



## Doctoral Thesis

# Isotope study of the hydrology and the co-existing carbonate phase from site of recent dolomitization the coastal sabkha of Abu Dhabi, Persian Gulf

**Author(s):**

McKenzie, Judith Ann

**Publication Date:**

1976

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000102822> →

**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](#).

**ISOTOPE STUDY OF THE HYDROLOGY AND THE CO - EXISTING CARBONATE  
PHASES FROM SITE OF RECENT DOLOMITIZATION THE COASTAL SABKHA  
OF ABU DHABI, PERSIAN GULF**

**ABHANDLUNG**

zur Erlangung

des Titels eines Doktors der Naturwissenschaften  
der

**EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH**

vorgelegt von

**JUDITH ANN McKENZIE**  
B.A. MacMurray College, Illinois  
M.S. University of Colorado  
geboren am 4. Mai 1942  
von Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A.

angenommen auf Antrag von  
Prof.Dr. K.J. Hsü, Referent  
Prof.Dr. W. Stumm, Korreferent

1976

Abstract

An extensive isotopic investigation of carbonate sediments and in situ waters was undertaken on the coastal sabkhas of Abu Dhabi. The diagenetic alteration of the Recent carbonate sediments by a secondary replacement process to form calcium-rich dolomites was of primary interest. The calcium-rich dolomite was found to precipitate directly from solution in isotopic equilibrium with the interstitial waters at approximately 35°C. The source and circulation pattern of the sabkha brines was defined in order to evaluate the dolomitization hydrology. From isotopic and hydrological data, cycles consisting of three simultaneously occurring stages were elucidated. Flood recharge by marine waters and less frequently by rain fall occurs mainly during winter shamal storms. It produces a hydraulic head, which causes a downward movement of water from the surface. During most of the year, capillary evaporation predominates, and the water table is lowered. If the water table is lowered below the piezometric level of the underlying aquifer, evaporative pumping is initiated, and water flows upward through the saturated zone.

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen einer Doktorarbeit wurden verschiedene Isotopen von Karbonatse-  
dimenten und in situ Wasser der Küstensabkhas von Abu Dhabi untersucht.  
Von zentralem Interesse war das Problem der diagenetischen Umwandlung von  
Calcium-Karbonaten in Calciumreiche Dolomite durch sekundäre Replacement  
Prozesse. Durch das Studium dieses gegenwärtig verlaufenden Umwandlungs-  
prozesses konnten wertvolle Informationen über chemische Mechanismen des  
Dolomitierungsprozesses und über das Milieu, das diesen Vorgang begünstigt,  
gewonnen werden. Das Ziel dieses Projektes wurde erreicht; neue interessante  
Erkenntnisse über sekundäre Replacement-Dolomitierung wurden gemacht.

Als erstes wurden mit Hilfe von Wasser-Isotopenanalysen Herkunft und Zir-  
kulationsbild des Sabkhwassers identifiziert. Die Resultate zeigen, dass  
die natürlichen Veränderung- und Mischvorgänge der Abu Dhabi-Sabkhwasser  
komplizierter sind, als jene in Wassern gemässiger oder tropischer Klima-  
bereiche. U.a. musste bei der Interpretation der Daten den in aridem Klima  
bedeutenden Verdunstungsprozessen Rechnung getragen werden.

Erschwert wurde die Interpretation dadurch, dass bis heute noch äusserst  
selten Isotopenuntersuchungen an Wassern in aridem Klima durchgeführt wur-  
den. So basieren die Prinzipien der Isotopenhydrologie auf experimentellen  
Untersuchungen sowie auf Analysen von Wasser im gemässigten Klimabereich.  
Die Enträtselung der Abu Dhabi Daten lieferte einen neuen interessanten  
Aspekt des Problems der Isotopendaten-Interpretation: Das Resultat, dass  
die lokalen Niederschläge im gesamten Prozess eine entscheidende Rolle spie-  
len, ist dabei von einiger Bedeutung. Nicht nur der Beitrag dieser Nieder-  
schläge an den Grundwasser-Aquifer, auch jener an die meteorischen Wasser  
unter der Sabkha muss in die Interpretation miteinbezogen werden.

Die Isotopenhydrologie in ariden Gebieten verspricht interessante Möglich-  
keiten für zukünftige Studien.

Auf Grund chemischer Verschiedenheiten konnten die Sabkha-Wasser in solche  
marinen und kontinentalen Ursprungs klassiert werden. In einer weiteren  
Unterteilung wurden folgende vier Typen unterschieden:

1. Supratidales Ueberflutungswasser
  - a) vom offenen Meer herkommend
  - von der Lagune herkommend
2. kontinentales Wasser
  - a) horizontal fliessender Aquifer
  - b) direktes Niederschlagswasser

Das Verteilungsbild dieser vier Typen ist äusserst kompliziert, jedoch mit Hilfe der Isotopendaten und Analysen der Brom- und Kaliumkonzentration rekonstruierbar. Hydrologische Gradienten wurden u.a. mit Hilfe von Untersuchungen des Tritiumgehalts bestimmt. So konnte neben einem horizontalen Gradienten auch ein solcher, der abwärts gerichtet ist, indiziert werden. Dieser kann u.a. mit supratidalen Ueberflutungen und den seltenen Regenüberflutungen in Zusammenhang gebracht werden. Eine Berechnung der abwärts gerichteten Fliessrate ergab einen Wert von 11.2. cm/g. In nicht überfluteten Regionen hat die Verdunstung während der grössten Zeit innerhalb eines Jahres einen dominierenden Effekt; eine Absenkung des Wasserspiegels ist beobachtbar. In Zonen verstärkter Verdunstung kann der Wasserspiegel unterhalb den Peizometrischen Level des darunterliegenden Aquifers fallen, eine Aufwärtsbewegung des Wassers von unten durch die gesättigte Zone kompensiert den Verdunstungseffekt.

Drei Stufen des hydrologischen Zyklus wirken in der Sabkha gleichzeitig. Die Wirkung und Ausdehnung der Stufe I. - Flood recharge vom Meer oder durch vereinzelte Regenfälle - ist variabel. Ausgedehnte supratidale Ueberflutungsphasen sind u.a. im Winter im Zusammenhang mit den Shamalstürmen beobachtbar, küstennahe Ueberflutungen treten hingegen beinahe täglich auf. Stufe II - capillary evaporation - kommt überall vor; eine Ausnahme bilden Regionen, die gerade eine Ueberflutungsphase erlebt haben. Stufe III - evaporative pumping - beginnt, sobald der Wasserspiegel ein bestimmtes Niveau unterschritten hat. Generell dominiert in küstennahen Gebieten ein abwärts gerichteter Flussgradient, im oberen kontinentalen Bereich der Sabkha ist hingegen ein Aufwärtsfliessen des Wassers feststellbar.

Die den Dolomitierungsprozess initierenden Lösungen sind unzweifelhaft die verdunsteten marinen Wasser, die durch supratidale Ueberflutungen in die Sabkha gebracht wurden. Diese Lösungen dringen in das Sediment ein und versickern darin. Die Chemie dieser Wasser ist durch Verdunstung und eine gewisse Durchmischung mit kontinentalem Wasser modifiziert.

Die ersten Dolomitkeime bilden sich äusserst schnell und bei hohen Temperaturen ( $> 35^{\circ}\text{C}$ ). Dabei entstehen extrem kleine Kristalle ( $< 1\mu$ ) eines hohen Ca-reichen Dolomits. Diese Kristalle werden bei tieferen Temperaturen ( $35^{\circ}\text{C}$ ) wieder aufgelöst und neu ausgefällt. Dieser Rekrystallisationseffekt setzt sich kontinuierlich fort, auch dann noch, wenn der Dolomit nicht mehr in Kontakt mit dem marinen Wasser ist. Die entstehenden Dolomitrhomboeder sind grösser ( $5-15\mu$ ) stabiler und weniger Ca-reich.

Mit zunehmender Zeit und grösserer Distanz von der Küste zeigt der Dolomit besser geordnete Mg-Ca-Lagen innerhalb des Kristallgitters. Dieser graduelle Uebergang scheint sich in festem Zustand abzuspielen.

Der sekundäre Replacement-Dolomit in Abu Dhabi fällt in Isotopengleichgewicht mit dem interstitiellen Wasser aus. Wie Fritz und Smith (1970) vorschlagen, ist die O-18 Fraktionierung zwischen Ca-reichem Dolomit und dessen Formationslösungen im Gleichgewicht. Diese Fraktionierung unterscheidet sich von jener zwischen idealem Dolomit und Wasser; sie liegt näher jener zwischen Calcit und Wasser. Dh., wenn koexistierende  $\text{CaCO}_3$  - und Ca - reiche Dolomit-Phase bei gleicher Temperatur im Isotopengleichgewicht sind, variieren deren O-18 Verhältnisse ( $\Delta_{\text{DC}}^{18}$ ) zwischen +2 und +4 $^{\circ}/\text{oo}$ . In fossilen Karbonaten sollte also ein  $\Delta_{\text{DC}}^{18}$  - Wert in diesem Bereich charakteristisch für Replacement-Dolomitierung sein, ist der Wert grösser als + 4 $^{\circ}/\text{oo}$ , so muss man eher eine primäre Dolomitansfüllung postulieren, deren Isotopengehalt dann auf eine Gleichgewichtsfraktionierung zwischen idealem Dolomit und dessen Formationswasser zurückzuführen ist.

Die Reihe der gesammelten Proben in der Küstensabkha von Abu Dhabi ist vielleicht vergleichbar mit einer Sequenz von photographischen Aufnahmen einer Bewegung in verschiedenen Aktionszuständen. Die Proben, die genommen werden, repräsentieren einen Uebergangszustand, einen Moment in einem kontinuierlichen Prozess. Falls die Reaktion bis and Ende ablaufen kann, wird

sich der Ca-reiche Dolomit in den Karbonatsedimenten graduell fortschreitend in einen auf geordneten idealen Dolomit umwandeln, das durch die frühe Formation jedoch geprägte Verhältnis der stabilen Isotopen wird erhalten bleiben.

## 5. Summary

An extensive isotopic investigation of carbonate sediments and in situ waters was undertaken on the coastal sabkhas of Abu Dhabi. The diagenetic alteration of the Recent carbonate sediments by a secondary replacement process to form calcium-rich dolomites was of primary interest. The study of this alteration, which is presently occurring, offered a unique opportunity to gain information about dolomitization, specifically, the chemical mechanism and the conditions necessary for its occurrence. The proposed goals of the thesis project were accomplished and interesting insights were gained into the process of secondary replacement dolomitization.

The first objective was to study isotopically the sabkha waters, to identify their source and circulation pattern. The isotopic data revealed a more complicated natural alteration of the Abu Dhabi waters than would be found in temperate or tropical zones. Interpretation of the data required an emphasis on the importance of evaporation processes related to the extreme aridity of the environment. Although the principles of isotope hydrology are well established, their application to waters from arid climates has not been extensive. Unraveling the Abu Dhabi data according to these principles, as applied in an arid environment, added a very interesting aspect to the interpretation of the data. One important result was the discovery of the major role played by local precipitation. It was found to directly recharge the ground water aquifers as well as make a large contribution to the meteoric waters under the sabkha. The isotope hydrology of arid lands provides interesting potential for worthwhile, future research.

The sabkha waters were labeled chemically according to their origin, marine or continental. A further subdivision was distinguished (1) between supratidal flooding waters from the open sea and from the shallow lagoons, and (2) between continental waters from the horizontal-flowing aquifer and from direct precipitation. The distribution pattern from this four-fold origin was complex but discernable through the application of the principles of stable isotope fractionation in combination with bromide and



potassium concentration data. With the additional aid of the tritium content, cycles of downward movement were deduced during times of recharge by supratidal flooding or the less frequent rain floods. An average rate of 11.2 cm/yr for the downward movement was calculated. During much of the year, a site not flooded experienced evaporation and a general lowering of the water table occurred. In areas with advanced evaporation, when the water table dropped below the piezometric level of the underlying aquifer, water began to move upward from below through the saturated zone.

All three stages of the hydrological cycle are simultaneously in operation on the sabkha. The extent of Stage I, flood recharge from the sea or infrequent rain fall, is variable. Extensive supratidal flooding occurs mainly in the winter during shamal storms, while nearshore flooding occurs almost daily. Stage II, capillary evaporation, occurs everywhere except in areas experiencing flood recharge. Evaporative pumping, Stage III, begins when the water table is lowered below a critical level. In general, there is downward movement of water near the coast and upward movement near the continental edge of the sabkha.

The initial dolomitizing solution are undoubtedly the evaporated marine waters brought to the sabkha by supratidal flooding, which infiltrate and pass downward through the sediments. The chemistry of these waters is modified by evaporation and probably, also by some mixing with continental waters. The first nucleation of dolomite occurs rapidly at high temperatures and produces extremely small crystals ( $< 1\mu$ ) of a high calcium-rich dolomite. Dissolution and reprecipitation of the new dolomite occurs at a lower temperature of approximately 35 °C. This recrystallization process continues to occur even after the dolomite is removed from the marine water zone. The resultant dolomite rhombs are larger (from 5 to 16 $\mu$ ), more stable and less calcium-rich. With time and distance from the coastline, the dolomite begins to show progressively more long range ordering of the Mg-Ca layers within the crystal lattice. This gradual transition appears to occur in the solid state.

The secondary replacement dolomite from Abu Dhabi precipitates directly from solution in isotopic equilibrium with the interstitial waters. As proposed by Fritz and Smith (1970), the oxygen-18 fractionation at equilibrium is between a calcium-rich dolomite and its formation waters. This fractionation is not the same as between ideal dolomite and water but lies closer to the calcite-water fractionation. As a result, when the co-existing calcium carbonate and calcium-rich dolomite phases are in isotopic equilibrium at the same temperature, the difference between their oxygen-18 ratios ( $\Delta_{D-C}^{18}$ ) ranges between +2 to +4 ‰. In ancient carbonate rocks, a  $\Delta_{D-C}^{18}$  value in this range should be indicative of secondary replacement dolomitization. If the value is greater than +4 ‰, the dolomite was more likely a primary precipitate, whose isotopic content results from an equilibrium fractionation between ideal dolomite and the formation waters.

Sampling under the coastal sabkhas of Abu Dhabi is similar to taking many still photographs of a movement in various stages of action. What is sampled is a transition state, one moment during an ongoing process. If the reaction is allowed to continue towards completion, the calcium-rich dolomite in the carbonate sediments will evolve gradually and progressively towards well-ordered, ideal dolomite, but the stable isotopic memory from the early formation will remain.