

DISS. ETH Nr. 10845

**PHYSICAL PROPERTIES AND SEISMIC RESPONSE
OF CARBONATE SEDIMENTS AND ROCKS**

ABHANDLUNG
Zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER NATURWISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von:

Flavio Stefano Anselmetti

Dipl. Geol. Universität Basel

geboren am 3 Sept. 1965
von Berzona, Ti

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. Daniel Bernoulli, ETH Zürich,
Prof. Dr. Gregor P. Eberli, University of Miami,
Prof. Dr. Alan Green, ETH Zürich

Referent
1. Korreferent
2. Korreferent

1994

ABSTRACT

The relationship between seismic reflection patterns and variations in lithology of carbonate sediments and rocks is twofold: (1) Physical rock properties, in particular sonic velocity and density, form the link between the seismic record and the lithology of the carbonates. Through a detailed laboratory study lithological factors that control velocity are investigated and characteristic velocity patterns are assigned to the diagenetic stages of the rocks. (2) The seismic image of carbonate rocks is dependent on the technical parameters of the reflection seismic survey. The influence of these seismic parameters is studied using computer modeled synthetic seismic sections.

Compressional wave and shear wave velocities (V_p and V_s) of 295 carbonate minicores from different areas and of different age were measured under variable confining and pore fluid pressures. The samples range from unconsolidated carbonate mud to completely lithified limestones. The results of the measurements show that for pure carbonate rocks, unlike siliciclastic or shaly sediments, there is little direct correlation between the acoustic properties (V_p and V_s) and the burial of depth or age. Velocity inversions with increasing depth are thus common. Sonic velocity in carbonates is more controlled by the combined effect of depositional lithology and a suite of post-depositional processes, such as cementation and dissolution.

At 8 MPa effective pressure, V_p ranges from 1700 to 6500 m/s and V_s ranges from 700 to 3400 m/s. This range is caused mainly by variations in the amount of porosity and the porosity type, and not by variations in mineralogy. In general, the measured velocities show a positive correlation with density and an inverse correlation with porosity, but departures from the general trends can be as high as 2500 m/s. These deviations can be explained by the occurrence of different pore types that form during specific diagenetic phases. The data set further suggests that commonly used correlations like the general Gardner's Law (V_p - density) or the time-average-equation (V_p - porosity) should be modified, since they generally result in too low velocities for carbonates.

Velocity measurements of unconsolidated carbonate mud at different stages of experimental compaction show that velocity increases due to compaction are lower than the observed velocity increases at decreasing porosities in natural rocks. This difference

shows that diagenetic changes, such as cementation-dissolution processes, which may predate or accompany compaction, influence velocity more than simple compaction at increasing burial depth.

The knowledge of the relationship between velocity and porosity from discrete samples are applied in the interpretation of a continuous downhole record of wireline logs. A synthetic "velocity deviation" log can be calculated by taking the difference between the velocities from the sonic log and the velocities expected from the porosity value on the neutron-porosity log. These differences, either positive or negative deviations, mark zones in the cores, in which velocity is higher or lower than expected from the porosity value. As seen in the measured samples, these zones can be related to constructive or destructive diagenetic processes that can be traced continuously downhole using the velocity deviation log.

The results of the laboratory analyses were also applied in a seismic modeling study of a well-exposed carbonate platform margin and its adjacent basin (Montagna della Maiella, Italy). The resulting synthetic seismic sections explain the seismic facies of a carbonate platform margin system, but, in addition, show the limitations of relating in a simple manner seismic sequences to depositional sequences.

To define a layered impedance model, velocities and densities of all major outcropping lithologies were determined. The impedance model was converted into synthetic seismic data by applying a computer-simulated modeling procedure that uses the normal incidence raytracing method at variable frequencies, amplitude gains, and noise levels. The resulting synthetic seismic sections display a mostly transparent platform, which is overlapped on the escarpment by a succession of high-amplitude slope reflections. The different reflectivities of platform and slope are concordant with the small range of impedance contrasts in platform carbonates compared to the large range of impedance contrasts in the carbonates from the slope and basin. The seismic image with an incoherent to transparent platform, high-amplitude slope reflections and recognizable prograding units is very similar to observed seismic data from other steep carbonate platform margins, e.g. from the subsurface of Great Bahama Bank.

In outcrop, seven unconformity-bounded supersequences were mapped. A comparison with the synthetic seismic section shows that, using a dominant frequency of 20 Hz, only five of these seven depositional supersequences can be recognized by seismic unconformities. With an increase of frequency, an increasing number of unconformities becomes visible and, using a frequency of 60 Hz, all seven supersequences are imaged. However, some of the seismic unconformities are pseudo-unconformities and image erroneous or non-existent geometrical patterns. The different numbers of seismic sequences at different frequencies, plus the appearance of pseudo-

unconformities, document the problem of seismically imaging depositional sequences. Dependent on the dominant frequency, an erroneous number of sequences might be interpreted. This limitation has to be taken into account, when making sequence stratigraphic interpretations based solely on seismic information.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Zusammenhang zwischen der Lithologie und dem seismischen Reflektionsmuster von Karbonatsedimenten und Kalksteinen kann in zwei Bereiche gegliedert werden: (1) Die physikalischen Gesteinseigenschaften, im speziellen sind dies Schallgeschwindigkeit und Gesteinsdichte, bilden das Bindeglied zwischen den seismischen Daten und der Karbonatlithologie. Detaillierte Laboranalysen wurden durchgeführt, um die Gesteinsparameter zu untersuchen, welche die Schallgeschwindigkeit beeinflussen. Charakteristische Geschwindigkeitswerte können so den verschiedenen Karbonattypen zugeordnet werden. (2) Das seismische Abbild der Karbonate ist auch abhängig von der Wahl der technischen Parameter der seismischen Untersuchung. Der Einfluss dieser Parameter kann mittels computergestützten Modellierungen von synthetischen seismischen Profilen untersucht werden.

Die Geschwindigkeiten von longitudinalen und transversalen Schallwellen (V_p und V_s) in 275 Gesteinskernen von Kalken unterschiedlichen Ursprungs und Alter wurden im Labor unter variablen Umgebungs- und Porenwasser-Drucken gemessen. Die Lithologien der gemessenen Proben reichen von unverfestigten Kalkschlammern zu vollständig zementierten Kalksteinen. Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass, im Gegensatz zu siliziklastischen oder tonigen Gesteinen, die akustischen Eigenschaften von reinen Karbonaten kaum mit dem Gesteinsalter oder der Versenkungstiefe zusammenhängen. Geschwindigkeitsabnahmen bei zunehmender Tiefe sind deshalb häufig anzutreffen. Vielmehr ist die Schallwellengeschwindigkeit ein kombiniertes Produkt der Lithologie des Ausgangssedimentes und der verschiedenen Prozesse der Diagenese, wie z. Bsp. Zementierungs- oder Lösungsvorgänge.

V_p variiert bei einem effektiven Druck von 8 MPa zwischen 1700 und 6500 m/s, während dem V_s Werte zwischen 700 und 3400 m/s erreicht. Diese Variationen in der Geschwindigkeit sind hauptsächlich eine Funktion der Porosität sowie des Porentyps, und weniger eine Funktion der mineralogischen Zusammensetzung. Zunehmende

Gesteinsdichte oder abnehmende Porosität führen normalerweise zu einer Zunahme der Geschwindigkeit. Einige Messungen weichen jedoch mit über 2500 m/s von den durchschnittlichen Korrelationen ab. Diese Abweichungen können durch spezielle Porentypen erklärt werden, die sich während den verschiedenen Phasen der Diagenese bilden. Im Weiteren lassen die Labormessungen darauf schliessen, dass häufig gebrauchte Korrelationen wie das "Gardner's Law" (V_p - Dichte) oder die "time-average-equation" (V_p - Porosität) korrigiert werden müssen, da sie meistens zu tiefe Karbonat-Geschwindigkeiten liefern.

Geschwindigkeitsmessungen an unverfestigtem Karbonatschlamm im Zustand unterschiedlicher, künstlicher Kompaktion dokumentieren, dass die Geschwindigkeitszunahme durch reine Kompaktion geringer ist, als die Zunahme durch abnehmende Porosität in natürlich verfestigten Gesteinen. Diese Diskrepanz zeigt deutlich, dass diagenetische Prozesse, die vor oder während der Kompaktion stattfinden, die Schallgeschwindigkeit stärker als die Kompaktion bei zunehmender Überlast beeinflussen.

Die aus den Laboruntersuchungen stammenden Kenntnisse des Zusammenhangs zwischen Geschwindigkeit und Porosität können bei der Interpretation von kontinuierlichen Logdaten aus Bohrlöchern angewendet werden. Ein künstliches "Geschwindigkeits-Abweichungs" Log kann aus der Differenz zwischen der Geschwindigkeit des Sonic Logs und der von der Porosität zu erwarteten Geschwindigkeit des Neutron-Porosität Logs berechnet werden. Diese Differenzen, entweder positive oder negative Abweichungen, zeigen Zonen auf, in denen die Geschwindigkeit höher oder tiefer ist, als die Geschwindigkeit, die von der Porosität erwartet wird. Wie durch die Laboruntersuchungen gezeigt wurde, stehen diese Zonen im Zusammenhang mit konstruktiven oder destruktiven diagenetischen Prozessen, die anhand des Geschwindigkeits-Abweichung Logs kontinuierlich im Bohrloch verfolgt werden können.

Eine weitere Anwendung der Ergebnisse der Laboranalysen sind die seismischen Modellierungen eines gut aufgeschlossenen Karbonatplattformrandes und des dazugehörigen Abhangs (Montagna della Maiella, Italien). Die resultierenden synthetischen seismischen Linien erklären das seismische Reflexionsmuster von Karbonatplattformrändern, doch zeigen sie gleichzeitig die Limiten auf, die bei der Zuordnung von seismischen Sequenzen zu Ablagerungssequenzen entstehen.

Die Geschwindigkeiten und Dichten der wichtigsten aufgeschlossenen Lithologien wurden gemessen, um damit ein geschichtetes Impedanzmodell zu definieren. Dieses Impedanzmodell wird mittels einer computergestützten Modellierung in synthetische

seismische Daten verwandelt, wobei die Methode des "normal incidence raytracing" mit variablen Frequenzen, Verstärkungen und Lärmpegeln angewendet wird.

Die synthetischen seismischen Linien bilden eine seismisch transparente Plattform ab, welche an der Plattformwand durch eine Abfolge von starken Abhang-Reflektionen angelagert wird. Die verschiedenen Reflektivitäten von Plattform und Abhang stimmen gut mit dem engen Bereich von Impedanzwerten in Plattformkalken und dem weiten Impedanz-Bereich von Abhang- und Beckenkarbonaten überein. Dieses seismische Muster, mit einer inkoherenten bis transparenten Plattform, einem gut reflektierenden Abhang und den erkennbaren progradierenden Einheiten, ist dem Muster auf echten seismischen Profilen von steilen Plattformrändern sehr ähnlich (z. Bsp. Great Bahama Bank).

Sieben Supersequenzen konnten im Feld kartiert werden, die durch Diskordanzen voneinander getrennt sind. Ein Vergleich mit den synthetischen seismischen Profilen zeigt, dass lediglich fünf der sieben Supersequenzen bei einer dominierenden Frequenz von 20 Hz durch seismische Diskordanzen erkannt werden können. Erhöht man die Frequenz, erhöht sich auch die Anzahl der erkennbaren seismischen Diskordanzen. Bei 60 Hz können schliesslich sämtliche sieben Sequenzen aufgelöst werden. Einige der erkennbaren Diskordanzen sind jedoch Pseudo-Diskordanzen und bilden falsche oder nicht existierende Geometrien ab. Die unterschiedliche Anzahl seismischer Sequenzen bei verschiedenen Frequenzen, sowie die Pseudo-Diskordanzen, zeigen die Problematik des seismischen Abbildens von Ablagerungssequenzen auf. Eine falsche Anzahl Sequenzen kann erkannt werden, je nach dominanter seismischer Frequenz. Diese Limitierung sollte bei der Anwendung der Sequenzstratigraphie in Betracht gezogen werden, falls sie ausschliesslich auf der Interpretation von seismischen Daten beruht.

RIASSUNTO

La relazione esistente fra l'immagine di riflessione sismica e le variazioni in litologia dei sedimenti carbonatici ha due implicazioni: (1) le proprietà fisiche delle rocce, ed in particolare la velocità sonica e la densità costituiscono la connessione fra la documentazione sismica e la litologia dei carbonati. Grazie ad un dettagliato studio di laboratorio sono stati studiati i fattori che controllano la velocità sonica ed è stato possibile ricondurre le caratteristiche immagini ai differenti stadi diagenetici di una roccia. (2) La immagine sismica di una roccia carbonatica è funzione dei parametri tecnici

utilizzati dal servizio di riflessione sismica. L'influenza di tali parametri sismici viene studiata utilizzando delle sezioni sismiche sintetiche modellate al computer.

La velocità delle onde compressive e di taglio (V_p e V_s) di 295 minicarote di rocce carbonatiche provenienti da diverse aree e di diversa età sono state misurate sotto condizioni variabili della pressione confinante e dei fluidi presenti nei pori. I campioni presentano una ampia gamma di variazioni, da fango inconsolidato fino a una roccia carbonatica completamente litificata. I risultati delle misurazioni mostrano che per una roccia carbonatica pura, contrariamente a quanto si verifica per i sedimenti terrigeni o argillosi, esiste una minima correlazione diretta fra le proprietà acustiche (V_p and V_s) ed il grado di seppellimento od età della roccia. Pertanto le inversioni di velocità con la profondità si verificano comunemente. La velocità sonica nelle rocce carbonatiche è piuttosto controllata dagli effetti combinati di litologia deposizionale e di un insieme di processi post-deposizionali, quali la cementazione e la dissoluzione.

Ad una pressione effettiva di 8 MPa, la V_p varia fra 1700 to 6500 m/s e la V_s varia fra 700 to 3400 m/s. Questa variabilità è causata principalmente da variazioni fra la quantità di porosità piuttosto che da variazioni in mineralogia. In generale, le velocità misurate mostrano una correlazione positiva con la densità ed una correlazione negativa con la porosità, anche se deviazioni da questo andamento generale possono raggiungere fino 2500 m/s. Queste deviazioni si possono spiegare con l'occorrenza di diversi tipi di pori che si formano durante specifiche fasi diagenetiche. L'insieme dei dati suggerisce che correlazioni normalmente utilizzate, quali la legge generale di Gardner (V_p - densità) o la "time-average-equation" (V_p - porosità), debbano essere modificate, dal momento che esse risultano in velocità troppo basse per le litologie carbonatiche.

Misurazioni della velocità di fango carbonatico inconsolidato a diversi stadi di compattazione sperimentale indicano che gli aumenti di velocità dovuti alla compattazione sono più bassi degli aumenti dei velocità osservati a pressioni decrescenti in rocce naturali. Questa differenza mostra che i cambiamenti diagenetici, quali i processi di cementazione-dissoluzione, che possono verificarsi sia prima che dopo la compattazione, influenzano la velocità più della semplice compattazione dovuta ad un aumento progressivo della pressione di carico.

La conoscenza di questa relazione fra velocità e porosità derivata da campioni discreti viene applicata alla interpretazione di una documentazione continua di wireline logs lungo pozzo. Un log sintetico della "deviazione della velocità" può essere calcolato dalla differenza fra le velocità dal log sonico e le velocità previste dal valore della porosità derivata dal log neutron-porosity. Queste differenze, sia positive che negative, marcano nelle carote delle zone nelle quali la velocità è maggiore o minore di quanto ci si aspetterebbe dal valore della porosità. Come discusso per i campioni misurati, l'origine

di queste zone puo' essere attribuita a processi diagenetici costruttivi o distruttivi, che possono essere tracciati lungo pozzo grazie all'uso di un log della deviazione della velocità.

I risultati delle analisi di laboratorio sono state anche applicate ad uno studio di modellizzazione sismica di un margine di piattaforma carbonatica e dell'adiacente bacino (Montagna della Maiella, Italia). Le risultanti sezioni sismiche sintetiche illustrano le facies sismiche di un sistema di margine di piattaforma carbonatica, ma in piu' mostrano le limitazioni che esistono nel mettere direttamente in relazione le sezioni sismiche alle sequence deposizionali.

In modo da definire un modello di impedenza a livelli, sono state determinate le velocità e la densità di tutte le principali litologie osservate sul terreno. Il modello di impedenza e' stato convertito in dati sismici sintetici utilizzando dei procedimenti che utilizzano il metodo "normal incidence raytracing" a frequenze variabili, aumenti di amplitudine, e livelli di disturbo del segnale. Le risultanti sezioni sismiche sintetiche mostrano una piattaforma prevalentemente trasparente, che viene onlappata sulla scarpata da una successione di riflettori di pendio ad alta amplitudine. Le diverse riflettività di piattaforma e pendio concordano con la bassa variabilità dei contrasti di impedenza in una piattaforma carbonatica rispetto alla alta variabilità dei contrasti di impedenza nei carbonati di pendio e bacino. La immagine sismica di una piattaforma da incoerente a trasparente, con riflettori di pendio ad alta amplitudine e con riconoscibili unità progradanti, è molto simile ai dati osservabili in altri margini di piattaforma ripidi, quali i dati di sottosuolo del Great Bahama Bank.

In affioramento, sono state riconosciute sette supersequenze delimitate de discontinuità. Un confronto con la sezione sismica sintetica mostra che, utilizzando la comune frequenza di 20 Hz, solo cinque delle sette sequenze deposizionali possono essere riconosciute grazie a discontinuità sismiche. Con un aumento della frequenza, un numero sempre maggiore di discontinuità diventa visibile e, utilizzando una frequenza di 60 Hz, tutte le sette supersequenze appaiono sulla linea sismica sintetica. Tuttavia, alcune delle discontinuità sismiche sono pseudodiscontinuità e riproducono geometrie erronee o non esistenti. Il diverso numero di sequenze sismiche a differenti frequenze, in addizione alla apparizione di pseudodiscontinuità, documentano il problema della rappresentazione sismica delle sequenze deposizionali. A seconda della frequenza dominante, è possibile interpretare erroneamente il numero di sequenze deposizionali riconoscibili. E' necessario tenere conto di questa limitazione quando interpretazioni di stratigrafia sequenziale sono basate unicamente sulla informazione sismica.