



Doctoral Thesis

Multiscalar porosity structure of a miocene reefal carbonate complex

Author(s):

Jaeggi, David

Publication Date:

2006

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005209372> →

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 Nr. 16519

Multiscalar porosity structure of a Miocene reefal carbonate complex

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY (ETH)
ZÜRICH

For the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCE

presented by

DAVID JAEGGI

Dipl. Geologe

Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zürich

born September 2nd 1974

Mümliswil-Ramiswil (Solothurn)

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Simon Löw, examiner

Dr. Martin Herfort, co-examiner

Prof. Dr. Flavio Anselmetti, co-examiner

Dr. Philippe Pézard, co-examiner

2006

E) Abstract – Zusammenfassung

Abstract

In this thesis the porosity structure of a Miocene reefal carbonate complex was investigated on three different scales of investigation. The variety of datasets and different investigation methods, which directly or indirectly image the pore space, led to a comprehensive image of the subsurface. Heterogeneity at different scales can only be understood correctly if there is a sound knowledge about the depositional and post-depositional history of the whole carbonate platform.

At the rock-matrix-scale an extensive sampling program was performed, which targeted on the detailed characterization of pore structure and sedimentology of stratigraphic elements, such as lithofacies types and their subtypes. Digital image analysis on thin sections and physical measurements of porosity respectively permeability on lynch mini-cores were performed. For each individual lithofacies type diagnostic features of the pore structure were found. High permeability was recorded in outer lagoon and proximal talus, which is mainly due to well connected moldic porosity. Especially within proximal talus large and elongated molds with large shape factors are leading to a prominent depositional anisotropy. In parts of the upper proximal talus in addition to the depositional anisotropy a diagenetic anisotropy could be detected, however restricted to smaller pore size classes and thus less important for permeability. In distal talus porosity can reach very high amounts but the small and round shaped molds are barely interconnected within the micritic matrix and thus permeability is low. Samples with a bimodal pore size distribution observed in outer lagoon and parts of proximal talus do not follow the common correlations between permeability and parameters describing the pore geometry. In these unsorted sediments, with mostly complex pore size distributions, averaged pore size parameters are not useful for characterizing permeability, since a few extreme poreshapes and -sizes can have a large impact on permeability. Thus, unlike proposed by many authors no pore size-dependent correlation of porosity versus permeability could be observed. The energetic milieu and location within the former carbonate factory significantly defines the primary parameters, like grain size distribution, sorting, sedimentary anisotropy and mud content. Permeability of the rock matrix is not only dependent on these primary factors but also on secondary processes. The subsequent diagenetic overprint led to remarkable changes of the rock properties, like formation of moldic porosity, recrystallization of the coral framework and partial occlusion of pore space by blocky spar. The latter two processes in reef core at least partly can be related to karst processes.

Heterogeneity at the borehole-scale is known to be an important control on reservoir behavior and has been investigated extensively with wireline borehole logs. It could be shown, that an important part of the total reservoir porosity is of a vuggy pore type. Lithofacies types control the primary pore structure and to a certain degree guide post-depositional processes. Reef core is the most heterogeneous lithofacies type, where primary and secondary pores can be remarkably enlarged and interconnected to channels, if supported by karst. The channel-system, which is developed at the bottom of the reef core proved to be the most permeable feature of the reef complex. Large dissolution cavities and the interconnecting channels are associated with dense and recrystallized rock, leading to high porosity contrasts. To a certain degree sequence boundaries and as well residual clays may locally act as seals. The non-standard method of scanning the acoustic travel-time image revealed cyclicity of vuggy pores

>1 cm within proximal talus and made it possible to determine REV's of each individual lithofacies type, if the dataset was long enough. One of the most prominent boundaries, with an abrupt change of the pore structure, is doubtless the transition proximal/distal talus. Here especially the sonic tool revealed a change in pore structure from large and elongated moldic pores to small and round shaped molds within a micritic, framework-like matrix, leading to a remarkable reduction of permeability at equal total porosity at the rock-matrix-scale.

At the crosshole-scale sequence stratigraphy in combination with outcrop analogues and geophysical investigations, such as electrical resistivity tomography and seismic tomography, have been applied. From the observations made at the test site it can be stated that the geometry and sedimentary structure is comparable to the Cap Blanc reefs at the well exposed cliff coast. The main focus was set on the crosshole lateral and vertical distribution of large scale heterogeneity, such as karst, zones of high electrical resistivity and high seismic velocity, their evolution and internal pore structure. The high resistivity contrasts observed at several levels in the reef core display the complexity of the distribution of large scale primary and secondary porosity, which acted as a nucleus for karstic processes at certain levels. Results have shown that a complex and lateral continuous network of karstic channels is present within reef core, which leads to extremely permeable features at several distinct horizons. It could be shown, that the high velocity zone is only partly controlled by the extension of the reef core. Other controls are diagenetic, of which sea level stillstands are the most important. The role of sea level stillstands is discussed with a special emphasis on the Younger Dryas-event, which overlaps with the lower part of the high velocity zone. The upper parts are mainly caused by the neomorphosed coral framework and diagenetically altered rock in the vicinity of karstified horizons. Low resistivity zones are correlated with karstified horizons and can be traced laterally. A channeling is present, which interconnects larger primary and secondary pores. These pores are unevenly distributed on the karstified horizons, which leads to complex traces of the channels in the horizontal direction.

The integration of information originating from smaller scales was performed permanently during the analysis of the pore structure at larger scales. The investigations have shown that in most lithofacies types, porosity at the rock-matrix-scale builds a significant fraction of the overall porosity. The reef core exhibits a pronounced scale dependency concerning permeability. Permeability at the rock-matrix-scale is very low, whereas at larger scales it is highest. The high permeability of the karstic system within the reef core in combination with the pore structure at the rock-matrix-scale in the adjacent lithofacies types is crucial for an enhanced water management on the Lluçmajor platform. Zones of high electrical resistivity respectively high seismic velocity have been recorded within reef core and the upper proximal talus. These zones have been recognized by different methods at all three scales of investigation and they are controlled by sea level stillstands, which affected the entire platform. The impact of these stillstands on the pore space could be studied at the rock-matrix-scale, where cements occluded the pore space of smaller pore classes and led to secondary anisotropy. The pore structure within outer lagoon and proximal talus as well allows for a good productivity of the aquifer, however, orders of magnitudes lower than the karst-system. A remarkable change of the pore structure from moldic-intergranular to framework-like moldic is present at the transition proximal/distal talus, resulting in low permeability at high porosity.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Dissertation wurde die Porositäts-Struktur eines Miozänen Riffkarbonates auf drei unterschiedlichen Untersuchungsmassstäben behandelt. Die Vielfalt von Datensätzen und unterschiedlichen Methoden, welche direkt oder indirekt den Porenraum abbilden, führte zu einem umfassenden Verständnis des geologischen Untergrundes. Heterogenität auf unterschiedlichsten Skalenbereichen kann nur verstanden werden, wenn die Ablagerungsgeschichte und die diagenetischen Prozesse der ganzen Riffplattform exakt bekannt sind.

Auf dem Massstab der Gesteinsmatrix wurden umfangreiche Proben genommen, welche auf die detaillierte Erfassung der Porenstruktur und Sedimentologie von stratigraphischen Elementen, wie Lithofaziestypen und ihre Subtypen, abzielten. Digitale Bildanalyse an Dünnschliffen und physikalische Messungen von Porosität und Permeabilität an 1inch Mini-Kernen wurden in umfangreicher Masse durchgeführt. Für jeden einzelnen Lithofaziestyp wurden diagnostische Merkmale erfasst. Hohe Permeabilitäten wurden in der äusseren Lagune und im proximalen Talus gemessen, was hauptsächlich eine Folge der gut verbundenen Molds ist. Insbesondere im proximalen Talus führen grosse und längliche Molds mit grossen shape-Faktoren zu einer wichtigen sedimentären Anisotropie. In Teilen des oberen proximalen Talus tritt zusätzlich eine diagenetische Anisotropie auf, welche jedoch nur auf kleinere Porengrössenklassen beschränkt ist. Folgedessen ist diagenetische Anisotropie weniger wichtig für die Permeabilität. Im distalen Talus werden hohe Porositäten erreicht aber die kleinen und rundlichen Molds in mikritischer Matrix sind untereinander kaum verbunden, und deshalb ist die Permeabilität vergleichsweise gering. Proben mit einer bimodalen Porengrössenverteilung sind typisch für die äussere Lagune und den proximalen Talus. Diese folgen nicht den allgemeinen Korrelationen zwischen Permeabilität und Porenparametern, welche die Porengeometrie beschreiben. Darüber hinaus sind in diesen unsortierten Sedimenten mit meist komplexen Porengrössenverteilungen durchschnittliche Porenparameter nicht brauchbar, um die Permeabilität zu charakterisieren, da im Allgemeinen wenige extreme Porenformen und Porengrössen permeabilitätsbestimmend sind. Folglich kann die von vielen Autoren vorgeschlagene porengrössenabhängige Korrelation zwischen Porosität und Permeabilität nicht beobachtet werden. Das energetische Milieu und der genaue Standort innerhalb der „Karbonat-Fabrik“ definieren zusammen die primären Parameter wie Porengrössenverteilung, Sortierung, sedimentäre Anisotropie und Gehalt an Karbonatschlamm. Die Permeabilität der Gesteinsmatrix ist nicht nur von diesen primären Faktoren abhängig, sondern auch von sekundären Prozessen. Die nachfolgende Diagenese führte zu wichtigen Veränderungen der Gesteinseigenschaften, wie z.B. die Bildung von Molds, die Rekristallisation der Korallenstruktur und die Reduktion des Porenraumes durch sparitischen Zement. Die beiden letztgenannten Prozesse können im Riffkern zumindest teilweise mit Karst in Verbindung gebracht werden.

Heterogenität auf dem Bohrloch-Massstab bildet einen wichtigen Faktor für das hydraulische Verhalten eines Reservoirs und wurde deshalb in der vorliegenden Arbeit intensiv mit Hilfe von Bohrloch-Messverfahren untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass ein wichtiger Teil der totalen Reservoirporosität Lösungsporen sind. Die Lithofaziestypen kontrollieren die primäre Porenstruktur und beeinflussen den Verlauf der sekundären Prozesse bis zu einem gewissen Grad. Der Riffkern ist der heterogenste Lithofaziestyp, wo, falls Karst im Spiel ist, primäre und sekundäre Poren stark vergrössert und zu regelrechten Kanälen verbunden sein können. Das System von Kanälen, welches sich am Grund des Riffkerns entwickelt hat, ist bei weitem die durchlässigste Zone des Riffkomplexes. Grosse Lösungshohlräume und die verbindenden Kanäle treten zusammen mit dichtem und rekristallisiertem Gestein auf, was zu einem hohen Porositätskontrast führt. Sequenzgrenzen und residuale Lehme können lokal als Stauer wirken. Die neue Methode des Akkustik-Laufzeiten-Scans führte zur Entdeckung der

Zyklizität von Lösungsporen >1 cm im proximalen Talus und ermöglichte zusätzlich bei genügend langen Datensätzen die Bestimmung des repräsentativen Elementarvolumens jedes einzelnen Lithofaziestyps. Eine der auffälligsten Grenzen mit einem abrupten Wechsel der Porenstruktur ist zweifellos der Übergang vom proximalen zum distalen Talus. Insbesondere mit dem Sonic-Messverfahren wurde der Wechsel der Porenstruktur von grossen und länglichen zu kleinen und rundlichen moldic-Poren, eingebettet in einer mikritischen und gerüstähnlichen Matrix, erfasst. Dieser Wechsel führt zu einem markanten Rückgang der Permeabilität bei gleich bleibender totaler Porosität auf dem Massstab der Gesteinsmatrix.

Auf dem Massstab des Teststandorts wurde Sequenz-Stratigraphie in Kombination mit Erfahrungen aus analogen Aufschlüssen von der Küste und geophysikalischen Untersuchungsmethoden, wie elektrische und seismische Tomographie, angewandt. Aufgrund der Beobachtungen, welche am Teststandort gemacht wurden kann eindeutig gesagt werden, dass die Geometrie und die sedimentäre Struktur den Cap Blanc Riffen an der Küste sehr ähnlich ist. Das Hauptaugenmerk wurde in diesem Teil auf die laterale und vertikale Verteilung von Karst und Hochwiderstands- resp. Hochgeschwindigkeitszonen, ihre Entstehung und interne Porenstruktur gelegt. Die starken Widerstandsunterschiede, welche auf verschiedenen Niveaus im Riffkern beobachtet wurden, zeigen die Komplexität der Verteilung von grossskaliger primärer und sekundärer Porosität, welche als Initialkern für Karstprozesse fungierte. Die Resultate haben gezeigt, dass im Riffkern ein komplexes und lateral kontinuierliches Netzwerk von verkarsteten Kanälen vorhanden ist, welches auf verschiedenen Niveaus zu permeablen Zonen führt. Im Weiteren konnte gezeigt werden, dass die Hochgeschwindigkeitszone nur teilweise durch die Ausdehnung des Riffkerns kontrolliert ist. Andere Einflussfaktoren sind diagenetischer Art, von denen die Meeresspiegelstillstände am wichtigsten sind. Die Rolle dieser Stillstände wird unter spezieller Betrachtung des Younger Dryas-Ereignisses diskutiert, welches mit dem unteren Teil der beobachteten Hochgeschwindigkeitszone übereinstimmt. Die oberen Teile dieser Zone können vor allem durch neomorphosierte Korallen und diagenetisch verändertes Gestein unmittelbar bei Karsthorizonten erklärt werden. Zonen mit tiefem elektrischem Widerstand korrelieren mit Karsthorizonten und können lateral verfolgt werden. Die Karst-Kanäle verbinden grössere primäre und sekundäre Poren. Diese Poren sind im Riffkern ungleichmässig verteilt, was zu einem komplexen Verlauf dieser Kanäle in horizontaler Richtung führt.

Die Integration von Information aus kleinen Skalenbereichen wurde während der Analyse der Porenstruktur auf grösseren Untersuchungsmassstäben permanent durchgeführt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Porosität auf dem Massstab der Gesteinsmatrix bei den meisten Lithofaziestypen einen signifikanten Teil der Gesamtporosität bildet. Der Riffkern weist bezüglich der Permeabilität eine ausgeprägte Skalenabhängigkeit auf. Auf dem Massstab der Gesteinsmatrix ist die Permeabilität sehr gering, auf grösseren Massstäben hingegen ist sie am höchsten. Die Kenntnis der hohen Permeabilität des Karstsystems innerhalb des Riffkerns und der Porenstruktur der Gesteinsmatrix in den angrenzenden Lithofaziestypen ist wichtig für eine nachhaltige Wasserbewirtschaftung auf der Lluçmajor Plattform. Zonen mit hohem elektrischem Widerstand, resp. hoher seismischer Geschwindigkeit wurden im Riffkern und im oberen proximalen Talus beobachtet. Diese Zonen wurden mit unterschiedlichen Methoden auf allen drei Untersuchungsmassstäben erkannt und sind die Folge von früheren Meeresspiegelstillständen, welche die ganze Plattform beeinflussten. Der Einfluss dieser Meeresspiegel auf den Porenraum konnte auf dem Massstab der Gesteinsmatrix studiert werden, wo Zemente den Porenraum von kleineren Porenklassen verschlossen und so zu einer sekundären Anisotropie führten. Die Porenstruktur in der äusseren Lagune und im proximalen Talus ist auch verantwortlich für die hohe Ergiebigkeit des Aquifers, jedoch anteilmässig viel geringer als das Karstsystem. Ein

bemerkenswerter Wechsel der Porenstruktur von moldic-intergranular zu gerüstähnlich-moldic tritt an der Grenze von proximalem und distalem Talus auf, was zu einer geringen Permeabilität bei hoher Porosität führt.