

## Geochemische und petrographische Untersuchungen an Evaporit-Bohrkernen aus dem Roten Meer

Von Dr. PETER STOFFERS, Heidelberg, und Dr. ROBERT KÜHN, Hannover<sup>1, 2</sup>

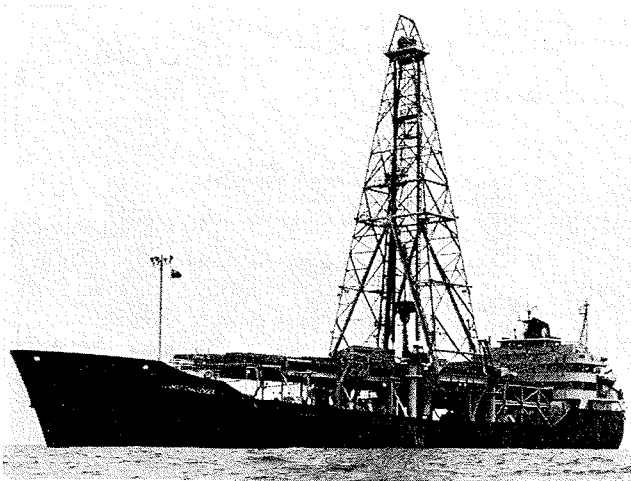


Abb. 1. Bohrschiff „D. V. Glomar Challenger“ (10 500 t, 120 m lang) mit 50 m hohem Bohrturm.

Das im Jahre 1968 begonnene amerikanische „Deep Sea Drilling Project“ hat bei seinen Tiefseebohrungen auf der 23. Fahrt des Bohrschiffes „D. V. Glomar Challenger“ (Abb. 1), die von Colombo bis Djibouti führte, im Roten Meer Evaporite erbohrt. Es sind sechs Bohrungen (225—230) angesetzt worden, deren Lage in Abb. 2 dargestellt ist. Man erkennt darin einen deutlich ausgeprägten tiefen Graben, der sich von den Zubayir-Inseln im Süden bis zur Spitze der Sinai-Halbinsel erstreckt. In dieser sehr intensiv verformten Axialzone, die zwischen 5 und 30 km Breite schwankt, befinden sich die sogenannten „Hot Brine Pools“. Die drei ersten Bohrungen (225—227) lagen teils in dem Hot Brine-Gebiet, teils in seiner unmittelbaren Nähe. Das Gebiet besteht aus drei tiefen Becken, dem Atlantis II-Tief, dem Chain-Tief und dem Discovery-Tief, die von Wasser hoher Salinität und hoher Temperatur überlagert werden [7]<sup>3</sup>. Die Sedimente, die in den Tiefs abgelagert sind, besonders im Atlantis II-Tief, sind reich an Schwermetallen, u. a. an Eisen, Mangan, Zink und Kupfer [3, 2].

Eine zusammenfassende Stratigraphie der einzelnen Bohrungen stellt Abb. 3 dar.

Bohrung 225 lag 16 km östlich des Atlantis II-Tiefs in einer Wassertiefe von 1 228 m. Es wurden 227 Meter

<sup>1</sup> Wiedergabe eines Vortrages der 1. Tagung der Kaliforschungsgemeinschaft am 6./7. Juni 1973 in Hannover.

<sup>2</sup> Anschriften der Verfasser:

Dr. rer. nat. PETER STOFFERS, Laboratorium für Sedimentforschung an der Universität Heidelberg, 69 Heidelberg, Berliner Str. 19,

Dr. phil. ROBERT KÜHN, Kaliforschungs-Institut der Kali und Salz AG, 3 Hannover-Kirchrode, Bemeroder Str. 37.

<sup>3</sup> Die in eckigen Klammern gesetzten Zahlen verweisen auf das am Schluß des Beitrages zitierte Schrifttum.

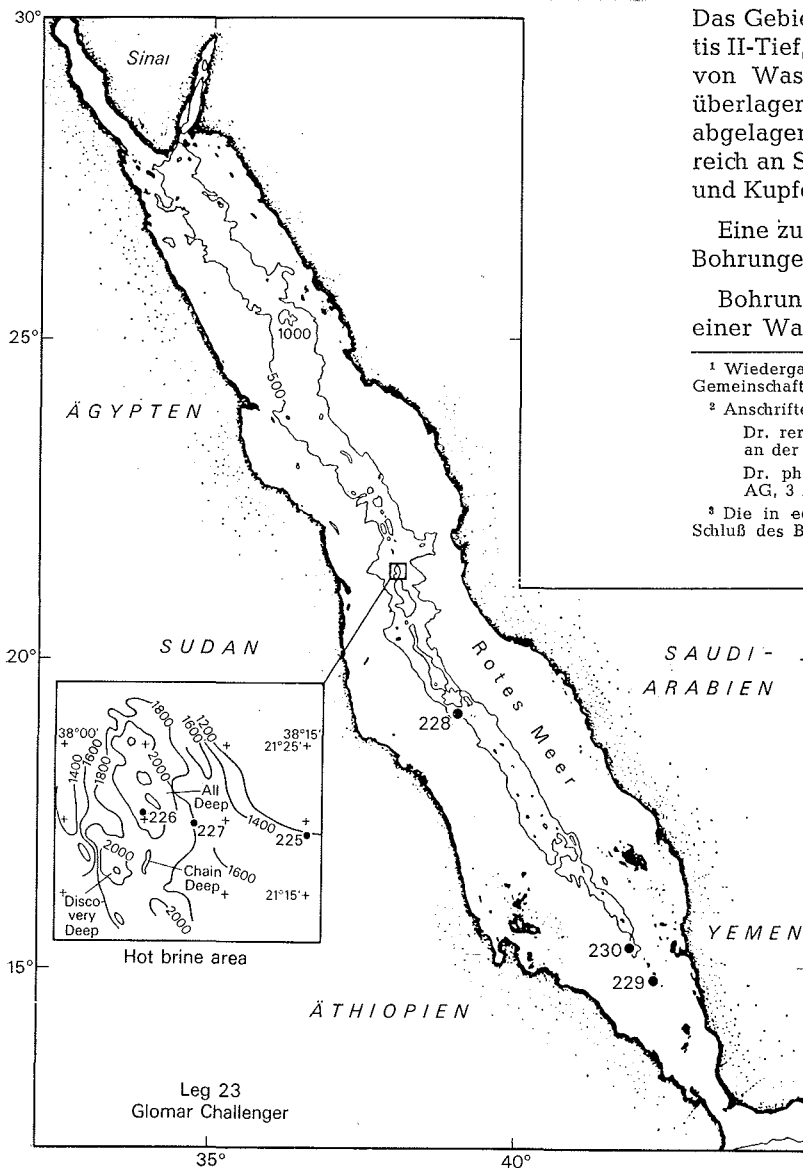


Abb. 2. Geographische Lage der untersuchten Bohrungen (225—230) im Roten Meer.

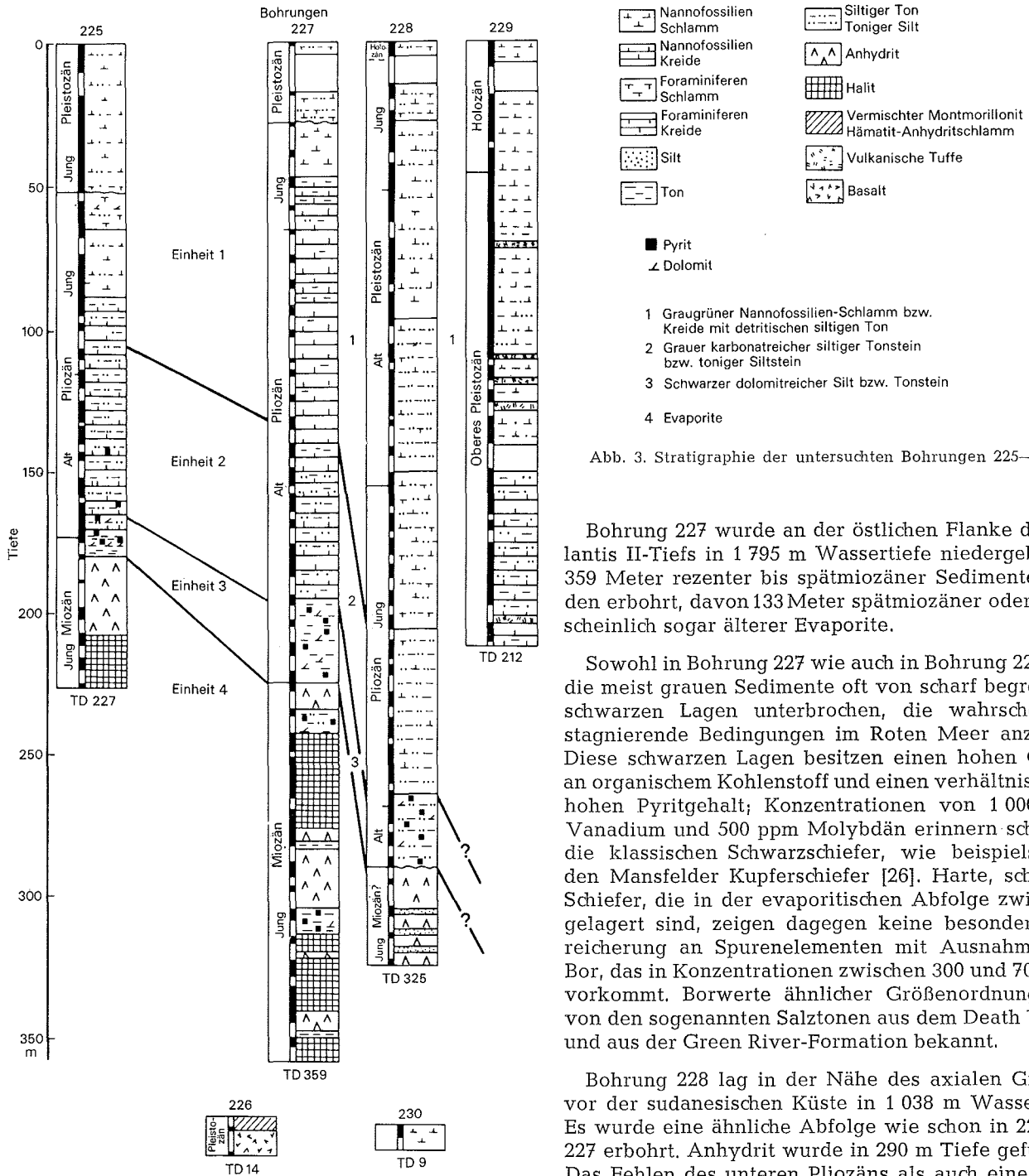


Abb. 3. Stratigraphie der untersuchten Bohrungen 225—230.

Bohrung 227 wurde an der östlichen Flanke des Atlantis II-Tiefs in 1 795 m Wassertiefe niedergebracht. 359 Meter rezenter bis spätmiozäner Sedimente wurden erbohrt, davon 133 Meter spätmiozäner oder wahrscheinlich sogar älterer Evaporite.

Sowohl in Bohrung 227 wie auch in Bohrung 225 sind die meist grauen Sedimente oft von scharf begrenzten schwarzen Lagen unterbrochen, die wahrscheinlich stagnierende Bedingungen im Roten Meer anzeigen. Diese schwarzen Lagen besitzen einen hohen Gehalt an organischem Kohlenstoff und einen verhältnismäßig hohen Pyritgehalt; Konzentrationen von 1 000 ppm Vanadium und 500 ppm Molybdän erinnern schon an die klassischen Schwarzschiefer, wie beispielsweise den Mansfelder Kupferschiefer [26]. Harte, schwarze Schiefer, die in der evaporitischen Abfolge zwischenlagert sind, zeigen dagegen keine besondere Anreicherung an Spurenelementen mit Ausnahme von Bor, das in Konzentrationen zwischen 300 und 700 ppm vorkommt. Borwerte ähnlicher Größenordnung sind von den sogenannten Salztönen aus dem Death Valley und aus der Green River-Formation bekannt.

Bohrung 228 lag in der Nähe des axialen Grabens vor der sudanesischen Küste in 1 038 m Wassertiefe. Es wurde eine ähnliche Abfolge wie schon in 225 und 227 erbohrt. Anhydrit wurde in 290 m Tiefe gefunden. Das Fehlen des unteren Pliozäns als auch eine intensive Breccienbildung in den unteren Kernen läßt auf starke tektonische Bewegung schließen. Schwarze Schiefer, die zusammen mit dem Anhydrit gefunden wurden, sind durch Zinkkonzentrationen in der Größenordnung von 0,5—5% Zn gekennzeichnet. Sphalerit wie auch Pyrit treten in dünnen einzelnen Lagen im Sediment auf.

Bohrung 229 lag im südlichsten Teil des Rotmeriftsystems in 852 m Wassertiefe. Die spätquartären bis rezenten Sedimente sind vereinzelt von harten verfestigten Tufflagen unterbrochen. Die Bohrung mußte, ohne die Evaporite erreicht zu haben, in 212 m Tiefe abgebrochen werden, da die Sedimente zunehmend gasreicher wurden.

Sedimente kontinuierlich erbohrt, und zwar 177 Meter spätmiozäne bis rezente karbonatreiche marine Sedimente mit wechselnden detritischen Anteilen und 50 Meter Evaporite.

Bohrung 226 wurde im südwestlichen Teil des Atlantis II-Tiefs in einer Wassertiefe von 2 169 m angesetzt, mußte aber nach vier erfolglosen Versuchen vorzeitig abgebrochen werden, weil es nicht gelang, den nach wenigen Metern Sediment auftretenden Basalt zu durchteufen. 14 Meter metallreicher Sedimente zusammen mit zerkleinerten tholeyitischen Basaltbruchstücken wurden erhalten.

Bohrung 230 wurde an der Westseite des axialen Grabens bei den Zubayir-Inseln in 832 m Wassertiefe angesetzt, mußte aber wegen schlechten Wetters nach nur 9 m Kerngewinn aufgegeben werden. Im Porenwasser dieses Kerns war eine Zunahme der Salinität um 50 ‰ festzustellen, die vermuten läßt, daß der akustische Reflektor auf den seismischen Profilen ebenfalls aus miozänen Evaporiten besteht.

### Geochemische Untersuchungen

Zur Charakterisierung von Salzlagerstätten haben geochemische Untersuchungsmethoden immer mehr an Bedeutung gewonnen. Brom, Rubidium und Strontium sind dabei von besonderem Interesse für das Studium von Stein- und Kalisalzen, Anhydrit und Gips.

Als wichtigstes Leitelement chloridischer Salzablagerung hat sich lagerstättenkundlich das Brom erwiesen. Der Brom-Gehalt gilt als Maß für den Konzentrationsgrad der Mutterlauge, aus der das Salz auskristallisiert ist. Ein allererster Halit aus eindunstendem Meerwasser hat 0,005—0,007 Gew.-% Br. In der Anhydritregion steigt der Br-Gehalt des Halits bis auf etwa 0,016 Gew.-%. Die Polyhalitregion weist Br-Gehalte von 0,017—0,023 Gew.-% im Halit auf. Der paragenetische Halit der eigentlichen Kaliregionen enthält über 0,023 Gew.-% Br und erreicht in der hangenden Carnallitregion einen Höchstwert von 0,05 Gew.-%.

Die Bromwerte der untersuchten Steinsalz-Proben aus den Bohrungen 225 und 227 in Zahlentafel 1 entsprechen durchweg primärer Abscheidung, und zwar im Bereich einer Anhydritregion bis beginnender Polyhalitregion im Sinne von VAN'T HOFF. Die Konzentration einer Polyhalitregion ist in Bohrung 227 nach dem Hangenden zu erreicht (bei den Proben 227/33/1). In Extrapolation des Bromanstiegs wäre hierüber ein Kalilager zu erwarten, das nicht angetroffen wurde, da der Kernverlust in den Bohrungen recht erheblich war. Porenwasser-Untersuchungen der zwischengeschalteten schwarzen Schiefer lassen aber vermuten, daß speziell in Bohrung 227 ursprünglich auch Evaporite aus höher konzentrierten Mutterlaugen vorhanden waren. Nach MANHEIM u. a. [25] deutet der Chemismus des Porenwassers auf Mineralien der Bischofit-Tachhydrit-Gruppe<sup>4</sup> hin.

Auffallend ist, daß manche der untersuchten Proben schon einen merklichen Polyhalitgehalt aufweisen, obwohl der Br-Gehalt noch einer Anhydritregion entspricht (Proben 225/29/3/40-45 und 227/45/1). Es ist anzunehmen, daß hier Polyhalit in einem relativ flachen Becken synsedimentär aus Anhydrit entstanden ist, etwa in der Art wie es HOLSER [17] von der rezenten Lagune Ojo de Liebre im Kalifornischen Golf beschrieben hat. Unter solchen Bedingungen kann Polyhalit offenbar schon bei verhältnismäßig niedriger Br-Konzentration der Mutterlauge auftreten.

Nach dem Verlauf des Br in den Profilen stellen die Proben der Bohrung 225 eine rückläufige Folge dar; es ist also eine allmähliche Laugenverdünnung eingetreten, während das liegendste Steinsalz noch längst nicht erreicht war. Die Proben der Bohrung 227 zeigen gemäß generellem Br-Anstieg ein normales Eindun-

Zahlentafel 1. Analysen von Steinsalzproben aus den Bohrungen 225 und 227 (in Gew.-%).

Probe	% NaCl	% Polyhalit (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> MgSO <sub>4</sub> 2CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	Br % pro 100 NaCl
23/225/27/2/110-112	98,85	0,16	0,0061
23/225/28/1/100-105	99,28	0,16	0,0059
23/225/28/3/ 95-105 oben	84,33	0,16	0,0049
23/225/28/3/ 95-105 unten	99,33	0,08	0,0055
23/225/29/2/125-130	95,33	3,52	0,0126
23/225/29/3/ 40- 45 oben	73,91	25,56	0,0137
23/225/29/3/ 40- 45 unten	85,78	14,07	0,0128
23/225/29/3/100-103	89,44	1,56	0,0129
23/227/30/2/ 97-101	97,35	0,16	0,0035
23/227/30/2/120-124	94,55	0,16	0,0124
23/227/32/2/135-140	95,16	3,52	0,0161
23/227/32/5/ 80- 85	98,90	1,29	0,0160
23/227/33/1/ 80- 84	98,81	1,25	0,0167
23/227/33/1/130-133	97,02	2,75	0,0165
23/227/33/2/100-105	99,10	1,15	0,0159
23/227/34/2/ 77- 80	98,44	0,36	0,0141
23/227/35/1/143-150 oben	99,27	0,06	0,0097
23/227/35/1/143-150 Mitte	96,74	0,06	0,0093
23/227/35/1/143-150 unten	97,80	0,06	0,0094
23/227/35/3/ 53- 60	93,81	0,00	0,0085
23/227/35/5/115-123	36,79	0,16	0,0060
23/227/41/1/1~105-110	98,22	0,04	0,0084
23/227/42/1/100-103	99,84	0,16	0,0083
23/227/42/2/125-130	94,98	0,38	0,0078
23/227/43/2/ 20- 25 oben	98,90	0,08	0,0072
23/227/43/2/ 20- 25 unten	97,59	0,16	0,0069
23/227/43/5/128-136	91,63	0,00	0,0054
23/227/45/1/ 75- 80	90,79	8,77	0,0132
23/227/45/1/112-117	92,80	7,16	0,0098

stungsprofil, etwa von einem ersten Halit bis nahe zur Polyhalitregion. Die vorhandenen Br-Schwankungen deuten aber auf Laugenfluktuationen<sup>5</sup> und starke Verdünnungen durch Nachflüsse, indem der Br-Gehalt gelegentlich bis an die Grenze eines ersten Halits — also an die Untergrenze der Steinsalzabscheidung — sinkt (etwa bei den Proben 227/43/5 und 227/35/5). Am Hangenden (Probe 227/30) erfolgte eine Verdünnung, wobei der niedrige Bromgehalt der hangendsten Partie (Probe 227/30/2) auf eine sehr starke Verdünnung deutet; dieses Salz dürfte deszendiert umkristallisiert sein. Nach dem Br-Gehalt der liegendsten Probe hat auch dieses Profil noch nicht die Liegendgrenze des Steinsalzes erreicht.

Versuchsweise wurde nach der Methode von KÜHN [22] aus den Br-Gehalten von je zwei Proben aus einem ausgesprochenen Eindunstungsstadium innerhalb eines Jahresringes die Größenordnung der entsprechenden Mutterlagentiefe ermittelt, wobei mit dem Konzentrationsfaktor der Polyhalitregion  $f = 12,3$  gerechnet wurde. Wie aus Zahlentafel 2 hervorgeht, liegen die ermittelten Werte zwischen 5 und 7,5 m.

Als weiteres geochemisches Leitelement bei genetischen Ableitungen der Kalisalze wurde das Rubidium,

<sup>4</sup> (MgCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O) — (CaMg<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub> · 12H<sub>2</sub>O)

<sup>5</sup> Auch Wechsellagerungen von anhydritischen und dolomitisch-tonigen Schichten mit Steinsalzpaketen lassen auf Laugenfluktuationen schließen.

Zahlentafel 2. Ermittlung der Mutterlaugentiefe nach KÜHN [22].

Proben Nr.	Bromgehalt		Mächtigkeit- abstand der beiden Proben m	Mutterlaugentiefe $\frac{b_2 \cdot m}{b_2 - b_1} \cdot f$
	obere Probe $b_2$	untere Probe $b_1$		
225/29/3	0,0137 %	0,0128 %	0,025	4,7
227/35/1	0,0097 %	0,0093 %	0,020	5,9
227/43/2	0,0072 %	0,0069 %	0,025	7,4

das einen Teil des Kaliums in den Kalisalzen diadoch vertreten kann, bestimmt, wofür aus den Proben der beiden Bohrungen jeweils diejenige mit dem höchsten Polyhalit-Gehalt ausgewählt wurde:

Probe 225/29/3/40—45 oben: 0,00037 Gew.-% Rb  
 Probe 227/45/1/75—80: 0,00013 Gew.-% Rb.

Bezogen auf den Polyhalit-Gehalt ergibt das in beiden Fällen 0,0014 Gew.-% Rb. Das ist der höchste bisher beobachtete Rb-Gehalt von Polyhalit; vgl. Tabelle 4 bei KÜHN [23]. Einen Rb-Gehalt gleicher Größenordnung hat ein Polyhalit aus Hallstatt: 0,0012 Gew.-% Rb.

Eine Anreicherung des Rb-Gehaltes im normalen Meerwasser (vom Konzentrationsgrad einer Anhydrit-

region) durch Verdunstung in einem solchen Maße, daß Polyhalit mit 0,0014 Gew.-% Rb kristallisiert, ist unwahrscheinlich. Vielmehr ist auf Grund der in den Rotmeer-Evaporiten eingelagerten vulkanischen Einschaltungen (Montmorillonit, Cristobalit, Zeolithe) anzunehmen, daß durch Vulkanismus mit Rb-reichen Thermen oder durch Exhalationen die Mutterlauge an Rb relativ angereichert wurde. Auch bei der Genese der Hallstätter Salzlagerstätte ist unmittelbar benachbarter Vulkanismus belegt: Melaphyr und feine Tufflagen im Salzgebirge [15, 36, 29].

Das dritte Leitelement, das Strontium, das in Calciumsulfat-Mineralien einen kleinen Teil des Ca ersetzt, wurde in 27 Anhydritgesteins-Proben bestimmt; dabei muß berücksichtigt werden, daß bei höheren Sr-Gehalten auch Cölestin auftreten kann. Wie aus Zahlentafel 3 hervorgeht, liegt der geochemisch übliche Parameter  $\frac{\text{Sr}}{\text{Ca}} \cdot 1000$  [28 und 27] zwi-

schen 3,5 und 24,9. Wenn man den „Ausreißer“ 24,9 (Probe 227/36/2/73—76) außer acht läßt, ergibt sich ein Mittelwert von  $7,4 \pm 2,3$ , der — nach den vorliegenden Erfahrungen — im Bereich ozeanischer Anhydritgesteine liegt, wo gerade mit der Abscheidung von

Zahlentafel 3. Analysen von Anhydritgesteinsproben aus den Bohrungen 225, 227 und 228 (in Gew.-%).

Probe	Halit-Anteil*)	Analysenwerte			Parameter $\frac{\text{Sr} \cdot 1000}{\text{Ca}}$	Sr-Gehalt bezogen auf $\text{CaSO}_4$
		$\text{CaSO}_4$ %	$\text{CaCO}_3$ %	Sr %		
23/225/24/1/ 70—74	wenig	96,87	—	0,099	3,47	0,102
23/225/24/1/ 80—85	"	98,21	—	0,159	5,50	0,162
23/225/26/1/140—144	"	99,84	—	0,166	5,65	0,166
23/225/26/2/133—136	"	99,50	—	0,170	5,80	0,170
23/225/27/1/119—122	"	96,51	—	0,195	6,86	0,203
23/225/27/2/ 85—87	"	98,67	—	0,234	8,36	0,246
23/225/29/1/133—136	"	100,20	—	0,212	7,19	0,211
23/225/29/2/ 10—20	"	99,33	—	0,232	7,93	0,233
23/227/30/2/ 43—45	viel	99,82	—	0,442	15,04	0,443
23/227/36/2/ 73—76	"	67,50	—	0,495	24,91	0,733
23/227/35/CC	"	96,80	—	0,232	8,14	0,239
23/227/38/1/130—134	"	100,08	—	0,205	6,96	0,205
23/227/41/1/147—150	"	94,59	—	0,212	7,61	0,224
23/227/44/1/ 90—92	"	99,86	—	0,212	7,21	0,212
23/227/44/2/ 48—50	"	81,97	—	0,227	9,41	0,277
23/227/44/2/ 65—70	"	100,28	—	0,193	6,54	0,192
23/228/35/1/133—135	kein	82,92	—	0,256	10,49	0,308
23/228/35/2/ 14—17	"	83,91	—	0,163	6,60	0,194
23/228/35/2/116—119	"	96,56	—	0,223	7,85	0,230
23/228/35/2/120—125	"	98,41	—	0,155	5,35	0,157
23/228/36/1/133—134	"	99,69	—	0,415	15,37	0,452
23/228/37/1/145—147	"	90,76	—	0,313	11,71	0,344
23/228/39/1/120—122	"	91,90	—	0,150	5,55	0,163
23/225/24/1/ 60—63	kein	1,92	49,28	0,134	6,60	(~ 2,2)
23/225/26/1/ 13—16	"	11,10	31,49	0,113	7,12	~ 0,82
23/227/31/CC	viel	1,17	3,55	0,015	8,47	~ 1,02
23/227/36/3/ 5—7	kein	74,12	1,32	0,156	6,98	~ 0,19

\*) Die Angaben über akzessorischen Halit, gemäß Dünnschliffbild getroffen, sind nur relativ zu werten.

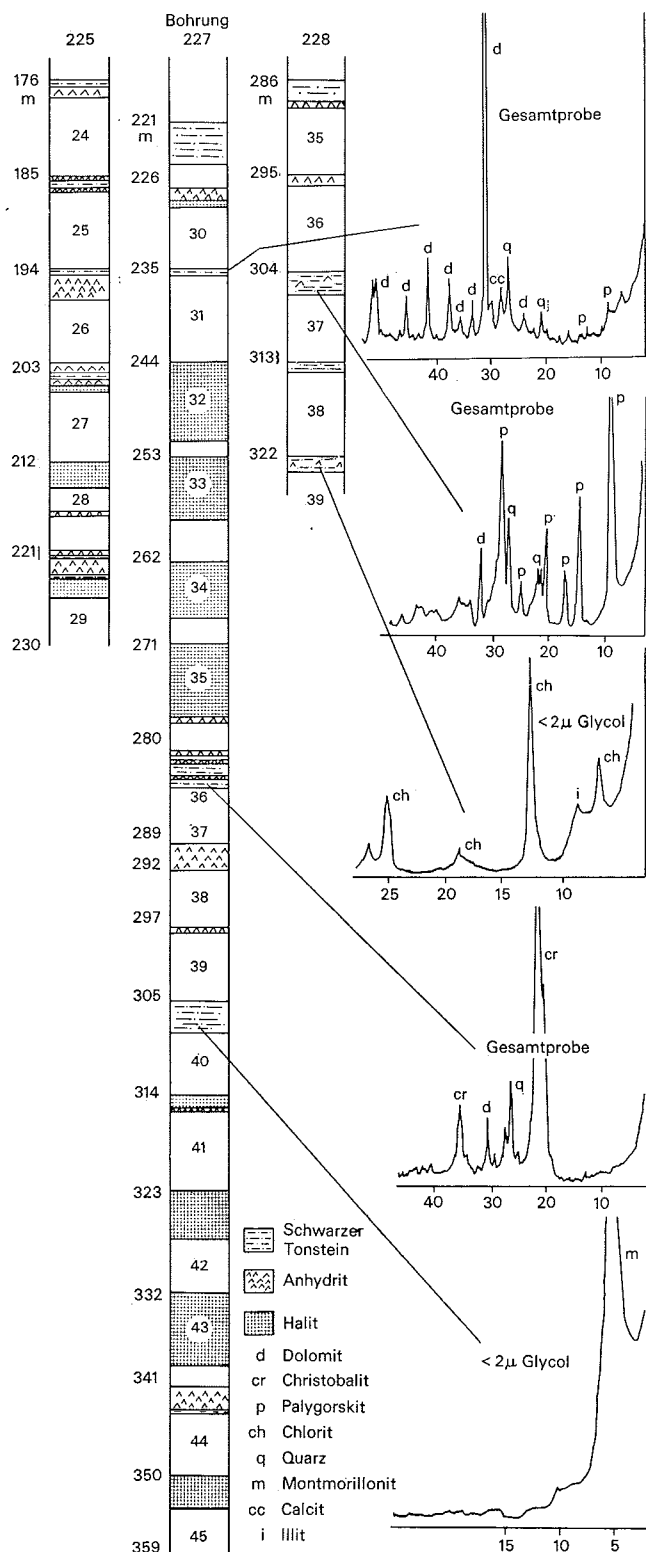


Abb. 4. Stratigraphie der Evaporite von Bohrung 225, 227 und 228 mit Röntgendiagrammen der schwarzen Schiefer. Bulk = Gesamtprobe.

Cölestin zu rechnen ist. Die hohe Streuung von 31 % läßt auf uneinheitliche Ablagerungen schließen, die wahrscheinlich durch hohe Beteiligung von Festlandszuflüssen oder Laugenfluktuationen zu erklären sind.

Nach neuesten Forschungsergebnissen von Uzdowski [34] über das allgemeine geochemische Verhalten des

Sr in Calciumsulfat-Mineralien enthalten ozeane Gipse, die fröhdiagenetisch in Anhydrit übergegangen sind, bis 0,229 % Sr bezogen auf  $\text{CaSO}_4$ , unmittelbar primäre Anhydrite hingegen mehr als 0,229 % Sr. Von den Anhydritproben in Zahlentafel 3, die sämtlich massigen Anhydritgesteinen entstammen, also in der  $\text{CaSO}_4$ -Phase gebildet worden sind, enthalten rd. drei Fünftel bis 0,229 % Sr bezogen auf  $\text{CaSO}_4$ . Sie sind somit nach Uzdowski als Anhydrit anzusprechen, der diagenetisch aus Gips hervorgegangen ist, während die restlichen rd. zwei Fünftel der Anhydritproben noch nicht innerhalb der NaCl-Phase ausgefallen sind und als primärer Anhydrit angesehen werden müssen.

Zwei Anhydrite der halitischen Phase, aus Jahresringen innerhalb der Steinsalz-Probe 225/28/3/95—105, ergaben je nach der Körnung unterschiedliche Werte:

	< 0,05 mm Dmr	< 0,2 mm Dmr
$\text{CaSO}_4$ -Gehalt (%)	94,57	98,97
Sr-Gehalt (%)	0,142	0,277
$\frac{\text{Sr} \cdot 1000}{\text{Ca}}$	5,10	9,51
Sr-Gehalt bezogen auf $\text{CaSO}_4$ (%)	0,150	0,279

Hiernach ist die feinere Körnung (< 0,05 mm Dmr) diagenetischer Anhydrit, die gröbere Körnung (0,05 bis 0,2 mm Dmr = Hauptmenge) hingegen primärer Anhydrit. Die mit der Körnung unterschiedlichen Sr-Gehalte der Jahresringe, die als kleine Rekurrenzen in die  $\text{CaSO}_4$ -Phase der Eindunstung aufzufassen sind, gehen also auf verschiedene Phasen der primären  $\text{CaSO}_4$ -Ausscheidung zurück, wobei die Gipsphase die geringere gewesen ist.

#### Petrographische Untersuchungen

Die Stratigraphie<sup>6</sup> der Evaporite in den Bohrungen 225, 227 und 228 zeigt Abb. 4, in der zugleich einige Röntgendiagramme als Beispiele für die unterschiedliche mineralogische Zusammensetzung der zwischengelagerten schwarzen Schiefer herausgezeichnet sind.

Im Hangenden bestehen die schwarzen Schiefer größtenteils aus Dolomit, was auf starke Laugenverdünnung hinweist, im liegenden Teil dagegen hauptsächlich aus Montmorillonit, Cristobalit und Zeolithen (Clinoptilolit und Analcim). Diese Mineralien (Abb. 5) sind wahrscheinlich durch Umwandlung aus vulkanischem Material äolischer Herkunft entstanden, das zwischen den Evaporiten abgelagert war. Häufig finden sich neben Cristobalit nicht nur, wie Abb. 6 und 7 zeigen, Quarzin ( $\text{SiO}_2$  faserig gestreckt nach der a-Achse), sondern auch gemäß Abb. 8 kolloidale  $\text{SiO}_2$ -Strukturen. Dieses Material ist mineralogisch kristallin; die Strukturen beweisen aber den kolloidalen Ursprung als relative Neubildung vielleicht aus folgender Abfolge:

Diatomeen (oder vulkanisches Material) → Cristobalit → Tektonik (zerbrochen) → ausgeheilt (Quar-

<sup>6</sup> Die Petrographie der miozänen Rotmeerevaporite ist ausführlich bei STOFFERS und KÜHN [33] behandelt.



Abb. 5. Bohrkern mit Einschaltung von schwarzem vulkanischem Material.

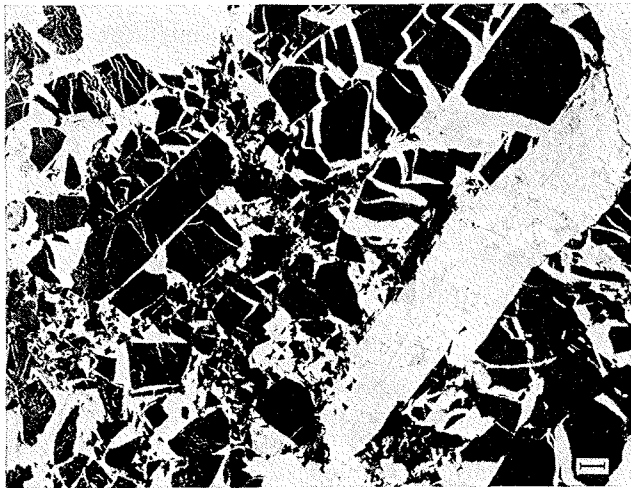


Abb. 6. Dünnschliff von zerbrochenem cristobalitischem Schiefer (dunkel) mit Quarzingang in einer Steinsalzmatrix (hell). Maßstab entspricht 1 mm.

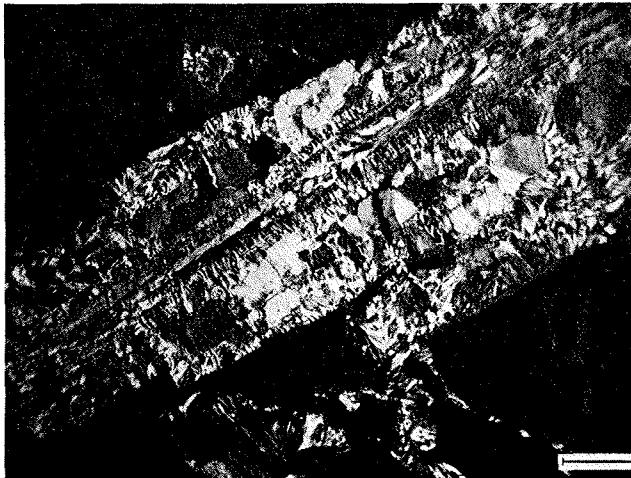


Abb. 7. Vergrößerter Ausschnitt aus Abb. 6 mit Quarzin in zerbrochenem cristobalitischem Schiefer (schwarz), Steinsalzmatrix (grau). Teilweise gekreuzte Nicols. Maßstab entspricht 1 mm.

zinadern) → Anlösung des  $\text{SiO}_2$  → Neuausfällung in der Evaporitmasse.

Der primäre Anhydrit mit sehr feinkörnigem Magnetit in Abb. 9 unterscheidet sich deutlich von dem diagenetischen Anhydrit in Abb. 10 mit seinen typisch grobfächerigen metablastischen Partien.

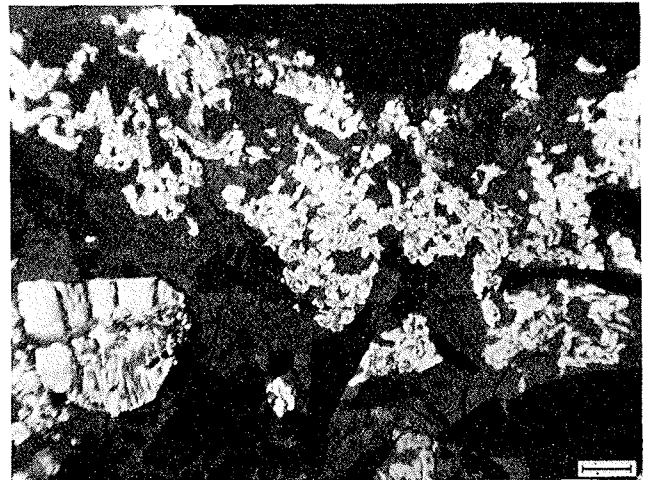


Abb. 8. Dünnschliff von gekrümmten  $\text{SiO}_2$ -Strukturen (hell) und zerbrochenem cristobalitischem Schiefer (schwarz) in Steinsalzmatrix (grau). Teilweise gekreuzte Nicols. Maßstab entspricht 0,5 mm.

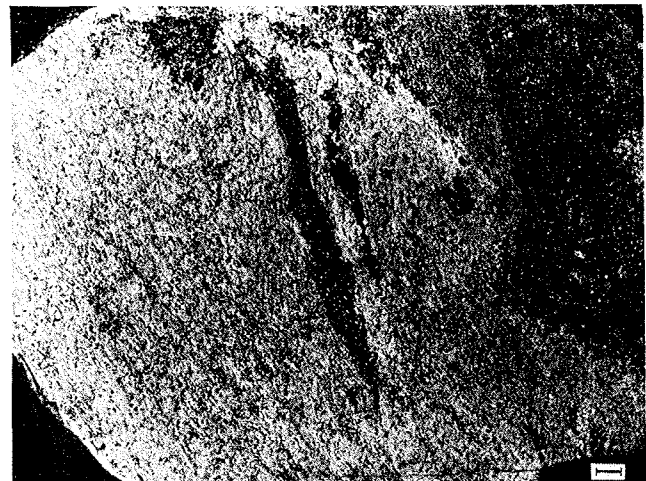


Abb. 9. Primärer Anhydrit mit Magnetit (fein, dunkel, Probe 227/36/2). Orientierter Dünnschliff, gekreuzte Nicols. Maßstab entspricht 1 mm.

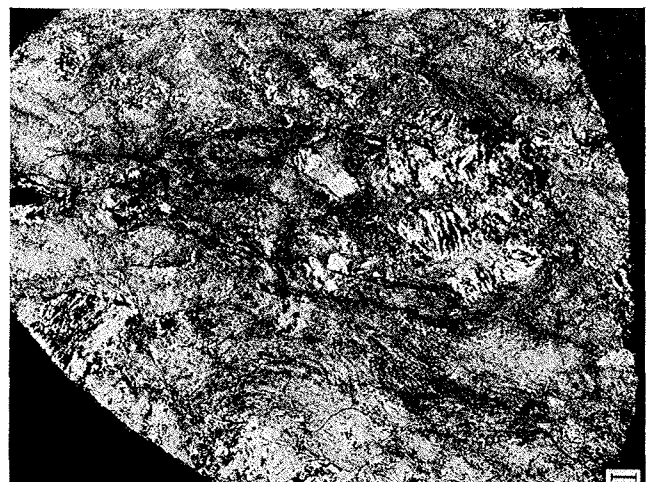


Abb. 10. Diagenetischer Anhydrit mit typisch grobfächerigen metablastischen Partien (Probe 225/26/1). Orientierter Dünnschliff, gekreuzte Nicols. Maßstab entspricht 1 mm.

Bei dem Steinsalz kern in Abb. 11 erscheinen infolge der leichteren Löslichkeit des Salzes die anhydritischen Lagen (Jahresringe) als herausragende Rippen. In einem Dünnschliff der Probe 227/42/1, der in Abb. 12 wiedergegeben ist, erweist sich das Steinsalz als relativ grobkörnig und der anhydritische Jahresring als etwas zerteilt. Auffallend ist in Abb. 11 auch der Wechsel von grauem und hellem Steinsalz. Das graue Salz zeigt im Dünnschliff (Abb. 13 und 14) eingewachsenen Polyhalit; besonders hervorzuheben sind in Abb. 14 die typischen Trichter- bzw. Tressenstrukturen, die nach DELLWIG [8] Kennzeichen primärer Oberflächenkristallisation darstellen.

#### Ursprung und genetische Deutung der Evaporite

Getrennte große Hebungen an den Flanken des Roten Meeres schufen während des späten Eozäns und frühen Oligozäns die äthiopischen und arabischen Schwellen. Die miozäne Transgression des Mittelmeeres in die zwischen den Schwellen liegende „Prä-Rotmeer“-Depression führte zu mächtigen Evaporit-



Abb. 11. Steinsalz kern mit anhydritischen Einschaltungen und Wechsel von hellem und dunklem Steinsalz (225/28).

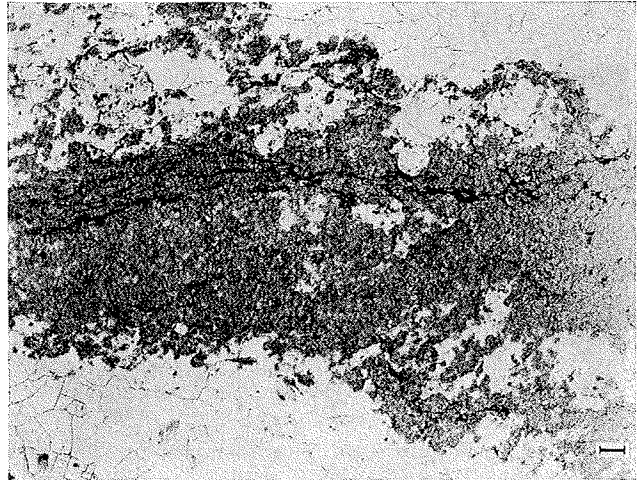


Abb. 12. Grobkörniges Steinsalz mit anhydritischem „Jahresring“ (227/42/1). Orientierter Dünnschliff. Maßstab entspricht 1 mm.



Abb. 13. In Steinsalz (grau) nesterartig eingewachsener nadeliger Polyhalit (hell). Dünnschliff der Probe 225/29/2. Teilweise gekreuzte Nicols. Maßstab entspricht 0,5 mm.

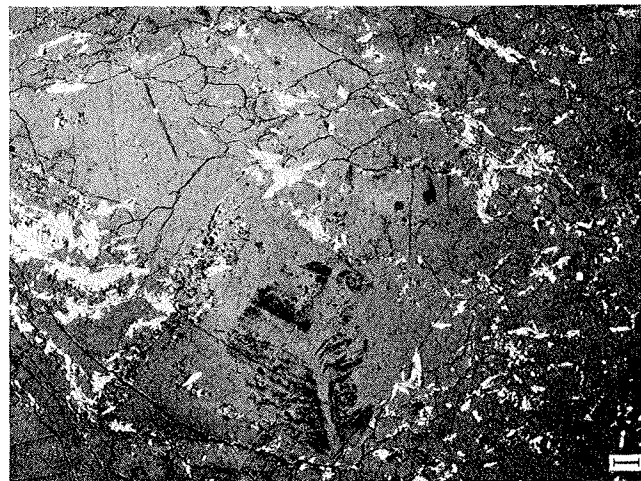


Abb. 14. Steinsalz (grau) mit verstreut eingewachsenem Polyhalit (hell). Außerdem Tressenstrukturen im Steinsalz (Probe 227/45/1). Orientierter Dünnschliff. Teilweise gekreuzte Nicols. Maßstab entspricht 1 mm.

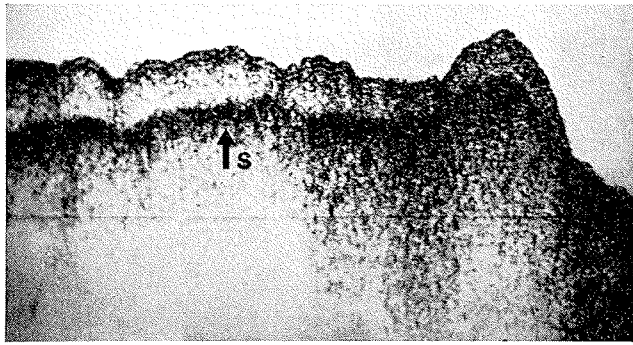


Abb. 15. Seismisches Profil in der Nähe der Bohrung 225. Reflektor S stellt die Oberkante der miozänen Evaporite dar.

ablagerungen [6], die reflexionsseismisch zu erkennen sind (Abb. 15). Der markante „S-Reflektor“, der durch das gesamte Rote Meer zu verfolgen ist, stellt die Oberkante der miozänen Evaporite dar. Er ist identisch mit dem Reflektor M aus dem Mittelmeer, der ebenfalls miozänen Evaporiten entspricht [18]. Die Rotmeerevaporite sind also altersgleich mit den Evaporiten, die auf der 13. Fahrt der „Glomar Challenger“ im Mittelmeer erbohrt wurden.

Bei der Interpretation fossiler Evaporitlagerstätten ergeben sich zwei Fragen: einmal nach der Tiefe des Beckens, in welchem die Evaporite abgelagert wurden, zum anderen ob die Evaporite unter Flach- oder Tiefwasserbedingungen abgeschieden wurden.

Die Entdeckung rezenter Sebkhass<sup>7</sup> in Tunis, Baja California und besonders bei Abu Dhabi an der arabischen Seite des Persischen Golfes (Trucial Coast) gab Anlaß, neue Modelle für die Interpretation von Evaporitablagerungen zu entwickeln [31, 20, 21, 9, 19, 5 u. a.]. Rezente Sebkhass sind vor allem charakterisiert durch das Vorkommen von Stromatolithen (Blaugrünalgenmatten), Knollengips und Knollenanhydrit, „flat

<sup>7</sup> Salzmarschen, die gelegentlich überflutet werden.

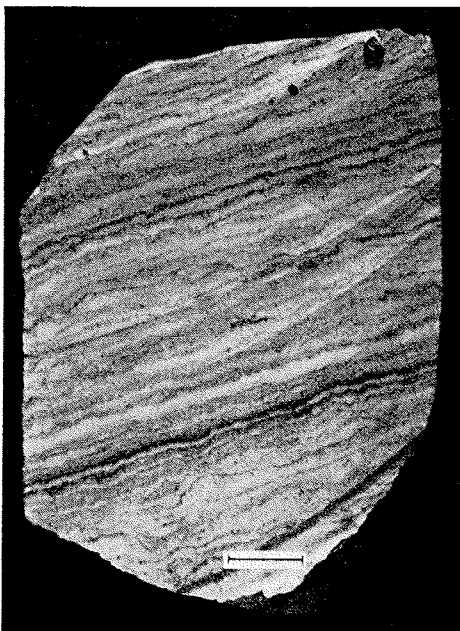


Abb. 16. Anhydritkern mit feinschichtiger dolomitischer Wechselagerung (Probe 225/24/1). Maßstab entspricht 1 cm.

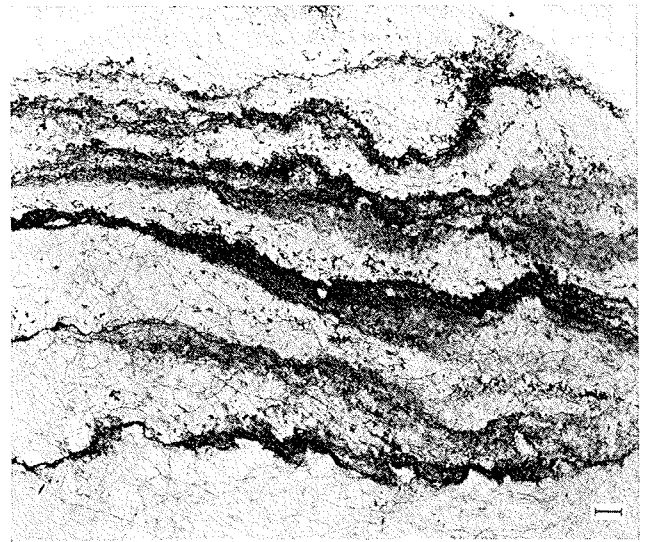


Abb. 17. Vergrößerter Ausschnitt aus Abb. 16 als Dünnschliff. Die dunklen Schlieren bestehen aus feinkörnigem Dolomit zusammen mit opaker organischer Substanz. Maßstab entspricht 1 mm.

pebble“-Konglomeraten und polygonalen Schrumpfungsrissen. Betrachtet man fossile Salzlagerstätten unter diesen Gesichtspunkten, so findet man viele typische Sebkhass-Eigenschaften. Dies spricht dafür, daß in den Salzlagerstätten in geologischer Vergangenheit — wenigstens zeitweise — Sebkhass-Verhältnisse geherrscht haben [14, 35, 16, 32, 11, 12].

In den Rotmeerkernen wurden Algenmatten gefunden, die teilweise als Stromatolithen (Abb. 16, 17) und Onkolithen gedeutet werden können. Sowohl diese Algenstrukturen als auch Knollenanhydriten (Abb. 18), die mit den oberhalb der Flut entstandenen Knollenanhydriten rezenter Sebkhass-Ablagerungen zu vergleichen sind, sprechen für eine Entstehung in flachem



Abb. 18. Typischer Knollenanhydrit. Die einzelnen Knollen sind von grünlichen dolomitischen Säumen umgeben (Probe 225/29/2). Maßstab entspricht 1 cm.



Wasser. Hiermit stimmt überein, daß mit Hilfe des Bromgehaltes Mutterlaugentiefen in der Größenordnung von 5—8 m ermittelt wurden (s. S. 292). In jüngster Zeit durchgeführte Isotopenuntersuchungen [24 und 13] zeigen einen deutlichen Süßwassereinfluß, der nur mit sehr flachem Wasser erklärt werden kann. Dasselbe gilt für die von MANHEIM [26] festgestellten großen Schwankungen in der Zusammensetzung des Porenwassers.

Die hiernach berechnete Annahme einer Flachwasser-Ablagerung gestattet noch keine Schlüsse auf die Gesamttiefe des Beckens. Die Hauptschwierigkeit bei der Interpretation fossiler Salzlagerstätten ist die von SCHMALZ [30] ausführlich diskutierte Diskrepanz zwischen der Geschwindigkeit der Salzabscheidung im Vergleich zur möglichen Senkungsgeschwindigkeit des Beckens. Diese Diskrepanz ist nach SCHMALZ mit einem „Deep Water—Deep Basin Model“ (Tiefwasser—Tiefbecken-Modell) in der Weise zu erklären, daß die Salze in Becken von einigen hundert bis einigen tausend Metern Tiefe abgelagert wurden<sup>8</sup>.

Die paläogeographische Rekonstruktion des Roten Meeres [4 u. 6] läßt vermuten, daß die „Prä-Rotmeersenke“ eine topographische Depression von beträchtlicher Tiefe gewesen ist. Tiefbohrungen zeigen, daß im Miozän mächtige klastische Sedimente (2—3 km) und Evaporite (3—4 km) in dieser Senke abgelagert wurden [1]. Auch in unseren Bohrungen findet sich eingeschaltetes klastisches Material (Abb. 19). Diese Ergebnisse sind schwer mit einem „Shallow Water—Shallow Basin Model“ (Flachwasser—Flachbeckenmodell) in Einklang zu bringen. Die Bohrresultate sprechen mit ziemlicher Sicherheit für eine Ablagerung in einem tiefen Becken.

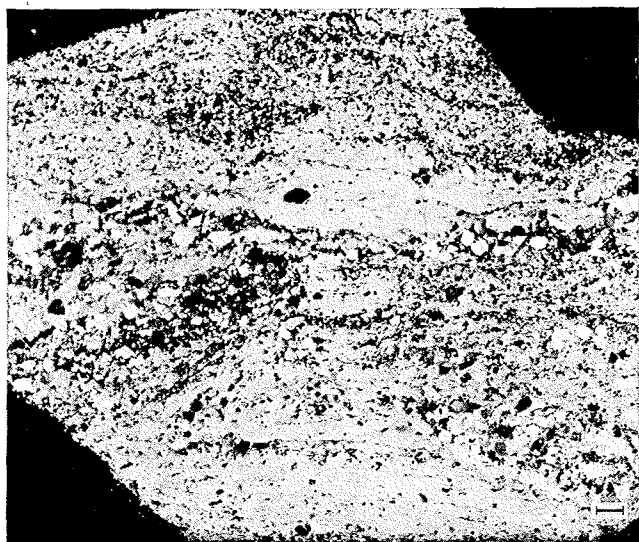


Abb. 19. Einschaltung von klastischem Material in Anhydrit (Probe 228/35/2). Orientierter Dünnschliff. Gekreuzte Nicols. Maßstab entspricht 1 mm

Zu beantworten bleibt die Frage, ob die Salze — entsprechend dem Modell von SCHMALZ — in tiefem Wasser ausgeschieden wurden oder in sehr flachem Wasser am Boden eines nahezu ausgetrockneten

tiefen Beckens. Diese Frage ist von Hsü u. a. [18] für die Mittelmeer-Evaporite diskutiert worden; sie erachten ein ausgetrocknetes tiefes Becken („desiccated deep basin“) als einzige logische Möglichkeit, die Bildung der miozänen Evaporite im Mittelmeer zu erklären.

Wie im Mittelmeer zeigen die erbohrten Evaporite aus dem Roten Meer typische Kriterien, die für eine Ablagerung unter sehr flachem Wasser sprechen. Die geologischen Bohrinformationen [1 u. 6] deuten auf ein tiefes Becken, in das mächtige klastische Sedimente abgelagert wurden. Es gilt daher als wahrscheinlich, daß die hier untersuchten spätmiozänen Evaporite im Roten Meer (ähnlich wie im Mittelmeer) in einem nahezu ausgetrockneten tiefen Becken ausgeschieden wurden. Dabei muß berücksichtigt werden, daß in der hier vorliegenden Endphase der Evaporitabscheidung sowohl das „desiccated deep basin“ Modell nach Hsü [18] als auch das Tiefwassermodell von SCHMALZ [30] durch typische Flachwasserablagerungen charakterisiert sind; siehe Abb. 8 in [30].

#### Schrifttum

1. AHMED, S. S.: Geology and Petroleum prospects in Eastern Red Sea. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geologists. 56 (1972) S. 707/19.
2. BÄCKER, H., and M. SCHOELL: New deeps with brines and metalliferous sediments in the Red Sea. Nat. Phys. Sci. V. 240 (1972) S. 153/58.
3. BISCHOFF, J. L.: Red Sea Geothermal Brine Deposits. Their Mineralogy, Chemistry, and Genesis. In Hot Brines and Recent Heavy Metal Deposits in the Red Sea. Edit. Degens, E. T. and D. A. Ross. New York: Springer-Verlag 1969, S. 368/401.
4. BROWN, G. F., and R. G. COLEMAN: The tectonic frame work of the Arabian Peninsula. 24th Int. Geol. Cong., Montreal, Sec. 3 (1972) S. 300/305.
5. BUTLER, G. P.: Modern evaporite deposition and geochemistry of coexisting brines, the sabkha, Trucial Coast, Arabian Gulf. J. Sediment. Petrol. 39 (1) (1969) S. 70/89.
6. COLEMAN, R. G.: Geologic background of the Red Sea. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Vol. XXIII (im Druck).
7. DEGENS, E. T., and D. A. ROSS: Hot Brines and Recent Heavy Metal Deposits in the Red Sea. New York: Springer-Verlag 1969. S. 600 ff.
8. DELLWIG, L. F.: Hopper crystals of Halite in the salina of Michigan. Am. Mineralogist V. 38 (1953) S. 730/31.
9. EVANS, G.: The recent sedimentary facies of the Persian Gulf region. Royal Soc. London Philos. Trans., ser. A, V. 259 (1966) S. 291/98.
10. EWING, M., J. L. WORZEL, A. O. BEALL, W. A. BERGGREN, D. BUKRY, C. A. BURK, A. G. FISCHER and E. A. PESSAGNO jr.: Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, V. I. Washington: (U. S. Government Printing Office) 1969. S. 672.
11. FRIEDMAN, G. M.: Significance of Red Sea in Problem of Evaporites and Basinal Limestones. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geologists 56 (1972) Nr. 6 S. 970/83.
12. FRIEDMAN, G. M.: Petrographic Data and Comments on the Depositional Environment of the Miocene Sulfates and Dolomites at Sites 124, 132 and 134, Western Mediterranean Sea. In Ryan, W. B. F., K. J. Hsü et al. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, V. XIII, Washington: (U. S. Government Printing Office) 1972 S. 695/708.

<sup>8</sup> Die Entdeckung von Salzen unter dem Golf von Mexiko [10] stimmt ausgezeichnet mit dem Modell von SCHMALZ überein.

13. FRIEDMAN, J., and K. HARDCASTLE: Deuterium in interstitial waters from Red Sea cores. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, V. XXIII (im Druck).
14. FULLER, J. G. C. M., and J. W. PORTER: Evaporite formations with petroleum reservoirs in Devonian and Mississippian of Alberta, Saskatchewan, and North Dakota. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geologists 53 (1969) S. 909/26.
15. GERHART, H.: Über den Melaphyr von Hallstatt. Tschermark's mineralog. u. petrograph. Mitt. (N. F.) 26 (1907) S. 253/54.
16. HARDIE, L. A., and H. P. EUGSTER: The depositional environment of marine evaporites: a case for shallow, clastic accumulation. Sedimentology, 16 (1971) S. 187.
17. HOLSER, W. T.: Diagenetic polyhalite in recent salt from Baja California. Am. Mineralogist V. 51 (1966) S. 99/109.
18. HSÜ, K. J., M. B. CITA and W. B. F. RYAN: The origin of the Mediterranean evaporites. In Ryan, W. B. F., K. J. Hsü et al. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, V. XIII. Washington: (U. S. Government Printing Office) 1973 S. 1203/33.
19. KENDALL, C. G. St. C., and Sir P. A. D' E. SKIPWITH: Holocene shallow-water carbonate and evaporite sediments of Khor al Bazam, Abu Dhabi, Southwest Persian Gulf. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geologists 53 (1969) S. 841.
20. KINSMAN, D. J. J.: Gypsum and anhydrite of Recent age, Trucial Coast, Persian Gulf. In Raup, J. L., ed., Second Symposium on Salt, Northern Ohio Geol. Soc. Cleveland 1 (1966) S. 302/26.
21. KINSMAN, D. J. J.: Modes of Formation, sedimentary Associations, and diagnostic Features of Shallow-Water and Supratidal Evaporites. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geologists 53 (1969) Nr. 4 S. 830/40.
22. KÜHN, R.: Tiefenberechnung des Zechsteinmeeres nach dem Bromgehalt der Salze. Dtsch. Geol. Ges. 105 (1953) S. 646/63.
23. KÜHN, R.: Zur Kenntnis der Rubidiumgehalte von Kalisalzen ozeanischer Salzlagerstätten nebst einigen lagerstättenkundlichen Ausdeutungen. Geol. Jahrb. 90 (1972) S. 127/220.
24. LAWRENCE, J. R.: Stable oxygen and carbon isotope variations in the pore waters, carbonates and silicates, Sites 225 und 228, Red Sea. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, V. XXIII (im Druck).
25. MANHEIM, F. T., L. S. WATERMAN, C. C. Woo and F. L. SAYLES: Interstitial water studies on small core samples. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, V. XXIII (im Druck).
26. MANHEIM, F. T.: Geochemical Studies of Red Sea cores. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, V. XXIII (im Druck).
27. MÜLLER, Gerhard: Ein Beitrag zur Geochemie des Strontiums in Ca-Sulfat-Gesteinen. Inaugural-Dissertation, Naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Saarbrücken (1964).
28. NOLL, W.: Geochemie des Strontiums. Chemie der Erde 8 (1934) S. 507/600.
29. SCHAUBERGER, O.: Melaphyr (Diabas), Tuffit und Krokydolith im Ischler Salzberg, Österreich. Akad. Wiss. Wien. Mathem. naturwiss. Kl. Nr. 7 (1960) S. 133/36.
30. SCHMALZ, R. F.: Deep-water evaporite deposition: a genetic model. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geologists 53 (1969) S. 759/823.
31. SHEARMAN, D. J.: Recent anhydrite, gypsum, dolomite, halite from the coastal flats of the Arabian shore of the Persian Gulf. Proc. Geol. Soc. London (1963), Nr. 1607, S. 63/64.
32. SHEARMAN, D. J., and J. G. FULLER: Anhydrite diagenesis, calcitration and organic laminites, Winnipegosis Formation, Middle Devonian, Saskatchewan. Bull. Canad. Petrol. Geologists 17 (4) (1969) S. 496/525.
33. STOFFERS, P., and R. KÜHN: Red Sea evaporites: a petrographic and geochemical study. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, V. XXIII (im Druck).
34. USDOWSKI, E.: Das geochemische Verhalten des Strontiums bei der Genese und Diagenese von Ca-Karbonat- und Ca-Sulfat-Mineralien. Contributions to Mineralogy and Petrology V. 38 (1973) S. 177/95.
35. WEST, J. M., A. BRANDON and M. SMITH: A tidal flat evaporitic facies in the Visean of Ireland. J. Sediment. Petrol. 38 (1968) S. 1079/93.
36. ZIRKL, E. J.: Der Melaphyr von Hallstatt. Jahrb. Geol. Bundesanstalt (Wien) 100 (1957) S. 137/77.

*Der erste Autor dankt dem Wissenschaftlerteam und der Crew der 23. Fahrt des Deep Sea Drilling Project für Anregung und gute Zusammenarbeit. Er wurde von einem NATO-Stipendium unterstützt. Der Dank beider Autoren gilt Herrn W. KÜCKING, der die zu dieser Arbeit erforderlichen Dünnschliffe herstellte, und Herrn K. H. RITTER, der die geochemischen Analysen (Br, Rb, Sr) mit großer Sorgfalt ausführte.*