Anisotropie, wie in synthetischen Aggregaten und natürlich verformten Marmor beobachtet wurde, korrelieren stark miteinander. Eine eindeutige Separation der unterschiedlichen magnetischen Texturkomponenten zeigt auf, dass die magnetische Anisotropie ein sehr guter Indikator für die CPO und somit für die seismische Anisotropie ist. Die Separation von verschiedenen Komponenten kann sowohl Aufschluss über die Mechanismen geben, die eine Anisotropie in Karbonaten hervorrufen, als auch zum Verstehen tektonischer Prozesse beitragen.