

Abdruck aus:
Fortschritte der Mineralogie, Kristallographie und Petrographie.
Herausgegeben von der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft
unter der Redaktion von Professor Dr. G. LINCK in Jena.
, Sechster Band.
Verlag von Gustav Fischer in Jena.
1920.

Mitteil. a. d. Institut f. Mineralogie
u. Petrographie d. Universität Leipzig.
Neue Folge (seit 1909) No. 16

Die geothermischen Metamorphosen und die Dislokationen der deutschen Kalisalzlagerstätten.

Von

F. Rinne,
Leipzig.

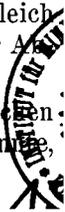
Mit 16 Textfiguren und mit Literaturangaben am Schluß der Abhandlung.

I. Einleitung.

Durch Bohrungen und bergbauliche Betriebe hat man von Posen bis nach Holland, gleichwie von Holstein bis zur Rhön und darüber hinaus dyadische Salzgesteine als Zeugen einer ausgeprägt halurgischen Periode der Geologie Deutschlands nachgewiesen.

Solch gewaltige Verbreitung und die Mächtigkeit der Salzlager bis zu Hunderten von Metern macht sie zu sehr wesentlichen Bestandteilen der Erdschale und somit zu wichtigen Objekten sowohl der Geologie als auch der Petrographie; ihre stoffliche Mannigfaltigkeit und physikalisch-chemische Eigenart stempelt sie zu einem bedeutsamen Gegenstand auch der mineralogischen Forschung. Als günstiges Moment kommt dabei in Betracht die ins außerordentliche gesteigerte Möglichkeit, das Gesteinsmaterial in örtlich ausgedehntem Maße zu studieren: es ist durch zahllose Bohrproben und insbesondere in über 150 Bergwerksbetrieben mit Hunderten von Kilometern Strecken und vielen hallenartigen Ausweitungen erschlossen, Umstände, die zugleich ein Hinweis sind auf die große wirtschaftliche Bedeutung dieser Lagerungen.

Solche Verhältnisse waren die einladende Anregung zu zahlreichen wissenschaftlichen Studien, von denen in vorderster Linie die bekannte



auf immer monumentale große Arbeit J. H. VAN'T HOFF'S und seiner Schüler steht als das erste Beispiel einer systematischen experimentellen physikalisch-chemischen Untersuchung eines Gesteinskomplexes.

Im Sinne, die Kenntnis dieser allgemein bedeutsamen naturkundlichen Dokumente der Geologie des deutschen Landes zu vertiefen und zu verbreitern, wurde von VAN'T HOFF, H. PRECHT und dem Verfasser im Dezember 1905 ein „Verband zur wissenschaftlichen Erforschung der deutschen Kalisalzlagerstätten“ begründet, der, finanziell und durch sonstige Förderung seitens der Kaliindustrie getragen, zahlreiche Arbeiten ins Werk setzen und unterstützen konnte. Dank den Bemühungen der Verbandsmitglieder und dem Interesse, das auch andere Forscher dem Gegenstand entgegenbrachten, ist es nunmehr in der Salzpetrographie zu einer gewissen Abrundung hinsichtlich der grundlegenden Vorstellungen gekommen und zwar mit dem schönen Ergebnis, daß die Untersuchungen der Salzgesteine nicht nur für sich betrachtet, sondern, und insbesondere auch durch den Vergleich mit anderen großen Gesteinsgruppen einen wesentlichen Fortschritt der petrographischen Wissenschaft gezeitigt haben.

In einer früheren Darlegung im Jahrgang 1911 dieser Berichte habe ich in dem Sinne bereits auf die Dienste hingewiesen, welche das Studium dieser aus wässerigen Lösungen ausgeschiedenen Salze für die experimentell weit schwieriger zu behandelnde Eruptivgesteinskunde als Vorspann zu leisten vermag: viele Gesetze der Kristallisation solcher Salzsedimente sind auf die magmatischen Bildungen übertragbar.

Ein zweites allgemeines Interessemoment liegt in der Erkenntnis sehr merkwürdiger Metamorphosen, welche die Steinsalz- und Kalimagnesiasalze des Zechsteins in ihrer petrographischen Art erfahren haben: als gegen die äußeren Hauptumstände der Gesteinsumwandlung, Temperatur, Druck und chemische Umgebung, zum großen Teil sehr empfindliche Materialien zeigen die Salzgesteine solche Änderungen besonders drastisch und vorbildlich lehrhaft an. Dazu kommt auch hier die experimentelle Leichtigkeit, mit der, im Gegensatz zu den Bemühungen bei Silikatmassen, viele solcher Metamorphosen am Laboratoriumsmaterial verfolgt werden können.

Schließlich und nicht zum mindesten erwecken die Salzgesteine wissenschaftliche Aufmerksamkeit durch die drastischen Vorgänge eigenartiger Dislokationen, die das physikalisch durch Plastizität und geringes spezifisches Gewicht ausgezeichnete, und damit tektonisch besonders bewegliche Material vorführt. Wie E. HARBORT hervorhob, leitet es in seinem Verhalten förmlich zu dem der Magmen über.

Also erscheint der im folgenden unternommene Versuch gerechtfertigt, wie früher die Beziehungen der Salzpetrographie zur Eruptivgesteinskunde vom Verfasser dargelegt wurden, nun auch die Rolle

im Überblick zu würdigen, welche die Salzgesteine in der Metamorphosen- und Dislokationslehre, soweit letztere das petrographische Wesen des Materials beeinflußt, spielen.

II. Die geothermischen Metamorphosen (Geothermo- metamorphosen) der Salzgesteine.

1. Geologische Umstände.

Zur ausklingenden Zechsteinzeit bot Deutschland das im Vergleich zur Gegenwart besonders seltsame Bild einer gewaltigen Salzpfanne dar. Der Bogen des varistischen Gebirges war eingeebnet; über seine Stümpfe hinweg und über die einstigen weiten Moore in den Niederungen, die sich den Nordabhängen des karbonischen Gebirges anschlossen, waren die Schuttmassen des Rotliegenden und seine mächtigen vulkanischen Ergüsse in eine sich mehr und mehr vertiefende Geosynklinale gepackt, in der nun, auf weiter absinkenden Boden, die Salzlager aus dem flachen transgredierte Zechsteinsee sich absetzten. Sie bezeugen im Sinne JOH. WALTHERS ein arides Klima, für das nach H. L. F. MEYER-HARRASSOWITZ petrographische Beläge auch in den Randgebieten des Zechsteinbeckens vorliegen. Die roten Tone des oberen Zechsteins nehmen nach der Salzbezirksgrenze an Sandgehalt zu, und es stellen sich schließlich, am Nord- und Ostrande des rheinischen Schiefergebirges gleichwie an der böhmischen Masse, in diesem Horizonte grobe Gerölle und Konglomerate ein; sie tragen den Charakter des Gesteinszerfalls in Wüsten. Als mit den Salzen gleichzeitige Ablagerungen sind wohl auch dort, wo der Zechstein fehlt, manche vom obersten Rotliegenden faziell nicht abtrennbare Schichten zu rechnen. Es handelt sich also um Gesteinsbildungen an den Rändern des eindampfenden Binnenmeeres unter wüstenklimatischen Umständen.

Zur Periode des Buntsandsteins waren die atmosphärischen Niederschläge ständiger, so daß die Verwitterungserzeugnisse der Gebirge viel weiter in die Niederungen hineingeführt wurden; sie kamen als abwechselnde Sand- und Schlamm Massen in der Senke zur Ruhe. Diese im wesentlichen durch die Triaszeit hindurch noch einheitliche, gegenüber der Dyasperiode erweiterte Geosynklinale, in der Schicht auf Schicht über den immer tiefer unter die Erdoberfläche versinkenden Salzmassen abgelagert wurde, gliederte sich nach den Erwägungen von H. STILLE im Laufe der Jurazeit; es bildeten sich ein deutsches Nörd- und ein Südmeer heraus, die über die Festlandsschwelle hinweg nur auf engem Raume miteinander verbunden waren. Wealden, Neokom, Gault, auch Senon, marines Unteroligozän kamen auf ihr

nicht mehr zur Ablagerung, und nur in kleinen Gebieten mittleres und oberes Oligozän, während sich solche Schichten in dem weiter absinkenden Nordfelde, das die Hauptmasse der Zechsteinsalze in sich barg, als Sedimentationen von erstaunlicher Mächtigkeit vollzogen: hier wurden die Salze unter einem gewaltigen Deckgebirge bis zu 5000 ja 7000 m begraben.

Bei solcher Vorstellung einer Versenkung von Salzlagern tief in die Erdschale, in Zonen also von wesentlich höherer Wärme als sie bei der Entstehung der Salze waltete, und in Ansehung der vielfach hydratischen, gegen Temperatursteigerung empfindlichen chemischen Natur dieser Sedimente liegt der Gedanke nahe, ja er ist im Grunde zwingend, eine geothermische Metamorphose der versunkenen Salzlagerstätten anzunehmen. In dem Sinne wies ich bereits 1901 und später (1909) darauf hin, daß sich in den Kalisalzlagern Umänderungen zur Zeit vollzogen haben könnten als eine mächtige Überlagerung durch andere Gesteine die Temperatur im Salze steigerte. Sv. ARRHENIUS nahm unabhängig davon und unter kräftiger Betonung dieser Momente denselben Standpunkt ein, auch schloß sich R. LACHMANN den Erwägungen von ARRHENIUS an.¹⁾ E. JAENECKE hat die möglichen geothermischen Salzwandlungen vom physikalisch-chemischen Standpunkte aus im einzelnen erörtert, auch die quantitativen Umstände dieser Entstehung sekundärer Salze und Laugen graphisch entwickelt und darauf hingewiesen, welche Vorgänge sich abspielen können, wenn die Salzlager der Erdoberfläche wieder näher kommen, was zufolge der Abrasion eines Teils vom hangenden oder durch tektonische Umstände vielerorts geschehen ist. ROZSA hat sich gleichfalls öfter mit Überlegungen über Geothermometamorphose beschäftigt. Den Gedanken einer Infiltration vadosen Wassers in die Lager auch tieferer Horizonte und entsprechender Umsetzungen mit den Salzen hob insbesondere M. NAUMANN hervor. Schließlich stellte der Verfasser Vergleiche der Salzmetamorphosen mit den Wandlungen silikatischer Gesteine in der Erdtiefe in verschiedenen Veröffentlichungen an.

2. Das theoretische Salzprofil.

Die nähere Beurteilung der geothermischen Salzgesteinsmetamorphosen erfordert als Grundlage der Betrachtungen eine Vorstellung von dem, was als Ausgangsmaterial der Wandlung vorlag.

¹⁾ Die historische Notiz von E. JAENECKE, daß die Ansichten von ARRHENIUS, der seine entsprechenden Darlegungen auf dem Kalitag in Göttingen 1912 machte, „allgemeinen Widerspruch“ fanden, trifft nicht zu, wie schon daraus hervorgeht, daß ich als Leiter der Versammlung in einer zusammenfassenden Schlußrede die Annahme einer Thermometamorphose der Salze als eine aussichtsvolle Arbeitshypothese bezeichnete.

Zu einer vollen Sicherheit kann man sich in der Hinsicht noch nicht bekennen. Die leitenden Umstände, ursprüngliche Zusammensetzung der salzausscheidenden Lösungen nämlich und die Temperaturbreite, in der sich die Kristallisationen vollzogen, stehen nicht fest. Es sind vielmehr nur Möglichkeiten zu erörtern. Das wird dem lediglich historisch-naturkundlich gerichteten Petrographen unbequem sein müssen, im Grunde erhöht solch ein Umstand vorläufiger Ungewißheit aber den wissenschaftlichen Wert des Objektes insofern er zur Quelle mancherlei anregender Überlegungen und das treibende Moment für die Aufstellung allgemeiner Gesetzmäßigkeiten wird. In dem Sinne hat ja auch VAN'T HOFF seine Studien so eingerichtet, daß er nicht einen bestimmten, als naturkundlich gegeben angenommenen Fall, die Zusammensetzung der Lösung nach Art normalen Meerwassers, seinen Erörterungen zugrunde legte, vielmehr alle möglichen Kombinationen der Chloride und Sulfate von Na, K, Mg, Ca berücksichtigte; im selben Sinne führte er seine Untersuchungen nicht nur für eine Temperatur durch; er entwarf vielmehr außer dem Diagramm für 25° noch ein zweites für den Wärmegrad von 83° gültiges, das im Verein mit dem ersten den allgemeinen Gang des Kristallisationswechsels bei Änderung der Temperatur erkennen läßt. Dem haben sich ausgezeichnete, ergänzende experimentelle Studien von J. D'ANS angeschlossen, der das einschlägige Wissensgebiet bezüglich der Temperaturen 0° und 55° erweiterte. Daraufhin war es E. JAENECKE möglich, eine durchgehende Konstruktion des räumlichen Kristallisationsschemas von den niedrigen bis zu hohen Wärmegraden zu geben, und so hat die naturkundliche Unsicherheit über die Entstehungsbedingungen zur wissenschaftlichen Vertiefung des Problems geführt und die schönsten physikalisch-chemischen Erfolge mit sich gebracht.

Zur Erläuterung der einschlägigen Kristallisationsverhältnisse dient am ehesten die projektionsmäßige Darstellung im gleichseitigen Dreieck nach dem Vorschlage von E. JAENECKE, wie das im salzpetrographischen Bericht des 1. Bandes der Fortschritte bereits erörtert ist und hier in Kürze wiederholt sein möge. Es vereinfacht sich dabei die Anzahl der Komponenten in bekannter Art auf die Triade SO_4 , Mg, K_2 an den Ecken der Projektionsfigur. Jedes der für die verschiedenen Temperaturen geltenden Diagramme (Fig. 1—4) ist in Felder aufgeteilt, entsprechend der Zusammensetzung von Lösungsgruppen, die mit bestimmten (in die Felder eingeschriebenen) Bodenkörpern im Gleichgewicht stehen. Aus Lösungen, deren darstellender Punkt (Lösungspunkt) z. B. im Carnallitfelde liegt, fällt also zunächst Carnallit aus und entsprechendes gilt für die übrigen Bezirke. Dabei ist nun zu beachten, daß die sich aussondernden Salze ihren darstellenden Punkt (Salzpunkt) nicht innerhalb des zugehörigen Lösungsfeldes haben, vielmehr dort, wo er entsprechend dem Verhältnis $\text{SO}_4 : \text{Mg} : \text{K}_2$ des Salzes in der hier zur bequemen Übersicht besonders beigegebenen Fig. 5 eingezeichnet ist. So kann man, nach Eintragung der nötigen Salzpunkte mittels ihrer Koordinaten, in den Fig. 1—4 leicht Gleichgewichtslinien ziehen, die jeweils einen Salzort mit einem beliebigen Punkte des zugehörigen Lösungsfeldes verbinden. Fällt aus einer Lösung das konjugierte Salz aus (dessen Komponentenverhältnis $\text{Mg} : \text{SO}_4 : \text{K}_2$ im allgemeinen nicht das der Lösung ist), so verschiebt sich

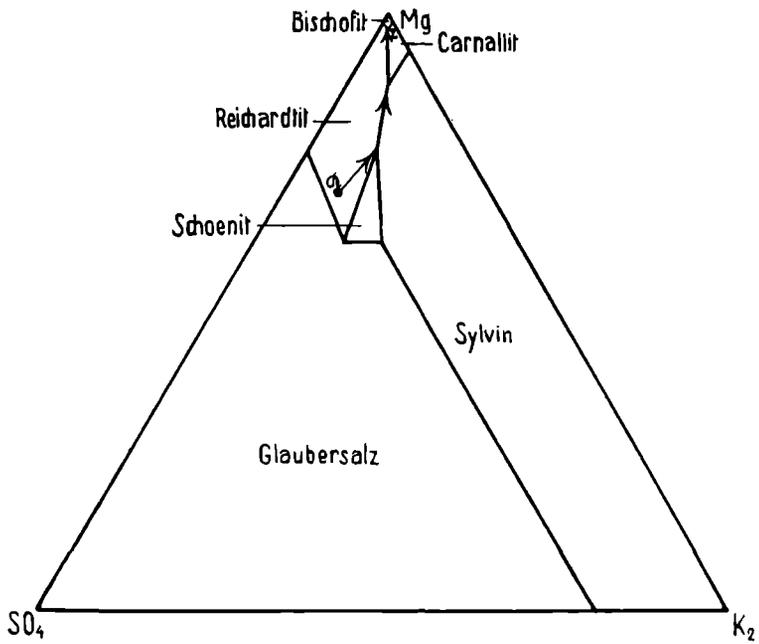


Fig. 1. Kristallisationsschema für 0°.

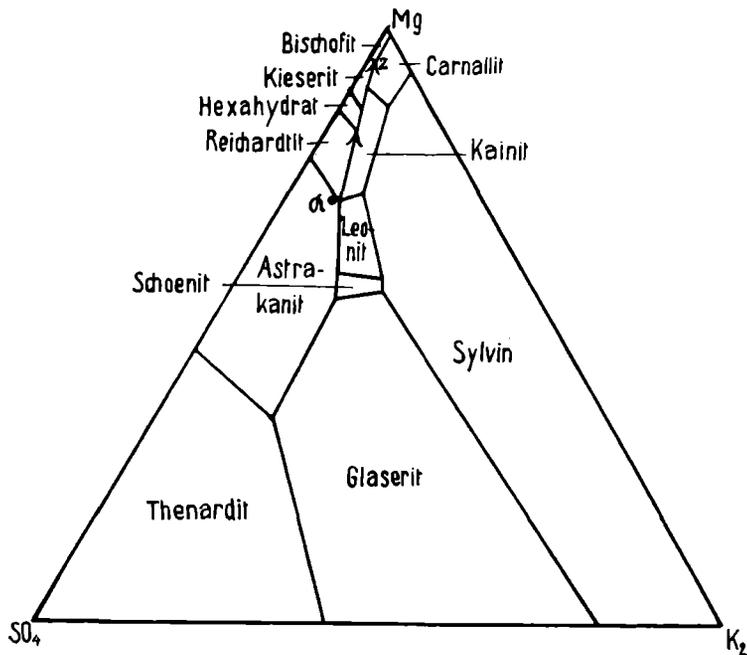


Fig. 2. Kristallisationsschema für 25°.

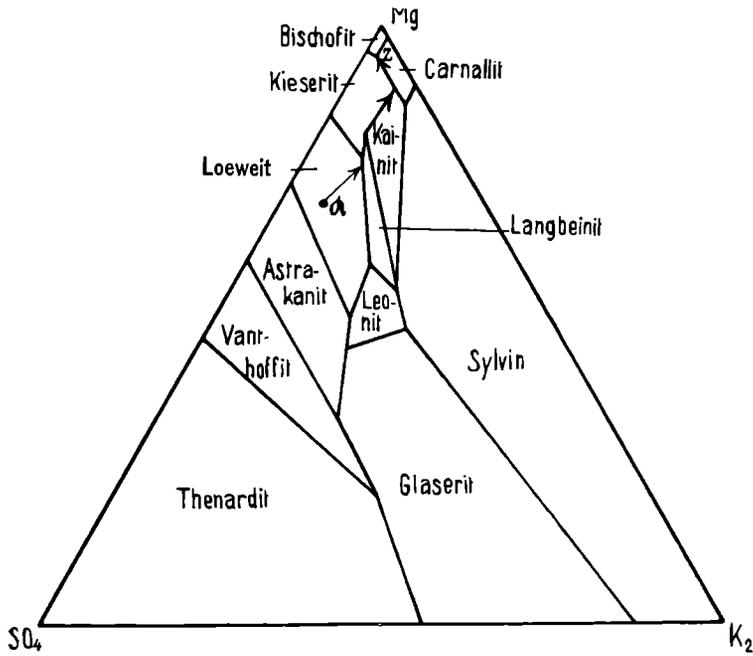


Fig. 3. Kristallisationsschema für 55°.

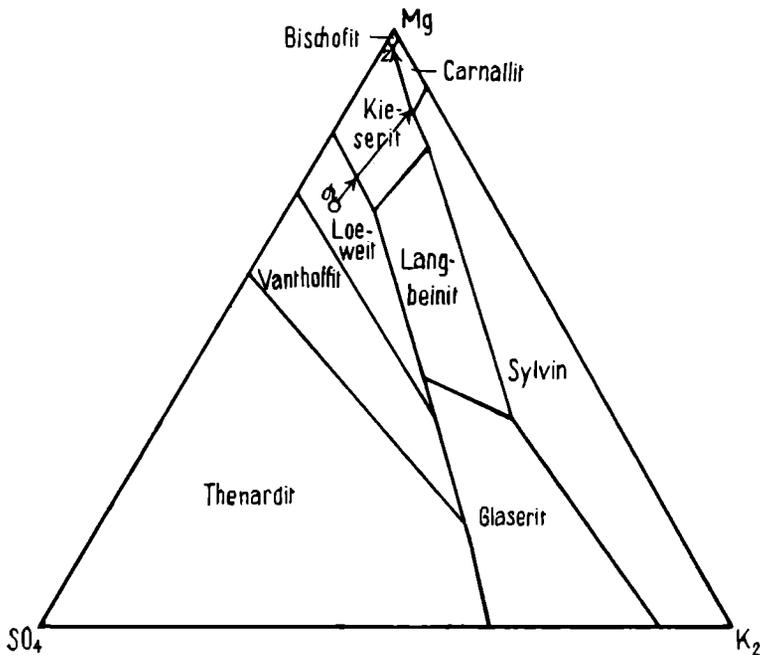


Fig. 4. Kristallisationsschema für 83°.

dadurch der Lösungspunkt und zwar auf der gradlinig verlängerten Konjugationslinie (= Kristallisationsbahn), also in der Richtung fort vom Salzpunkte, um so weiter je mehr auskristallisiert. Es trifft dann die Bahn in ihrem gradlinigen Verlauf auf die Grenze des Lösungsfeldes, in welchem sie sich bewegte, und ist nunmehr der richtenden Kraft auch eines zweiten Salzpunktes unterworfen; sie nimmt einen Verlauf, der sich als Resultierende der dirigierenden Komponenten erweist. Demzufolge wird der figurative Punkt entweder auf der Grenzlinie weiterlaufen zum Zeichen, daß sich jetzt die zwei Salze ausscheiden, deren Felder hier aneinanderstoßen oder er überschreitet die Grenzlinie, was eine Fortsetzung der Kristallisationsbahn unter alleiniger Ausscheidung des Salzes vom neuen Felde (unter Aufzehrung oder Metamorphosierung des vorhergehenden Absatzes)¹⁾ bezeichnet. Schließlich endet der Weg in Z, wo drei Kristallisationsbahnen zusammenlaufen und dreierlei Salze zugleich aus kongruenter Lösung kristallisieren, bis das Ganze erstarrt ist.

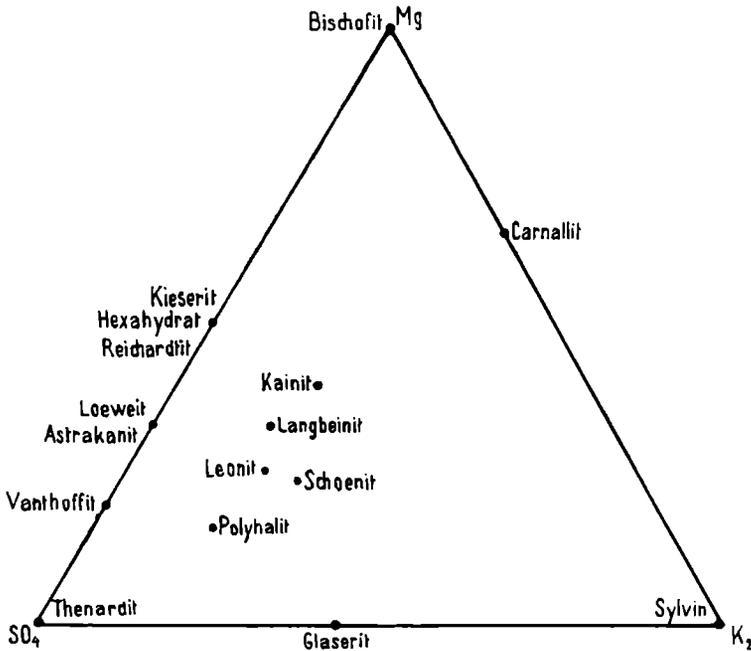


Fig. 5.

Salzpunkte des Projektionsdreiecks.

So bietet sich auf dem Boden der VAN'T HOFF'schen und D'ANS'schen Ergebnisse die petrographisch allgemein bedeutsame Möglichkeit dar, ohne weiteres ermessen zu können, welche Gesteinsprofile durch Eindampfung, z. B. von normalem Meerwasser unter der Herrschaft verschiedener Temperaturen entstehen.

Von den Kalksalzen ist dabei zunächst abgesehen; sie lassen sich in besonderen Diagrammen zur Darstellung bringen, die man den Hauptprojektionen einzeichnet,

¹⁾ Umkrustungen bzw. Überlagerungen schützen die alten Ausscheidungen vor Resorption.

und beeinflussen den Gang der Kristallisation so wenig, daß der nach obigem Schema voranschreitende figurative Punkt bei seinem Marsch im Doppelschema die Kristallisation der Kalksalze unmittelbar mit anzeigt.

Die Fälle der Erscheinungen einschlägiger Salze ist in nachstehender Tabelle gegeben unter Fortlassung der Eisenverbindungen und Borate.

Name	Chemische Formel	Name	Chemische Formel
Anhydrit	CaSO_4	Leonit	$\text{Mg}_2\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Astrakanit	$\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Loewit	$\text{Mg}_2\text{Na}_4(\text{SO}_4)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Bischofit	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Polyhalit	$\text{Ca}_2\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Carnallit	$\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Reichardt	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Glauberit	$\text{CaNa}_2(\text{SO}_4)_2$	Schoenit	$\text{MgK}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Steinsalz	NaCl
Glaserit	$\text{K}_4\text{Na}_2(\text{SO}_4)_3$	Sylvin	KCl
Magnesiumsulfat-		Syngenit	$\text{CaK}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
hexahydrat	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Tachhydrit	$\text{CaMg}_2\text{Cl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Kainit	$\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Thenardit	Na_2SO_4
Kieserit	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Vanthoffit	$\text{MgNa}_6(\text{SO}_4)_4$
Langbeinit	$\text{Mg}_2\text{K}_2(\text{SO}_4)_3$		

Die Zusammensetzung normalen Seewassers vermerkt der Punkt α in den Fig. 1—4. Man erkennt an ihm beim Vergleich der Diagramme in allgemein lehrhafter Art die Bedeutsamkeit der Temperatur für die stoffliche Art von Kristallisationen aus Lösungen (oder Schmelzen), denen eine Komponente (hier H_2O) entzogen wird. Während z. B. die Anfangskristallisation der Lösung α bei 0° Reichardt ist, erscheint bei 25° an diesen Stelle Astrakanit, bei 55° und 83° hingegen Loewit. Sehr anschaulich hebt sich auch der paragenetische Wechsel bei Temperaturänderungen heraus; gegenüber der Einfachheit der Verhältnisse bei 0° und den hier meist stark hydratisierten Salzen stellt sich bei höheren Wärmegraden zunächst eine bunte Mannigfaltigkeit ein: neue wasserärmere Minerale, z. B. Magnesiumsulfathexahydrat, Kieserit, Loewit, Leonit, Kainit, Langbeinit erscheinen, zum Teil verschwinden sie aber wieder bei noch höheren Wärmestufen, so Kainit, und neue paragenetische Möglichkeiten, etwa von Kieserit und Sylvin, tauchen auf.

Der Ausbau für sämtliche Temperaturen zwischen den extremen gibt natürlich besonders wertvolle Anhalte für die Art der Erscheinung; die Kristallisationsfelder werden dann zu Kristallisationskörpern (Fig. 6). Kennzeichnend hebt sich dabei heraus, daß der des Sylvins mit denen der Magnesiumsulfate in zwei Temperaturbreiten eine gemeinsame Wand hat (was die Möglichkeit der Paragenese bekundet); bei niedrigen Wärmegraden (unterhalb 12°) vermögen gleichzeitig Sylvin und Reichardt, bei höheren (oberhalb 72°) Sylvin und Kieserit sich zu bilden. Bei mittleren Temperaturen lagert der Körper des Doppelsalzes Kainit dazwischen. Nach E. JAENECKE ist in Fig. 7

eine Seitenprojektion dieses von ihm entwickelten Kristallisationsbaues mit den für die verschiedenen Paragenesen wichtigen Bezirken gezeichnet. Wählt man in dem Bilde eine Temperatur auf der Abszisse heraus, so zeigt ein auf der zugehörigen Ordinate laufender Punkt die Art der Salzausscheidungen an.

Gilt es nunmehr, aus der Fülle der Kristallisationsbahnen eine als Leitlinie für die ursprüngliche Ablagerung der Zechsteinsalze

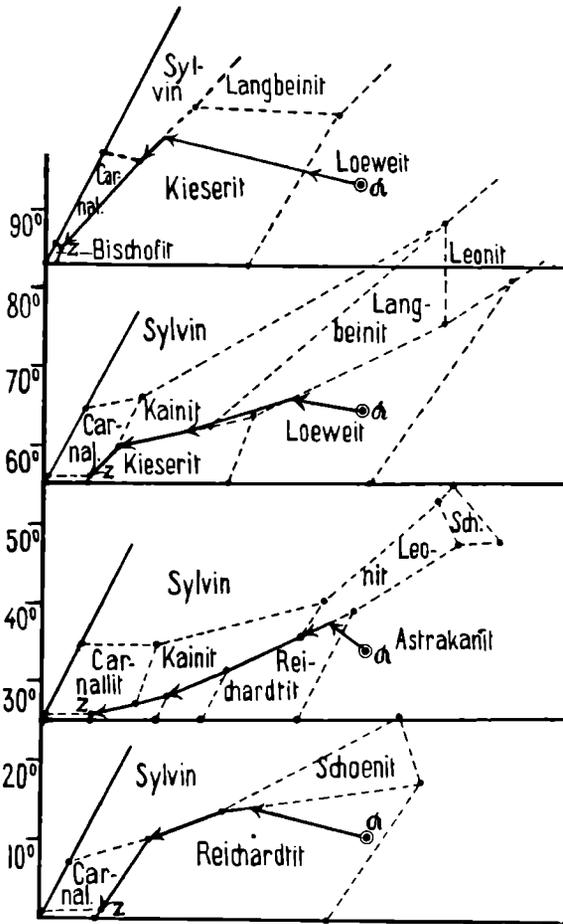


Fig. 6.

Zusammenstellung der Kristallisation von Meerwasser bei den Temperaturen 0°, 25°, 55°, 83°.

Ausfallen von Gips; 3. b c) = Ausfallen der Kombination von Gips mit Steinsalz; 4. c d) = Ausfallen von Anhydrit mit Steinsalz; 5. d α) = Ausfallen von Polyhalit mit Steinsalz.

herauszugreifen, so wird man geneigt sein, als Temperaturbreite 15—35° anzunehmen, entsprechend den heutigen Wärmeverhältnissen in Wüstengegenden, und in der Angelegenheit der Lage des α-Punktes ist der Versuch, zunächst mit normalem Meerwasser zu rechnen, gerechtfertigt. So würde die Fig. 8 (nach E. JAENECKE'S Zeichnung entworfen) heranzuziehen sein, in der die vertikale in das VAN'T HOFF'SCHE Projektions-Dreieck für 25° einsteckende Linie mit folgenden Abschnitten zur Geltung kommt: 1. Strecke a a) =

Das ist geologisch gedacht schon ein langer Weg: von je 75 000 H_2O , die mit 6,7 K_2 ; 70,5 Mg ; 54,4 Cl_2 ; 22,8 SO_4 , sowie 305 Na_2Cl_2 und 12,7 $CaSO_4$ die Meerlösung bilden, sind nach E. JAENECKE noch vorhanden in a) 65 500, b) 6050, c) 5500, d) 3300, α) 1200. Die Zusammensetzung der Lösung α läßt sich ausdrücken durch 1200 H_2O ; 6,3 K_2 ; 70,1 Mg ; 54,2 Cl_2 ; 22,0 SO_4 sowie 14 Na_2Cl_2 und eine geringfügige Zahl für $CaSO_4$. Jetzt erst setzt die Ausscheidung der Dreieckssalze ein: die Wassermenge ist bis dahin also von 75 000 auf

Bischofit - Carnallit - Kieserit

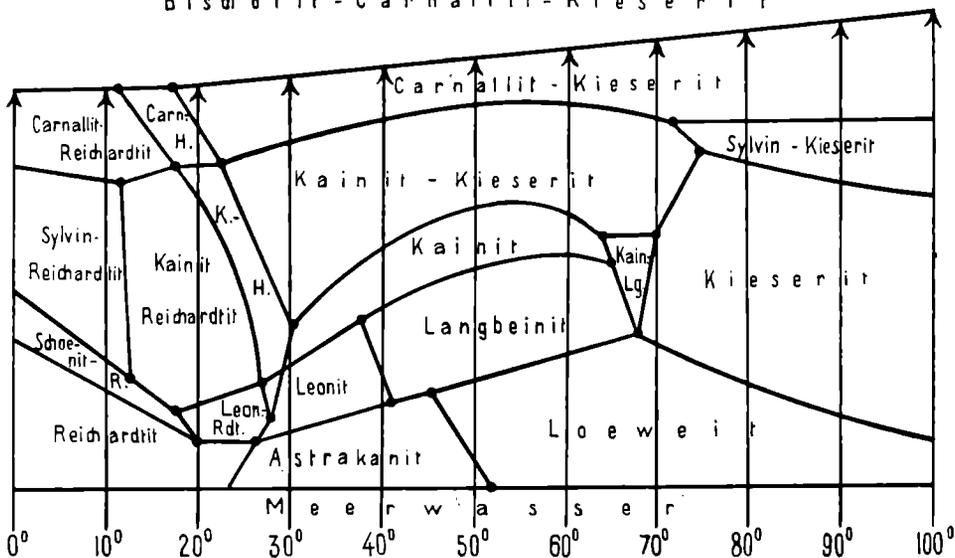


Fig. 7.

Schema der paragenetischen Kristallisation bei Temperaturen von 0° bis 100°.

1200 zurückgegangen, was bei einem seichten Becken einer gewaltigen Schrumpfung des Seearcals gleichkommt entsprechend der bekannten Theorie von JOH. WALTER und seiner Annahme einer zuerst vom Ural bis nach England reichenden Zechsteinbucht. Eine gute Anschauung gibt in der Hinsicht die nach einer Skizze von E. JAENECKE dargebotene Fig. 9. Gleichermassen hat man in solchen Zahlen einen ungefähren Anhalt für die Zeitverhältnisse, die den einzelnen Serien theoretisch als Bildungsperiode zuzuschreiben ist. Die Kristallisation der Kalisalze nimmt hierbei ersichtlich ein nur kleines Zeitmaß vom ganzen Akt der Meeresverdunstung und Meereskristallisation in Anspruch.

Mit einem Gehalt von 500 H_2O langt der Vorgang in Z an, in dem die Lauge entsprechend der Lage ihres darstellenden Punktes nahe am Mg -Eck fast nur noch $MgCl_2$ und Wasser enthält und vollends als Bischofit mit etwas Kieserit und Carnallit erstarrt.

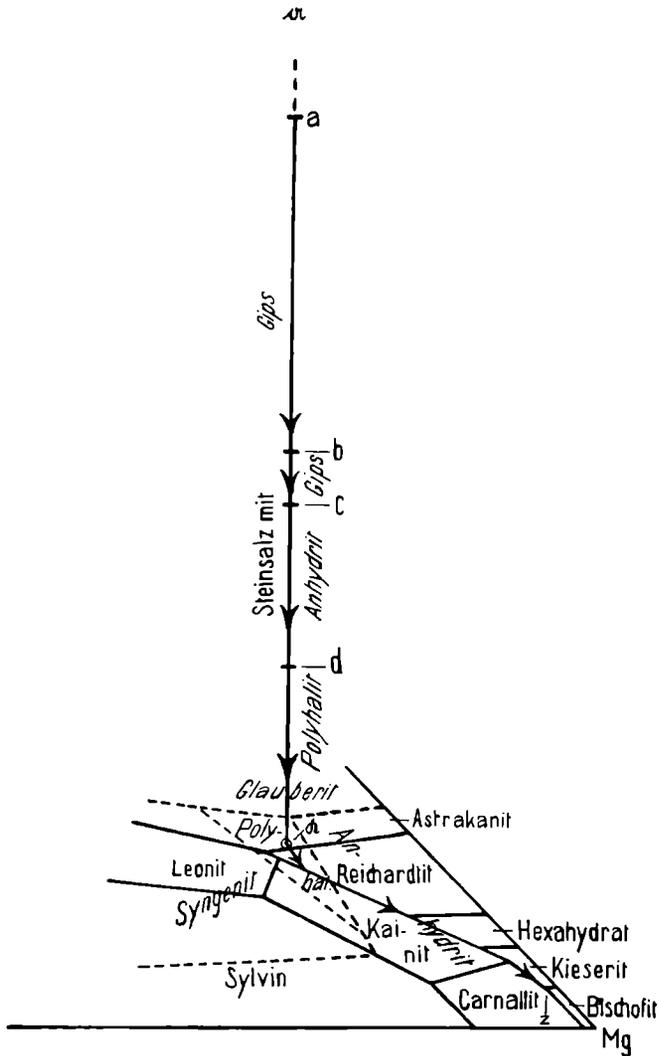


Fig. 8.

Schema der Kristallisation von Meerwasser bei 25° einschließlich der Kalksalze.

Das künstliche Profil, zu dem die diagrammatische Figur von 25° führt, ist somit eine Folge von Gesteinen, die sich vom hangendsten zum liegendsten mit Übergängen zueinander in nachstehender Art aufbaut (vgl. Fig. 6, 2 und 8¹⁾):

¹⁾ In Fig. 2 und 8_a ist angenommen, daß die Kristallisationsbahn das Leonitfeld nicht berührt.

Steinsalz mit	{	Kieserit, Carnallit, Bischofit	= Bischofitzone
		Kieserit, Carnallit	= Carnallitzone
		Kieserit, Kainit	} = Kainitzone
		Hexahydrat, Kainit	
		Reichardt, Kainit	
		Reichardt, Leonit	= Kalimagnesiasulfatzone
		Reichardt	} = Kalifreie Magnesiasulfat- zone
		Astrakanit	
		Polyhalit	= Polyhalitzone
		Anhydrit	= Anhydritzone
Gips	} = Gipszone		
Gips			

Die Hauptmenge des Kalium in einer solchen theoretischen Kalisalz-lagerstätte steckt nicht etwa im Carnallit, sondern im Kainit; in Sylvinform tritt das Kalium im theoretischen Profil gar nicht auf.

3. Die natürlichen Salzfolgen und ihre Erklärung durch Lagerstätten-Pseudomorphosierung, Deszendenzbildung, geothermische Metamorphosen und Retro-morphosen.

Der Vergleich des theoretischen Profils einer aus normalem Meerwasser bei etwa 25° gebildeten Salz-lagerstätte mit der Wirklichkeit, wie sie in den Zechsteinabsätzen vorliegt, hat nirgends eine volle Übereinstimmung ergeben. Statt des liegenden reinen und des mit Steinsalz vermengten Gipses tritt Anhydrit auf; es fehlen Astrakanit, Leonit, Reichardt, Magnesiumsulfathexahydrat gleichwie Kainit und Bischofit als kennzeichnendes Salzzonenmaterial der natürlichen Lager.

Andererseits treten in der Natur im Diagramm von 25° nicht verzeichnete Minerale auf, so Loewit, Vanthoffit, Langbeinit, und insbe-

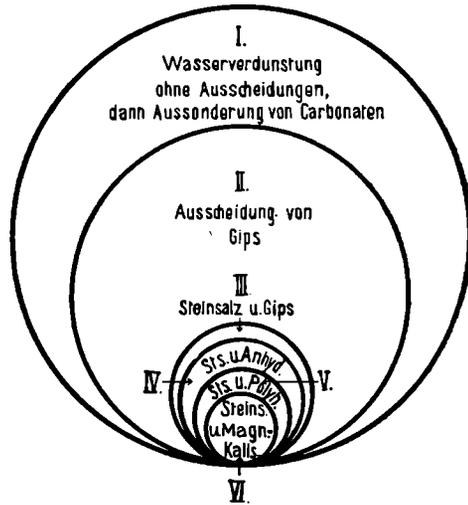


Fig. 9.

Schema der Schrumpfung des Salzseeareals.

sondere ist die nach dem einschlägigen Kristallisationsschema unmögliche Mineralkombination Kieserit-Sylvin im Hartsalz sehr verbreitet.

Es kommt hinzu, daß die Mengenverhältnisse der im Staßfurter Lager beobachteten und der aus normalem Meerwasser abzuleitenden Minerale nicht harmonieren. Nimmt man zur quantitativen Beurteilung dieses Umstandes mit E. ERDMANN als mittlere Zusammensetzung der Meersalze an Cl 55,30; Br 0,19; SO₄ 7,76; CO₃ 0,20; Ca 1,18; Mg 3,69; K 1,13; Na 30,54, so liefert das auf 100 Gewichtsteile Steinsalz an Kalkspat 0,43; Anhydrit 4,60; Kieserit 8,48; Carnallit 10,44 (davon 0,4 Bromcarnallit); Bischofit 17,89. An Volumen bzw. Schichthöhe auf 100 m Steinsalz entspricht dem an Kalkstein 0,35; Anhydrit 3,37; Kieserit 7,17; Carnallit 13,99; Bischofit 22,53. Man findet aber im Staßfurter Lager im Verhältnis 5,71 (unter Hinzurechnung des liegenden 20,41) Anhydrit (statt 3,37); Kieserit 2,25 (statt 7,17); Carnallit 4,68 (statt 13,99); Bischofit gar nicht (statt 23,53).

So lagen denn viele Schwierigkeiten bei der genetischen Erklärung der Salzlagerstätten vor. Es galt sie zu überwinden. Ein Teil läßt sich bereits durch die Überlegung aus dem Wege räumen, daß, wie schon erwähnt, auch bei regelmäßigem Verlauf des Absatzes der Salze aus normalem Meerwasser der Kristallisationsakt seine eigenen Bildungen wieder zerstören bzw. pseudomorphosieren kann. Nebeneinander beständig sind auf einem Punkte der Kristallisationsbahn jeweils nur die Salze seiner unmittelbaren Umgebung; alle anderen schweben in der Gefahr, durch Umsetzung mit der Lösung umgewandelt zu werden. So könnte also z. B. ein nicht als kompakte Gesteinsmasse, sondern in lockerer Schüttung ausgeschiedener, von Lauge durchtränkbarer Gips im Fortgange der Kristallisation unter dem Einfluß der an NaCl verarmenden, aber an MgCl₂ reicher werdenden Lauge in Anhydrit verwandelt werden. Wie dem Gips kann es Astrakanit, Leonit, Reichardt, Hexahydrat, Kainit und anderen im natürlichen Profil vermißten Salzen ergangen sein, insofern sie von der Lauge wieder aufgenommen oder verwandelt wurden. Sind doch in Z nur Kieserit, Carnallit, Bischofit und Steinsalz sowie Anhydrit miteinander in Harmonie. Wie weit eine solche Lagerstätten-Pseudomorphosierung erfolgt und damit das Bestehen der Salze oder doch ihr Mengenverhältnis beeinflusst ist, entzieht sich noch der genauen Beurteilung; es liegt aber kein Grund vor, diese Umstände bei den Erklärungen außer Spiel zu halten.

Im übrigen sind hier die Überlegungen zu berücksichtigen, die J. WALTHER und besonders E. ERDMANN, auch ROZSA, über die Veränderung der Zusammensetzung des Zechsteinseewassers durch Zuflüsse und über die entsprechende Beeinflussung der primären Kristallisationen anstellten.

Salze, welche sich in den Randteilen des vom Ozean abgeschnürten, sein Areal durch Verdunsten allmählich sehr bedeutend verringerten Zechsteinsees sedimentierten und zufolge des Abflusses der Wasser nach den tieferen Teilen der Geosynklinale trocken lagen, wurden durch zeitweiligen Regenfall zum Teil gelöst und durch Flüsse nach dem eingeschrumpften Wasserbecken transportiert, das demnach kein Meerwasser mit normalen Salzverhältnissen vorstellte und zufolge Anreicherung an $MgCl_2$, z. B. gleich Anhydrit statt Gips ausscheiden konnte. Dabei werden sich zur Zeit, als der Salzsee sich bei weiterem Eindunsten in einzelne Becken gliederte, mancherlei Vermischungen durch Zuflüsse von einem zum anderen Salzsumpf vollzogen haben. Darauf deutet die vielfache Einschaltung von fast reinen Steinsalzbänken in die Zonen der Kalimagnesiasalze hin, in noch größerem Ausmaße die unvermittelte Eingliederung der zwei Kalisalzhorizonte im Thüringer Steinsalzlager und nicht zum wenigsten schließlich die Rekurrenz der mächtigen Anhydritzonen beim Staßfurter und hannoverschen Lagerstättentypus.

Wo es sich dabei um Auflösung und Wiederabsatz von Salzen handelt, hat man Beispiele deszendenter Salze im Sinne von EVERDING vor sich, zechsteinzeitliche Analogien zu den Salzlagern im Elsässer Tertiär, deren Material nach E. HARBORT der Dyas in der Gegend der Rhön, des Eichsfeldes und des Vogelsberges entstammt, das zur Tertiärzeit gelöst und in der Senke des Rheintals wiederabgesetzt wurde.

So lassen sich also manche Besonderheiten im Aufbau der Kalisalzlagerstätten durch Pseudomorphosierung älterer Ausscheidungen, Überflutungen und Deszendenzen verständlich machen, indes liegt bei den genetischen Betrachtungen dann immer noch ein Berg von Hindernissen im Wege: es ist das Vorkommen von Mineralen und einer Mineralkombination, die auf erstaunlich hohe Temperatur in der Bildungsgeschichte der Lager hinweisen. Loewit, Langbeinit und Vanthoffit, die bei genauen petrographischen Untersuchungen von Salzprofilen durch H. PRECHT, RÜHLE, RIEDEL, LÜCK, ENGEL, BECK mehr und mehr verbreitet gefunden wurden, sind solche geologischen Thermometer; ihr Bildungsintervall schließt nach unten mit Temperaturen von etwa 40° ab, ja die Mineralkombination Kieserit-Sylvin, die für die in großer Mächtigkeit und Ausdehnung vorkommenden kieseritischen Hartsalze kennzeichnend ist, verlangt eine Minimalwärme von 72° für ihre Entstehung. Nun hat man zwar in ungarischen Salzseen, in denen schwere salzige Laugen von Süßwasser überlagert sind, also nicht zur abkühlenden Oberfläche aufsteigen können, und daher als Akkumulator für die einstrahlende Sonnenwärme wirken, Temperaturen von 70° beobachtet; als Analogon des Zechsteinsees kann man sie indes nicht auffassen, da in ihnen, wie Pom-

PECKJ betonte, wegen mangelnder Konzentrierung der Soole durch Verdunsten, keine Kristallisationen erfolgen.

So zwingt die physikalisch-chemische Überlegung zur Schlußfolgerung, daß die erforderlichen hohen Wärmegrade sich nachträglich in den Salzlagern zufolge geothermischer Heizung bei der Versenkung des erdoberflächlich gebildeten Materials in tiefere Zonen der Erdschale einstellten. Diese Durchwärmung zerstörte die Stoffe, deren Existenzgebiet bei solch höheren Temperaturen aufhört und sich daher in Schmelzen von der Zusammensetzung des Salzes oder in ein Gemisch aus Lauge und neu entstehenden festen Körpern zerlegen.

Wie solche Temperaturerhöhung auf die Gemische der Salze wirkt, geht aus den VAN'T HOFF'schen und d'ANS'schen Studien hervor und ist von E. JAENECKE ausführlich erörtert. Es verwandeln sich nach ihm unter Bildung gesättigter Laugen

bei 26° Schoenit $K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 6H_2O$ in Leonit $(K_3Na)(SO_4)_2 \cdot 2MgSO_4 \cdot 8H_2O$, Glaserit $Na_2SO_4 \cdot 2K_2SO_4$ und Astrakanit $Na_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 4H_2O$;

bei 27° Reichardtmit $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ in Magnesiumsulfathexahydrat $MgSO_4 \cdot 6H_2O$;

bei 31,5° dieses in Kieserit $MgSO_4 \cdot H_2O$;

bei 59,5° Astrakanit $Na_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 4H_2O$ in Loewit $2Na_2SO_4 \cdot 2MgSO_4 \cdot 5H_2O$ und Vanthoffit $3Na_2SO_4 \cdot MgSO_4$;

bei 61,5° Leonit $(K_3Na)(SO_4)_2 \cdot 2MgSO_4 \cdot 8H_2O$ in Langbeinit $K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$, Glaserit $Na_2SO_4 \cdot 2K_2SO_4$ und Loewit $2Na_2SO_4 \cdot 2MgSO_4 \cdot 5H_2O$;

bei 83° Kainit $KCl \cdot MgSO_4 \cdot 3H_2O$ in Kieserit $MgSO_4 \cdot H_2O$, Sylvin KCl und Langbeinit $K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$;

bei wenig über 100° Gips $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ in Anhydrit $CaSO_4$;

bei etwa 110° Loewit $2Na_2SO_4 \cdot 2MgSO_4 \cdot 5H_2O$ in Vanthoffit $3Na_2SO_4 \cdot MgSO_4$ und Kieserit $MgSO_4 \cdot H_2O$;

bei 117° Bischoffit in Schmelze;

bei 160° Carnallit $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$ in Sylvin KCl .

Besonders bedeutsam erscheint die Umsetzung von Kainit mit Carnallit (und etwas Steinsalz) zu Sylvin und Kieserit bei 72°.

Die quantitativen Verhältnisse solcher Vorgänge lassen sich rechnerisch oder nach E. JAENECKE graphisch leicht ermitteln. Als Beispiele seien hier genannt die Umsetzungen

1,00 Astrakanit $\xrightarrow{59,5^\circ}$ 0,67 Loewit + 0,26 Vanthoffit + 0,07 Lauge;

1,00 Kainit $\xrightarrow{83^\circ}$ 0,08 Langbeinit + 0,18 Sylvin + 0,56 Kieserit + 0,18 Lauge, was in Gewichtsmengen unter Zufügung von NaCl bedeutet:

100 g Kainit + 1,2 g Steinsalz \rightleftharpoons 33 g Langbeinit + 16 g Sylvin +
22 g Kieserit + 31 g Lauge.

Bezüglich der Zerlegung von Kainit mit Carnallit gilt die Beziehung

70 g Kainit + 30 g Carnallit + 0,5 g Steinsalz $\xrightleftharpoons{72^{\circ}}$ 29 g Sylvin +
38 g Kieserit + 33,5 g Lauge.

Der Zutritt andernorts abgespaltener Laugen zu so entstandenen Reliktsalzen greift natürlich in solche Metamorphosen ein. Aus Sylvin und Langbeinit kann unter der Einwirkung von $MgCl_2$ -Lauge Carnallit entstehen, aus Vanthoffit sich Steinsalz und Kieserit bilden, Carnallit vermag sich unter dem Einfluß von $MgSO_4$ in Sylvin und Kieserit zu verwandeln. Von Kalksalzen liegt die Bildung von Glauberit $Na_2SO_4 \cdot CaSO_4$ etwa in der Anhydritzone nahe; Anhydrit kann sich zu Polyhalit metamorphosieren und durch Wechselwirkung von $CaCl_2$ -Laugen, die aus Umsetzungen von $MgCl_2$ und $CaSO_4$ entstehen, entwickelte sich Tachhydrit $CaCl_2 \cdot 2MgCl_2 \cdot 12H_2O$ und Carnallit.

Auch muß mit E. JAENECKE bedacht werden, daß, wie die Pfeile \rightleftharpoons der obigen Umsetzungssymbole anzeigen, die Wandlungen einer Rückbildung fähig sind, vorausgesetzt, daß das abgespaltene flüssige Produkt für eine derartige retrograde Aktion zur Verfügung steht. Dann kann sich z. B. aus dem Relikt Hartsalz durch solche Retro-morphose, wie man den rückwärtigen Marsch der Vorgänge¹⁾ nennen kann, wieder ein Carnallitgestein herstellen.

Vielfach wird die abgespaltene Lauge für eine Rückwandlung indes nicht mehr zur Stelle sein, sei es, daß sie in tiefere Zonen sank, aufstieg oder bei Dislokationen der Lagerstätte vom Ort ihrer Entstehung weggepreßt wurde. Dann blieben die Zeugen hoher Temperatur, wie Langbeinit, Vanthoffit und Hartsalz, beim Nachlassen des Wärmegrades bestehen. Die Lauge setzte sich andernorts um oder gelangte für sich zur Erstarrung, worauf z. B. die beobachtete kieseritfreie Mineralkombination Sylvin-Carnallit hinweist.

Es ist auch verständlich, daß Carnallitgesteine und kieseritisches Hartsalz im Streichen ineinander übergehen; erstere sind retromorph, letztere Zeichen der wegen örtlichen Laugenmangels nicht rückgebildeten geothermischen Metamorphose.

In der Hinsicht sind Vorkommnisse von Staßfurt bedeutsam geworden, bei denen der organisch-geologische Zusammenhang von Carnallitgesteinen und kieseritisches Hartsalzen nach den Beobachtungen von SCHÜNEMANN, dann auch von ROZSA und LÜCK an Hand

¹⁾ Entsprechend der Bildung „diaphtoritischer“ Gesteine der Serie kristalliner Schiefer.

der in beiden Gesteinen gleichmäßig auftretenden, also durchgehenden Steinsalzbänke ersichtlich ist. Ein gleichfalls recht anschauliches Beispiel ist dem Verfasser im Lager von Schierstedt bei Aßchersleben bekannt geworden.

Verständlich wird durch die Annahme der geothermischen Metamorphose und der mit ihr verbundenen Volumänderungen der Salze auch die sehr verbreitete Erscheinung der im kleinen unregelmäßigen Lagerung von Salzschieben, insbesondere die wirre „verkrampfte“ Bänderung der Kieseritlagen (Salzwürmer), gleichwie die sehr verbreitete Erscheinung eines bunten Durcheinanders von Brocken verschiedenartiger Salze, auch von Salzton, in einer carnallitischen Füllmasse (Fig. 10). Es ist das in Erwägung der bei der Teilschmelzung



Fig. 10.

Gemengesalz. Synklase zufolge geothermischer Metamorphose.

in ihrem inneren Verbande gelockerten Salzmassen leicht erklärlich. Insbesondere findet man eine solche Mazerations-Synklase bei den außerordentlich verbreiteten carnallitischen Gemengesalzen, die man früher wohl für Gerölle mit carnallitischem Bindemittel, also für konglomeratische Trümmersalze hielt. Man wird sie nunmehr als einst durch die erhöhte Erdwärme erweichte und mineralogisch umgewandelte, in sich zusammengesunkene und dann durch Retromorphose oder durch Zutritt fremder Laugen carnallitisch durchsetzte Gesteinsmassen anzusehen haben. Im übrigen hat auch der Gebirgsdruck, insbesondere die Pressung beim Aufsteigen der Salzstöcke, oft genug einen Anteil am Gefüge solcher Salzmassen.

In das bunte Bild der im Rahmen der geothermischen Metamorphose erwiesenen Möglichkeiten lassen sich somit nach obigem

mannigfaltige petrographische Erscheinungen der Salzlagerstätten sehr leicht einordnen. Als Mittelbild im Wechsel der Erscheinungen kann man in der Hinsicht die nachstehenden Schemata aufstellen.

Theoretisches Primärprofil	Geothermisch verwandelte Profile
Bischofitzone	→ als Lauge verbraucht oder verloren
Carnallitzone	→ {Carnallit- bzw. Hartsalzzone}
Kainitzone	→ Hartsalzzone
Kalimagnesiasulfatzone	→ Langbeinitzone → Hartsalzzone
Kalifreie Magnesiasulfatzone	→ Loewit-Vanthoffitzone → Kieserit-
Polyhalitzone	→ Polyhalitzone [zone
Anhydritzone	→ {Glauberitzone Anhydritzone}
Gipszone	→ Anhydritzone}

In der Tat haben genaue petrographische Untersuchungen, die ich z. B. durch RÜHLE am Bernburger Sattel, durch RIEDEL und LÜCK im Berlepschwerk bei Staßfurt anstellen ließ, Ergebnisse gebracht, die mit obigem recht gut harmonieren. An richtiger Stelle sind außer den Zonen mit Anhydrit und Polyhalit die des Glauberits, Vanthoffits, Langbeinitis sowie die Hartsalze und Carnallite verzeichnet.

Durch Verwertung solcher objektiver petrographischer Erkundungen erhielt die Annahme der geothermischen Metamorphose der Kalisalzlager eine erfreuliche Stütze und Sicherstellung. Das darf aber nicht Anlaß sein, die geothermische Durchwärmung der Kalisalzlager als einziges Moment der Umwandlung hinzustellen, wozu begeisterte Anhänger der in Rede stehenden Theorie neigen. Daher ist den Vorstellungen über eine Lagerstätten-Pseudomorphosierung von Salzen im Laufe der normalen Sedimentation sowie den Meinungen über die Entstehung zechsteinzeitlicher und späterer deszendenter Salze durch transgressionsartige Überflutungen im Obigen der Spielraum gegeben, den sie neben der geothermischen Metamorphose und Retromorphose verdienen. Weiterhin ist nicht zu verkennen, daß die Sammelkristallisation an der inneren Umformung der Salze, insbesondere des Steinsalzes, wirksam gearbeitet hat. Das Salz erscheint oft in sehr grober Spätigkeit und kompakten Massen, was der ursprünglichen Ablagerung gewiß nicht eigen war.

III. Die Dislokationen der Salzgesteine.

Es handelt sich in diesem dritten Abschnitt der vorliegenden Betrachtungen um eine Reihe von Erscheinungen, bei welchen mineralogische, petrographische und rein geologische Momente ineinander greifen; in der Tat werden die Salzlagerstätten als geologische Körper

erst im Hinblick auf die mineralische Natur des aufbauenden Materials verständlich, das in seiner außerordentlichen inneren Mobilität wohl die eigenartigsten Dislokationen erfahren hat, die feste Stoffe aufweisen können.

Die Sedimentierung der Salzmassen erfolgte offenbar in flachen Becken auf sinkendem Untergrunde. Nur so ist die große wahre Mächtigkeit der Salzvorkommnisse zu erklären.

Es mag sein, daß schon gleich nach Absatz der schüttig losen Kristallisationen auf dem sich mehr und mehr verschrägenden Boden, wie KUBIERSCHKY vermerkte, eine Gleitbewegung der Salzsichten, hier mehr und dort weniger, sich einstellte, ähnlich wie man es an Schlammmassen unter Wasser beobachtet und in sehr drastischer Art, z. B. an den sandigen Mergellagern des Flysch Istriens mit seinen gekröseartigen Rutschfaltungen erkennen kann. Die Verschlingung mancher Salzlagen, insbesondere die Überlappung von Anhydrit- und Polyhalitschnüren im Steinsalz in gleicher Richtung, z. B. im Staßfurter Berlepschbergwerk, könnte auf solchen Rutschungen beruhen.

Episodisch wurde das geosynklinale Becken, in dem die Salzlager tiefer und tiefer sanken und von mächtigen Sedimenten überlagert wurden, von Faltungen betroffen, d. h. in die epirogenetische Bewegung schalteten sich im Sinne von H. STILLE orogenetische Dislokationen und zwar am Ende der Jurazeit, in der Kreide- und Tertiärperiode ein. Natürlich übten diese episodisch in bestimmten geologischen Zeiten tektonisch ausgelösten gebirgsbildenden Kräfte wie auf alle Gesteine so auch auf die Salzlager ihre ortsändernde Wirkung aus. Die Weichheit und unbestreitbare Plastizität des Hauptmaterials der in Rede stehenden Ablagerungen, des Steinsalzes, dessen innere Verschiebbarkeit sich wie MILCH zeigte, mit Erhöhung der Temperatur, also in der Erdtiefe, noch bedeutend vermehrt, brachten es mit sich, was insbesondere auch v. KOENEN, STILLE und SEIDL betonten, daß die Salzformation dabei vielfach weit empfindlicher reagierte als die Gesteine im Hangenden und Liegenden. Es wurden die einst flach gelagerten Salze in zum Teil ganz außerordentlich intensive Faltungen zusammengedrängt, gelegentlich mit weithin parallel gestellten fast liegenden Flügeln, auch in Form von Tauchfalten, bei denen die scheinbaren Mulden Sättel, und die scheinbaren Sättel Mulden sind; sie erfuhren hier Stauchungen und dort Streckungen, während die benachbarten Gesteine sehr viel weniger beeinflußt wurden oder als sprödere Zwischenschichten (wie Anhydrit) zerbrachen und in einschlußartig für sich liegende Stücke auseinandergezerrt wurden. Der Gegensatz zwischen den liegenden starren Zechsteinschichten und den mechanisch so ganz anders gearteten Salzmassen machte die Grenzfläche zwischen ihnen zu einer Hauptdifferenzfläche bezüglich des physikalischen Verhaltens gegen seitlich pressende Kräfte. Wie es entsprechend in

anderen Horizonten der Erdkruste geschehen ist, so kam es hier dazu, daß die Salzmassen auf dem starren Untergrunde des mittleren Zechsteins hingeschoben und weiterhin in Decken übereinander gepackt wurden, was z. B. durch den Bergbau am Nordabhang der Hainleite erschlossen ist. Auch konnte es sich im selben Sinne ereignen, daß die von ihrem Hangenden und Liegenden sich bei einer Aufwärtsbewegung abschiebenden Salzlagen als Kern eines Sattels den hangenden Schichten in komplizierten Schlingen gewissermaßen, wie H. STILLE sich ausdrückt, voraneilten oder im Sinne SEIDL's das Hangende durchspießten. Im Schönebecker Bergwerk erkennt man z. B. wie das ältere Steinsalzlager gelegentlich seine spröde Decke von Salzton und Hauptanhydrit, förmlich wie Wasser einen zerreißenen Damm, durchflutet hat.

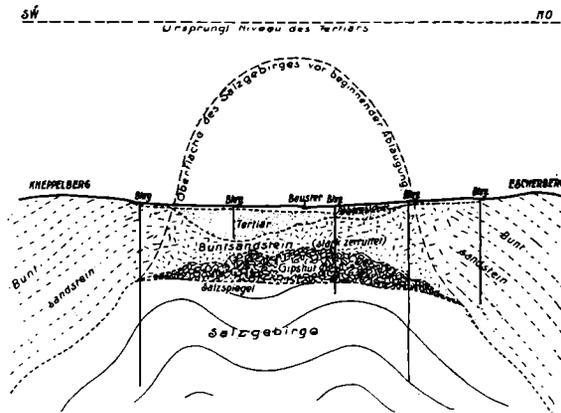


Fig. 11.

Salzvorkommen von Hildesia bei Hildesheim. Nach STILLE.

Interessante Begleiterscheinungen solcher Faltungen sind einmal die weitgehenden Auswülbungen, welche Salzlagen hierbei erfahren haben, der Art, daß nach H. STILLE z. B. am Vorkommen bei RIEDEL in der Lüneburger Heide normal 70 m mächtige Salzserien unter Bewahrung aller Horizonte auf 2 m reduziert sind, und andererseits die mechanischen Gesteinsdifferenzierungen, die man beim anhydritischen Steinsalz beobachtet. E. SEIDL erkannte am Schönebecker Lager, daß Steinsalz an Staustellen (Sattelfköpfen) arm an Anhydrit, reich daran an den Sattelflanken ist, wo sich starke Anhydritlagen als Rückstandsbildungen mechanischer Gesteinsdifferenzierung entwickelt haben. Der CaSO_4 -Gehalt geht von $\frac{1}{30}$ im Stausalz bis $\frac{1}{3}$ im Zerrsalz. Die Wanderung des Salzgesteins nach den Umbiegungsstellen der Falten hat sich also nicht gleichmäßig bei den Gesteinskomponenten Anhydrit und Steinsalz vollzogen. Für

das plastische Salz war die Bewegungsmöglichkeit weit größer als für den Anhydrit; so kam es zu einer mechanischen Entmischung. Ähnlich wie man Wasser aus einem nassen Schwamm auspreßt, so floß das Steinsalz plastisch zu den Sammelräumen, ein anhydritisches Gestein zurücklassend.

Außer den Faltungsdislokationen des Salzes im konkordanten tektonischen Verbands mit seinen Nebengesteinen macht sich an gewissen Vorkommnissen noch eine höchst eigenartige Lagerungsform geltend, die man als die der Injektionshorste bezeichnen kann. In ihnen steht das Salz gangförmig an, sei es in Form von vertikalen Stielgängen oder als Plattengang zwischen, wie es erscheint, oft wenig, oder doch nur in nächster Nachbarschaft zum Salzhorst stärker gestörtem Nebengestein. Nach Bohrungen im Allertal urteilt KIRSCHMANN, daß hier das Liegende des Salzes tektonisch unberührt, also sählig geblieben ist, während die Salzlagerstätte selbst sich in der Art deformierte, daß sie, unter entsprechender Verdünnung an den Seiten, zu einer gewaltigen Injektionsmasse anschwoh und emporstieg.

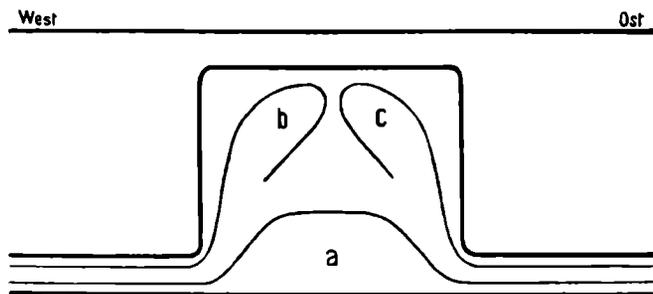


Fig. 12.

Schematisches Stereogramm des Salzstockes im Allertal. Nach R. LACHMANN.

Zuweilen ist die Grenzlinie eines solchen Horstes schwanenhalsartig in S-Form gebogen, so daß das Salz in den höheren Partien des Vorkommens von Rundhorsten in einer pokalartigen Erweiterung des Ganges ruht.

In textureller Hinsicht bieten die Gesteine dieser Salzstöcke die eigenartigsten Komplikationen dar. Nur manche Marmore kommen ihnen darin nahe. Es liegt in den Salzmassen ein förmliches Steingewebe vor mit einem Schlingwerk von wirren Faltungen, Abschnürungen, Wirbeln und Stauchungen, das an Fluidalgefüge von Eruptiven und an das Strömungsbild trüber Flüssigkeiten oder von Wolkenballen erinnert. Besonders in den Rundhorsten sind die schliebrigen Verschlingungen höchst mannigfaltig, bei den plattigen Salzrücken nähert sich die Tektonik, wie zu erwarten, gelegentlich der von parallelen Faltenzügen; so haben es u. a. Studien von STIER am Vor-

kommen von Benthe bei Hannover gezeigt. Bilder wie die, welche z. B. E. GEINITZ und NETTEKOVEN von der Jessenitzer Lagerstätte gegeben haben, gleichwie die von E. HARBORT, H. EVERDING u. a. entworfenen entsprechen ganz der ausgesprochenen Plastizität des Hauptmaterials, des Steinsalzes; es ist der Träger dieser Erscheinungen. Sein physikalischer Gegensatz zum Anhydrit macht sich drastisch geltend in den Zerbrechungen, Mylonitisierungen, Streckungen unter Zerlegung in Knauern und Blöcke dieses seines Begleiters. Auch an den Rändern der Aufpressungshorste kennzeichnet sich die Differenz zwischen dem plastischen Salzgestein und seiner brüchigen Umgebung gern durch eine merkwürdige Zone der Vermischung von Salz und Nebengesteinsbrocken, etwa von Buntsandstein, die vom emporstrebenden Salze umflossen und mitgeschleppt wurden, wie Gesteinstrümmern im Gletschereis.

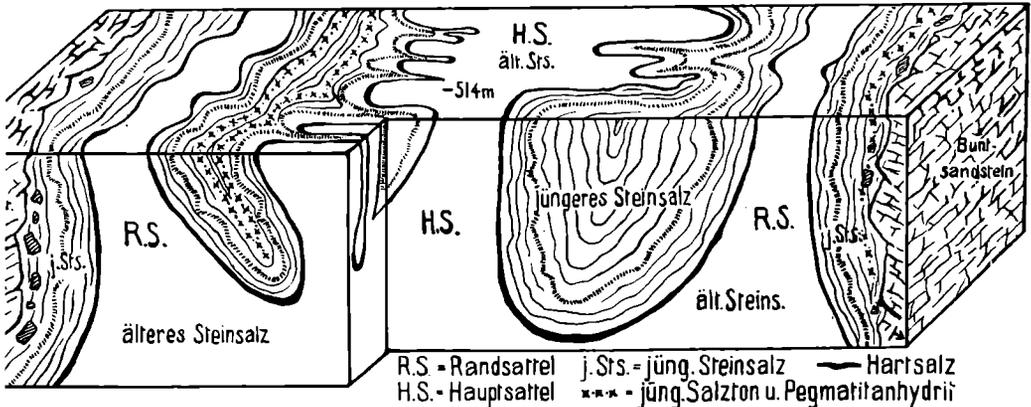


Fig. 13.

Stereogramm des Salzlagers von Benthe bei Hannover. Umgezeichnet nach K. STIER.

R. LACHMANN hat das besondere Verdienst, auf die Verbreitung solcher (in der älteren Literatur zwar schon beschriebener und auch neuerdings von den amerikanischen Forschern HARRIS und VEATCH erwähnter) Salzstöcke in Siebenbürgen, Algier, Louisiana und in Norddeutschland wirksam hingewiesen zu haben. Es sind die Akromorphen ALBERTIS; LACHMANN schlug den Namen Ekzeme vor.

Bei der tektonischen Deutung dieser Salzstöcke haben sich mancherlei Meinungsverschiedenheiten ergeben. H. STILLE ist davon überzeugt, daß, wenigstens in der überwiegenden Zahl der Fälle, das Salz sich im Kerne sattelförmiger Gebilde befindet, also ein Teil desselben ist, wenn auch die physikalische Eigenart der Plastizität des Salzes es gegenüber den Sattelflügeln oft hat stark voraneilen lassen. Besonders bedeutsam ist nach ihm, daß diskordant und transgredierend über dem gefalteten Salze nur solche Gesteine erscheinen, die auch

über anderen Schichten diskordant und transgredierend vorkommen. H. STILLE sieht darin einen Beweis, daß das Salzgebirge nur in den bekannten gebirgsbildenden Phasen gefaltet und aufbewegt ist, daß also hierin ein episodisches Ereignis, nicht etwa ein kontinuierlicher Vorgang vorliegt.

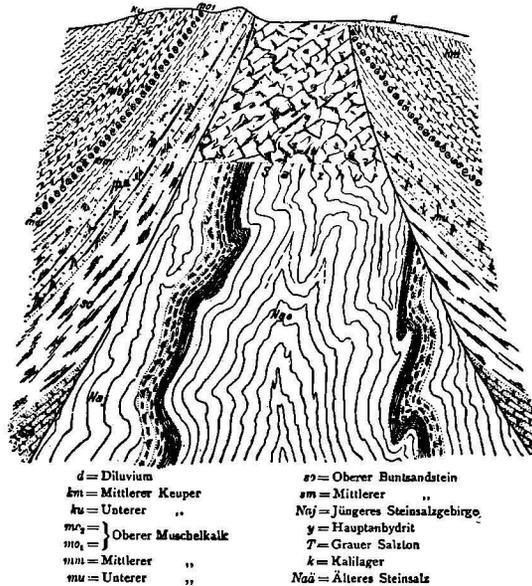


Fig. 14.

Schematisches Querprofil durch den südlichen Teil der Asse bei Braunschweig. (Voraufgeeiltes Zechsteinsalzgebirge im Kern des Triassattels.) Nach E. HARBORT.

E. HARBORT'S abweichende Ansicht über die Tektonik der norddeutschen Salzhorste schließt zwar nicht aus, daß Salzgesteine in der Tat als Kerne von Triassatteln auftreten, die durch erdtangentiale Druck gebildet sind, im übrigen weist dieser Forscher mit besonderer Betonung auf den Hangenddruck der Gesteine über den Salzlagerstätten als eins der Motive für die Aufwärtsbewegung der plastischen Massen hin; sie sind nach ihm in Norddeutschland auf vorgebildeten tektonischen Störungslinien unter dem Drucke der im Verlauf des Mesozoikums und Tertiärs immer mächtiger anschwellenden Deckgebirgsschichten, also durch vertikal nach unten wirkende Druckkräfte, in die Höhe gepreßt. Das Salzgebirge stieg, nach seinen heutigen Lagerungsverhältnissen zu urteilen, wie ein Magma empor. Es ist nach HARBORT aus den Spalten von langausgedehnten, aber in der Anlage unterdrückten Antiklinalaufwölbungen gewissermaßen herausgeflossen, insbesondere an Stellen, wo sich die Spalten erweiterten,

wie man es auch für die in großen Spaltenzügen in Mitteldeutschland aufsetzenden Basaltgänge annehmen kann.

Eine Stütze haben solche Erwägungen durch Sv. ARRHENIUS erhalten, der wie HARBORT im vertikalen Druck ein Motiv für dies Aufsteigen des Salzgebirges sieht; es spielt nach ihm in den Vorgang hinein das im Vergleich zum Nebengestein geringe spezifische Gewicht der Salze. Den Umständen der Isostasie entsprechend hat von den Gliedern eines in sich beweglichen Massenverbandes das spezifisch schwere Material das Bestreben abzusinken, das leichte den Trieb, als Schwimmer aufzusteigen. Die schweren hangenden Gesteine sinken, wie gewichtige Massen in Wasser, in das Salz ein, das entsprechend verdrängt wird und seitlich wie nach oben abfließt. Dieser Salzauftrieb tritt natürlich nur auf im Falle das Salz und sein Deckgebirge verschiebbar sind.

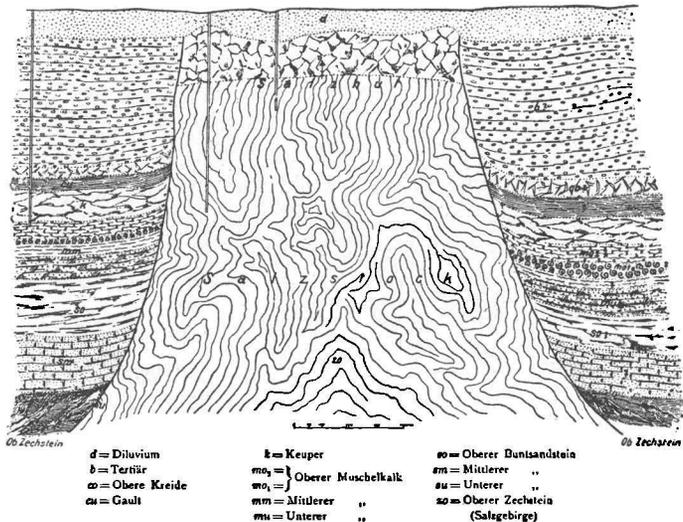


Fig. 15.

Schematisches Profil durch den Salzstock von Jessenitz-Lübtheen in Mecklenburg. Nach E. HARBORT.

Sehr eigenartige Vorstellungen bekunden ARRHENIUS, wie auch R. LACHMANN über die Beweglichkeit der Salzmassen in sich. Es wird nicht etwa die doch so eminent hervortretende Plastizität des Hauptmaterials Steinsalz dafür in Anspruch genommen, sondern eine „Rekristallisation bei kontinuierlichen Druckunterschieden“. Es soll „unter minder belasteten Deckschichten eine molekulare Zufuhr von gelöstem Material aus stärker belasteten Zonen“ erfolgen, welches sich an Orten minderen Druckes zum Ausgleich der Spannung wieder ausscheidet. Die Ursache für die Druckunterschiede sollen tektonischer

Natur sein oder durch das Grundwasser hervorgerufen werden, das in der Nähe der Erdoberfläche das von unten zuströmende Salz auflöst; die entstehenden Hohlräume werden durch Rekristallisation in statu nascendi wieder geschlossen. Im Niveau dieser oberen Hauptauflösung bildet sich eine Gleichgewichtsfläche, der sog. Salzspiegel, aus, über welchem die unlöslichen Bestandteile der Ekzeme aufgestapelt werden. Durch die wechselnden Verhältnisse der äußeren und inneren Reibung, ferner durch die Zusammensetzung der Salzstöcke aus spezifisch leichteren und schwereren, mehr oder minder löslichen Salzarten werden Differentialbewegungen innerhalb der Ekzeme bewirkt, welche sich als stehende Falten von teilweise sehr großen Dimensionen kenntlich machen.

Solchen theoretischen Erörterungen einer „Rekristallisations-Plastizität“ wird man gewiß mit Interesse folgen, als Mineraloge und Petrograph, insbesondere wenn man die so ausgezeichnete mechanische Plastizität des Steinsalzes sich selber experimentell vorgeführt hat, aber nicht gesonnen sein, diesem Träger der Salzlagerstätten als geologischem Körper mit LACHMANN die Eigenschaft „ungemein spröde“ zuzuerkennen, und damit die plastische Formbarkeit des Materials als einen wesentlichen Faktor der inneren Beweglichkeit der Salzlager zu streichen. Es ist wohl hier nicht der Ort, im einzelnen auf diese Umstände einzugehen, sei aber doch auf die Schwierigkeiten hingewiesen, die entstehen, wenn man die Wanderung der Salzstöcke durch Auflösen und Absatz als Ursache des Empordringens aus Tiefen von tausenden von Metern bis zu und selbst über Tage annimmt. Es läßt sich nicht recht vorstellen, wie auch nicht rekristallisierbare Massen, etwa Salzton mit Versteinerungen, oft in gewaltigen Blöcken durch Rekristallisationsvorgänge emporgewandert sind und weiterhin, wie der Schichtenverband dabei seine kennzeichnende Reihenfolge bewahren konnte. Die Theorie des „autoplasten“ Aufsteigens erscheint mir unsicher gegenüber der sehr plausiblen und daher völlig genügenden Annahme einer mechanischen Emporpressung der Salzmassen.

In dem Sinne kann hier auf die erwähnten Ansichten von H. STILLE und E. HARBORT zurückgegriffen werden. Der Gegensatz der Meinungen zwischen ihnen besteht in der starken Betonung der episodisch fallenden tektonischen Kräfte seitens STILLE und dem besonderen Hinweis HARBORT's auf den ständig wirkenden Hangendruck als weiteres Motiv für die Aufwärtsbewegung der Salze.

Ein der Wirklichkeit zustrebender Ausgleich dieser beiden Ansichten liegt wohl in der Auffassung der Typen als Erscheinungen im Gefolge einer einzigen Ursache. Durch solche Vereinigung kommt man zudem zu einer über den Rahmen der Spezialbetrachtung hinausgehenden, also geologisch-petrographisch allgemein bedeutsamen An-

schauung. Die Erscheinungen der tektonischen Dislokation von Gesteinen wurzeln in dem Motiv der Schwerkraft; ¹⁾ sie zieht die Erdkrustenteile radial nach unten, drückt also das Liegende durch das Hangende, setzt sich in größeren Tiefen mehr und mehr in seitliche Pressungen um und ist die isostatische Ursache für Aufsteigen und Niedergehen von Gesteinsmassen. Die praktische Wirksamkeit dieser ständig ausgeübten Kraft richtet sich nach der jeweiligen Empfindlichkeit und damit der Beweglichkeit des von ihr beeinflussten Materials. Die meisten Gesteine werden zur Dislokation erst nach sehr beträchtlicher Aufspeicherung einer Spannung gebracht; sie löst sich daher in episodischer Gebirgsbildung aus, geologisch gedacht also z. B. wenn eine Geosynklinale eine genügend starke Sedimentation erfahren hat. Solchen Gesteinen zwischengeschaltete plastische Massen werden natürlich bei dieser zeitweiligen tektonischen Faltungswirkung mit-ergriffen und verhalten sich dabei in besonderer Art, eilen im Sinne von H. STILLE als Kerne von Sätteln unter Abscherung vom Liegenden und Hangenden voran und deformieren sich in weit nachgiebigerer Art als ihr Nebengestein und etwaige ihnen zwischengeschaltete spröde Lagen.

Das in Rede stehende ständige gewaltige Motiv der Dislokation, die Schwerkraft, wirkt aber auf plastische Materialien, im vorliegenden Falle also auf die Salze, naturgemäß viel eher ein als auf in sich unbewegliche Massen. Im Falle Ausweichungsmöglichkeit gegeben ist, setzt schon ein geringer Hangenddruck sie in Bewegung zur Ausflußstelle; ständig wandert dann in söhlichen Lagen das plastische Material seitlich zur Austrittspforte der Schichtenfolge und injektionsmäßig aufwärts, ohne daß die starren Massen mitgehen. Bei 3000 m Überlagerung kommt entsprechend der geobaren Tiefenstufe von 4 m (wie JOHNSEN die Meterzahl für die Zunahme des Druckes um 1 Atmosphäre nennt), schon ein Druck von 750 kg auf den Quadratcentimeter, also eine sehr hohe Pressung in Betracht, und selbst wenn nur eine geringe Höhendifferenz vorhanden ist, so hat der Schweredruck sein sehr ansehnliches Maß. Natürlich folgt das Salz am ehesten tektonisch bereits offenen Wegen, man muß ihm aber als dem Träger von gewaltigen Drucken, die ja entsprechend der gleichen Ursache schließlich das nämliche Maß erreichen können wie die Faltungskräfte, auch in dem obigen Sinne „selbständige“ Wegebahnung zumuten, wobei es als Keil gradeso wirkt, wie etwa ein Magma, das große Druckkräfte hydrostatisch überträgt, und sich stockförmige, lakkolithische und Gangräume sowohl zwischen Sedimenten als

¹⁾ Abgesehen von Zerrungen zufolge von Volumveränderungen durch ungleiche Erwärmung oder Abkühlung der Erdschalen als anderen Momenten der Lagerungsstörung.

auch quer durch sie hindurch erzwingt. Andererseits ist verständlich, daß transgredierende mächtige Schichten ihm den Weg abschneiden und auf seinem Marsche Halt gebieten können. Wenn also Salzmassen auf tektonisch vorgezeichneten Zonen im geologisch langsamen Aufsteigen begriffen sind, so werden über dem gestörten Untergrunde diskordant abgesetzte Schichtenfolgen im allgemeinen als Riegel wirken und ein Weiteremporsteigen verhindern.

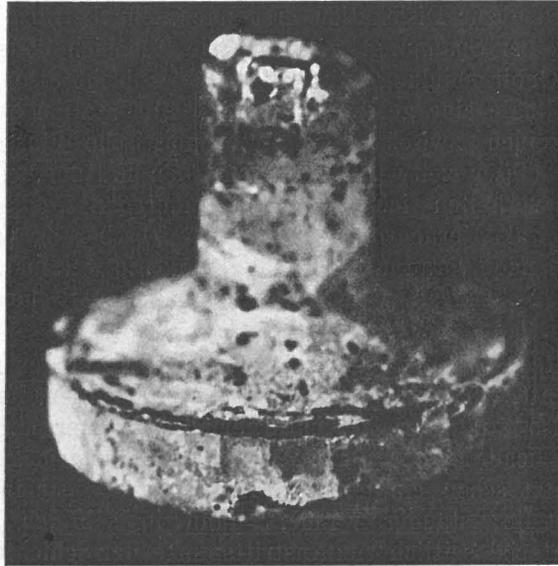


Fig. 16.

Schematische Nachahmung eines Salzstockes durch Pressen einer Steinsalzplatte unter der Möglichkeit des Abfließens von den Seiten her nach oben. F. RINNE fec.

So lassen sich die episodischen Faltungsvorgänge und die im Grundsatz ständigen Injektionen der Salzmassen zu einem einzigen Bilde vereinen, in dem alle Übergänge von einem Extrem zum anderen als Folgeerscheinungen der nämlichen Ursache enthalten sind.

Literatur zu vorstehender Erörterung.

(Zusammengestellt von E. SCHIEBOLD.)

- V. ALBERTI, Halurgische Geologie. Stuttgart und Tübingen 1852.
- K. ANDRÉE, Innere oder äußere Ursachen der Deformationen von Salzgesteinen. Zentralbl. f. Min. 1911, S. 698.
- , Die geologische Bedeutung des Wachstumsdruckes kristalliner Substanzen. Geol. Rundschau 1912, Bd. III, S. 7.
- , Zum Verhalten des Steinsalzes gegenüber mechanisch deformierenden Kräften. Zentralbl. f. Min. 1914, S. 111.
- J. D'ANS, Untersuchungen über die Salzsysteme ozeanischer Salzablagerungen. Kali 1915, Heft 10—17.
- SV. ARRHENIUS, Zur Physik der Salzlagerstätten. Meddelanden från k. Vetenskapsakademiens Nobelinstitut, Bd. II, Nr. 20.
- SV. ARRHENIUS u. R. LACHMANN, Die phys. chem. Bedingungen bei der Bildung der Salzlager und ihre Anwendung auf geologische Probleme. Geol. Rundschau 1912, Bd. III, S. 139.
- K. BECK, Petrographisch-geologische Untersuchungen des Salzgebirges im Werra-Fulda-Gebiet der deutschen Kalisalzlagerstätten. Zeitschr. f. prakt. Geologie 1912, Bd. 4, S. 289.
- , Petrographisch-geologische Untersuchungen des Salzgebirges der oberen Aller im Vergleich mit dem Staßfurter und Hannoverschen Lagerstättentypus. Kali 1911, Heft 18, S. 410.
- W. BERGER, Beitrag zur Kenntnis des Salzgebirges der Gewerkschaft Einigkeit bei Fallersleben. Dissert. Leipzig 1914.
- F. BEYSCHLAG, Das Salzvorkommen von Hohensalza. Jahrb. d. Kgl. Preuß. Geol. Landesanstalt 1913, Bd. XXXIV, II, H. 2.
- BEYSCHLAG-EVERDING, Zur Geologie der deutschen Zechsteinsalze. Festschrift zum X. Allgemeinen Bergmannstage in Eisenach 1907.
- F. BISCHOF, Die Steinsalzwerke bei Staßfurt. I. Aufl. 1864; II. Aufl. 1875.
- H. E. BOEKE, Über das Kristallisationsschema der Chloride, Bromide, Jodide von Natrium, Kalium und Magnesium usw. Zeitschr. f. Krist. 1908, Bd. 45, S. 346.
- , Übersicht der Mineralogie, Petrographie und Geologie der Kalisalzlagerstätten. 1909. Verlag von Stange, Berlin.
- W. BRUHNS u. W. MECKLENBURG, Über die sogenannte Kristallisationskraft. 6. Jahresber. des Niedersächs. geol. Vereins z. Hannover 1913.
- K. BRUNHÖVER, Die petrographische und chemische Beschaffenheit der Kalisalzagerstätte Krügershall zu Teutschental bei Halle a. S. Dissert. Halle-Wittenberg 1916.
- W. BUSCH, Über die Expansivkraft des Steinsalzes. Kali 1908, H. 1, S. 10.
- W. DEECKE, Bedeutung salzführender Schichten für tektonische Vorgänge. Naturforsch.-Gesellsch. Freiburg 1913, Bd. 20.
- F. ENGEL, Beitrag zur chemisch-petrographischen Kenntnis der Kalisalzagerstätte von Salzdetfurth. Dissert. Leipzig 1913.
- E. ERDMANN, Die Chemie und Industrie der Kalisalze. Deutschlands Kalibergbau. Festschrift z. X. Allgem. Bergmannstage in Eisenach 1907.

- E. ERDMANN, Zur Frage der Entstehung der Kalisalzlagerstätten. *Zeitschr. f. anorg. Chem.* 1908, Bd. 21, 1685.
- , Die Natur des EVERDING'schen deszendentes Hauptsalzkonglomerates. *Monatsber. der deutsch. geol. Ges.* 1910, Bd. 62, S. 318.
- H. EVERDING, Der Stand der Salzlagerstättengeologie. *Kali* 1907, H. 23, S. 460.
- B. FÖRSTER, Die geologischen Verhältnisse der Kalisalzlager im Oberelsaß. *Jahresber. d. oberhessischen geol. Ver., N. F., Bd. II, H. 3, S. 21.*
- FR. FRECH, Die Entstehung und Umwandlung der deutschen Salzlager. *Umschau* 1911, Bd. XV, S. 909.
- E. FULDA, Die Oberflächengestaltung in der Umgebung des Kyffhäusers als Folge der Auslaugung der Zechsteinsalze. *Zeitschr. f. prakt. Geol.* 1909, S. 25.
- , Zur Entstehung der Hohlräume im Gips. *Zeitschr. f. prakt. Geol.* 1909, S. 400.
- GAGEL, Über die Trias bei Lüneburg. *Monatsber. d. deutsch. geol. Ges.* 1908, S. 317.
- E. GEINITZ, Geologie des Lübbecker Gebirgszuges. *Archiv des Ver. der Freunde der Naturgesch. in Mecklenburg* 1911, Bd. 65, S. 65; 1912, Bd. 66, S. 49.
- R. GÖRGEY, Die Entwicklung der Lehre von den Salzlagerstätten. *Geol. Rundschau* 1911, Bd. II, S. 278.
- , Zur Kenntnis der Kalisalzlager von Wittelsheim im Oberelsaß. *TSCHERMAK's min.-petr. Mitt.* 1912, Bd. 31, S. 664.
- , Über die Salzgesteine der Kalilager von Wittelsheim im Oberelsaß. *Kali* 1913, H. 13, S. 320.
- HALT, The form of salt deposits. *Econom. Geol.* 1912, Vol. 7, p. 120.
- E. HARBORT, Zur Geologie der nordhannoverschen Salzhorste. *Monatsber. d. deutsch. geol. Ges.* 1910, Bd. 62, S. 326.
- , RICHARD LACHMANN's Salzgeschwüre. *Monatsber. d. deutsch. geol. Ges.* 1911, Bd. 63, S. 267.
- , Zur Frage der Genesis der Steinsalz- und Kalisalzlagerstätten im Tertiär von Oberelsaß und Baden. *Zeitschr. f. prakt. Geol.* 1913, Bd. 21, S. 189.
- , Neu- und Umbildungen im Nebengestein der Salzstöcke des norddeutschen Flachlandes. *Monatsber. d. deutsch. geol. Ges.* 1913, Bd. 65, S. 6.
- , Zur Frage der Aufpressungsvorgänge und des Alters der nordwestdeutschen Salzvorkommen. *Kali* 1913, H. 5, S. 112.
- G. D. HARRIS, The geological occurrence of rock salt in Louisiana and East Texas. *Econom. Geol.* 1909, Bd. 4, S. 12.
- H. v. HÖFER-HEIMHALT, Allgemeine Geologie der Salzlagerstätten. *Berg- und Hüttenm. Jahrb.* 1919, S. 219.
- J. H. VAN'T HOFF, Zur Bildung der ozeanischen Salzablagerungen. *Braunschweig* 1905, Bd. I. 1909, Bd. II.
- , Untersuchungen über die Bildungsverhältnisse der ozeanischen Salzablagerungen, insbesondere des Staßfurter Salzlagere. Herausgegeben von H. PRECHT und E. COHEN. *Leipzig* 1912.
- E. JÄNECKE, Die Untersuchungen VAN'T HOFF's über die Bildung der ozeanischen Salzablagerungen in einer neuen Darstellungsform. *Kali* 1907, H. 11, S. 201.
- , Einige kurze Bemerkungen über die Ausscheidung und Thermometamorphose des Zechsteins nach der Auffassung von Rózsá. *Zeitschr. f. anorg. Chem.* 1917, Bd. 99, S. 1.
- , Die Entstehung der deutschen Kalisalzlager. „Die Wissenschaft“, *Braunschweig* 1915.

- E. JÄNECKE, Vollständige Übersicht über die Lösungen ozeanischer Salze. Zeitschr. f. anorg. Chemie 1917, Bd. 100, S. 161; 1918, Bd. 102, S. 42; Bd. 103, S. 1.
- , Die Kaliindustrie. Enzyklopädie der Techn. Chemie 1919, Bd. VI, S. 564.
- , Die Entstehung der deutschen Kalisalzlager. Die Naturwissenschaften, 7. Jahrg. 1909, S. 619 und 636.
- A. JOHNSEN, Die Struktureigenschaften der Kristalle. Fortschritte der Mineralogie 1913, Bd. III, S. 93.
- J. JOHNSTON and L. H. ADAMS, On the effect of high pressures on the physical and chemical behavior of solids. Americ. Journ. of Science 1913, Bd. 35, S. 205. Zeitschr. f. anorg. Chemie 1913, Bd. 80, S. 281.
- E. KAISER, Das Steinsalzvorkommen von Cardona in Catalonien. Neues Jahrb. f. Min. usw. 1909, Bd. I, S. 14.
- A. v. KALESCINSKY, Über die ungarischen warmen und heißen Kochsalzseen. Föltani Körzlöni 1901, Bd. 31, S. 409.
- v. KÁRMÁN, Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck. Zeitschr. d. Ver. deutsch. Ing. 1911, Bd. 55, II, S. 1749.
- W. KIRSCHMANN, Die Lagerungsverhältnisse des oberen Allertals zwischen Morsleben und Walbeck. Zeitschr. f. prakt. Geol. 1913, Bd. 1.
- P. KLING, Das Tachyditvorkommen in den Kalisalzlagerstätten der Mansfelder Mulde. Dissert. Halle-Wittenberg 1913.
- v. KOENEN, Über Wirkungen des Gebirgsdruckes in tiefen Salzbergwerken. Ber. d. k. Ges. d. Wiss. zu Götting., Math.-phys. Klasse 1905, S. 1.
- E. KOSSMAT, Beitrag zur Tektonik der Kalisalzlagerstätte von Kalusz (Ostgalizien). Jahrb. d. geolog. Reichsanst. Wien 1913, Bd. 63, S. 171.
- R. LACHMANN, Studien über den Bau von Salzmassen. Kali 1910, H. 9, S. 188.
- , Über die Natur des EVERDING'schen deszendentes Hauptsalzkonglomerates. Monatsber. d. deutsch. geol. Ges. 1910, Bd. 62, S. 318.
- , Über autoplaste (nichttektonische) Formelemente im Bau der Salzgesteine Norddeutschlands. Monatsber. d. deutsch. geol. Ges. 1910, Bd. 62, S. 113.
- , Salinare Spalteneruptionen gegen Ekzemtheorie. Monatsber. d. deutsch. geol. Ges. 1910, Bd. 62, S. 597.
- , ERICH HARBORT im Streit gegen die Ekzeme. Monatsber. d. deutsch. geol. Ges. 1911, Bd. 63, S. 489.
- , Über diagenetische Deformationen von Salzgesteinen. Zentralbl. f. Min. usw. 1911, S. 534.
- , Hauptprobleme der Kaligeologie. Monatshefte f. d. naturwiss. Unterricht 1911, H. 4, S. 225.
- , Der Salzauftrieb. Bd. I, Halle 1911, Bd. II, 1912.
- , Studien über den Bau von Salzmassen. Kali 1912, H. 14—17.
- , Weiteres zur Frage der Autoplastie der Salzgesteine. Zentralbl. f. Min. usw. 1912, S. 46.
- , Beiträge zur Plastizitätsfrage. Zentralbl. f. Min. usw. 1912, S. 745.
- , Über die Bildung und Umbildung von Salzgesteinen. Jahresber. d. Schles. Ges. für vaterländ. Kultur 1912.
- , Über einen vollkommen plastisch deformierten Steinsalzkristall von Boryslaw in Galizien. Zeitschr. f. Kristallographie 1913, Bd. 52, S. 137.
- , Der Bau des Reiheneckzems an der oberen Aller. Zeitschr. f. prakt. Geol. 1913, S. 28.

- R. LACHMANN, Über den heutigen Stand der Ekzemfrage. Kali 1913, H. 7, S. 161.
 —, Zur Klärung tektonischer Grundbegriffe. Monatsber. d. deutsch. geol. Ges. 1914, Bd. 66, S. 227.
- , Über Carnallitisierung der Südhartzkalilager. Kali 1917, H. 12, S. 191.
 —, Ekzeme und Tektonik. Zentralbl. f. Min. usw. 1917, S. 414.
- L. LÖWE, Über sekundäre Mineralbildung auf Kalisalzlagern. Dissert. Leipzig 1903. Zeitschr. f. prakt. Geol. 1903, S. 331.
- H. LÜCK, Über den Parallelismus der Hartsalz- und Carnallitablagerungen im Berlepschbergwerke bei Staßfurt. Kali 1913, H. 3, S. 50 und Dissertation Leipzig 1914.
- F. v. MARÉES, Der Sarstedt-Sehnder Salzhorst. Kali 1913, H. 2, S. 25, H. 23, S. 577.
 —, Bewegungsepochen beim Aufsteigen des Sarstedt-Sehnder Salzhorstes. Kali 1916, H. 16, S. 241.
- W. MAY, Zur Stellung des Salzkörpers von Einigkeit bei Fallersleben im Schichtenverbande des Deck- und Nebengebirges. N. Jahrb. 1915, B.-Bd. XL, S. 51.
- H. L. F. MEYER, Zur Entstehung der deutschen Kalisalzlager. Ber. d. Oberhess. Ges. f. Natur- und Heilkunde zu Gießen, N. F. Naturw. Abt. 4, 1910/11, S. 142.
 —, Die Festlandsbildungen des Zechsteins am Ostrande des rheinischen Schiefergebirges. Kali 1911, H. 9, S. 179.
 —, Über den Zechstein im Spessart und Odenwald. Zentralbl. f. Min. 1913, S. 742.
 —, Die Gliederung des Zechsteins. Ber. d. Oberhess. Ges. f. Naturw. und Heilkunde zu Gießen. N. F. Naturw. Abt. 6, 1914, S. 109.
- L. MILCH, Über Zunahme der Plastizität bei Kristallen durch Erhöhung der Temperatur. N. Jahrb. f. Min. 1909, Bd. I, S. 60.
 —, Über Plastizität der Mineralien und Gesteine. Geol. Rundschau 1911, Bd. II, S. 145.
- O. MÜGGE, Über Translationen und verwandte Erscheinungen in Kristallen. N. Jahrb. f. Min. 1898, Bd. I, S. 71.
- M. NAUMANN, Beitrag zur petrographischen Kenntnis der Salzlagerstätte von Glückauf-Sondershausen. Dissert. Leipzig 1911.
 —, Die Entstehung des konglomeratischen Carnallitgesteines und des Hartsalzes sowie die einheitliche Bildung der deutschen Zechsteinsalzlager ohne Deszendenzperioden. Kali 1913, H. 4, S. 87.
 —, Die sekundäre Entstehung des Borazits der deutschen Zechsteinsalzlager in ihrer Abhängigkeit vom Kieserit. Kali 1913, H. 17, S. 442.
- NETTEKOVEN-GEINITZ, Die Salzlagerstätte von Jessenitz in Mecklenburg. Mitteil. d. Meckl. geol. Landesanstalt 1905, S. 17.
- C. OCHSENIUS, Die Bildung der Steinsalzlager und ihrer Mutterlaugensalze unter spezifischer Berücksichtigung der Flöze von Douglasshall in der Egelschen Mulde. Halle 1877.
 —, Übereinstimmung der geologischen und chemischen Bildungsverhältnisse in unseren Kalilagern. Zeitschr. f. prakt. Geol. 1905, Bd. 13, S. 167.
- J. F. POMPECKJ, Zur Frage hoher Temperaturen bei der Entstehung mancher Kalisalze. Zeitschr. f. prakt. Geologie 1911, Bd. 19, S. 166.
 —, Das Meer des Kupferschiefers. Branca-Festschrift, Leipzig 1914.
- F. POSEPNY, Studien aus dem Salinargebiete Siebenbürgens. Jahrb. k. k. geol. Reichsanst. 1867, S. 475; 1871, S. 123.

- H. PRECHT, Über Vorkommen und Verarbeitung von Salzton aus dem Staßfurter Salzlager. Chemikerzeitung 1882, Bd. 6, S. 197.
- , Sekundäre Salzbildung im Kalisalzlager. Zeitschr. d. Ver. deutsch. Ing. 1898, Bd. 42, S. 677; Zeitschr. f. angew. Chemie 1899, S. 186.
- , Die norddeutsche Kaliindustrie. Staßfurt 1907, 7. Aufl., herausgeg. von R. EHRHARDT.
- , Über die Bildung des jüngeren Steinsalzes der Zechsteinformation, mit einem Nachwort von E. ERDMANN. Kali 1909, H. 10, S. 223.
- O. RENNER, Salzlager und Gebirgsbau im Leinetal. Lagerst.-Archiv, Berlin 1914.
- O. RIEDEL, Chemisch-mineralogisches Profil durch das ältere Salzgebirge des Berlepschbergwerkes bei Staßfurt. Zeitschr. f. Kristallogr. 1912, Bd. 50, S. 139.
- C. RIEMANN, Die Geologie der deutschen Salzlagerstätten. Staßfurt 1908.
- , Die deutschen Salzlagerstätten. Leipzig 1913, B. G. Teubner.
- F. RINNE, Gesteinskunde, 1. Aufl. 1901; 5. Aufl. 1920.
- , Beitrag zur Kenntnis der Umformung von Kalkspatkristallen und von Marmor unter alseitigem Druck. N. Jahrb. f. Min. 1903, Bd. I, S. 160.
- , Plastische Umformung von Steinsalz und Sylvin unter alseitigem Druck. Ebenda 1904, Bd. I, S. 114.
- , Über die Umformung von Carnallit unter alseitigem Druck im Vergleich mit Steinsalz, Sylvin und Kalkspat. v. KOENEN-Festschrift 1907, S. 369.
- und E. BOÈKE, Über Thermometamorphose und Sammelkristallisation. TSCHERMAK's min.-petrogr. Mitt., N. F. 1908, Bd. 27, S. 393.
- , Zur chemisch-mineralogischen Erforschung der deutschen Kalisalzlagerstätten. Antrittsvorlesung, Leipzig 1910.
- , Salzpetrographie und Metallographie im Dienste der Eruptivgesteinskunde. Fortschritte d. Mineral., Krist. u. Petrogr. 1911, Bd. I, S. 181.
- , Natürliche Translationen an Steinsalzkristallen. Zeitschr. f. Kristallogr. 1912, Bd. 50, S. 259.
- , Metamorphosen an Salzen und Silikatgesteinen. Sitzungsber. d. Sächs. Ges. d. Wissenschaften zu Leipzig 1914, Bd. LXVI.
- , Die Entstehung der kieseritischen Sylvinhalite durch geothermale Pressungsmetamorphose. N. Jahrb. f. Min. 1916, Bd. I, S. 1.
- A. RITZEL, Die Translation der regulären Halogenide. Zeitschr. f. Kristallogr. 1914, Bd. 53, S. 97.
- , Kristallplastizität. Fortschritte der Mineral., Krist. u. Petr. 1912, Bd. II, S. 62.
- M. RÓZSA, Neuere Daten zur Kenntnis der warmen Salzseen. Berlin 1911.
- , Über den organischen Aufbau der Staßfurter Salzablagerungen. Staßfurt 1912. Als Manuskript gedruckt. Dasselbe, Berlin 1914.
- , Daten zur Kenntnis des organischen Aufbaues der Staßfurter Salzablagerungen. Kali 1913, H. 6, S. 143; H. 10, S. 242; H. 20, S. 505.
- , Über die posthunen Umwandlungen in den Staßfurter Salzablagerungen. Zeitschr. f. anorg. Chemie 1914, Bd. 86, S. 163.
- , Über die posthunen Umwandlungen der Kali- und Magnesiumsalze in den Salzablagerungen der Werra-Gegend. Ebenda 1914, Bd. 88, S. 321.
- , Über die chemische quantitative Zusammensetzung der Staßfurter Salzablagerungen. Ebenda 1914, Bd. 90, S. 377.
- , Die Entstehung des Hartsalzes. Ebenda 1915, Bd. 91, S. 299.
- , Zusammenfassende Übersicht der in den deutschen Kalisalzlagern stattgefundenen chemischen Umwandlungsprozesse. Ebenda 1915, Bd. 92, S. 297.

- M. RÓZSA, Über den chemischen Aufbau der Kalisalzablagerungen im Tertiär des Oberelsaß. *Ebenda* 1915, Bd. 93, S. 137.
- , Die physikalischen Bedingungen der Akkumulation von Sonnenwärme in den Salzseen. *Phys. Zeitschr.* 1915, H. 16, S. 108.
- , Die sekundären Umwandlungsvorgänge des Kaliumhauptsalzes. *Földt. Közl.* 1915, Bd. 45, S. 293.
- , Die quantitativen chemischen Beziehungen der Hydrothermalmetamorphose der Hauptsalze im Staßfurter Kalisalzager. *Zeitschr. f. anorg. Chemie* 1916, Bd. 94, S. 92.
- , Über die Ausscheidung und Thermometamorphose der Zechsteinsalze Bischoffit, Kainit und Astrakanit. *Ebenda* 1916, Bd. 97, S. 47, 115.
- , Über die posthunen Einlagerungen im Hauptanhydrit. *Ebenda* 1916, Bd. 98, S. 327.
- , Das Vorkommen und die Entstehung des Hartsalzkainitits. *Zentralbl. f. Min. usw.* 1916, S. 505.
- , Das Bestehen von Bischoffitlagern und die sekundären Umwandlungsvorgänge der Zechsteinkalisalze. *Zeitschr. f. anorg. Chemie* 1917, Bd. 101, S. 276.
- , Die Entstehung der Zechsteinsalzlager aus chemisch geologischen Gesichtspunkten. *Zentralbl. f. Min. usw.* 1917, S. 35.
- , Jodgehalt und Laugeneinschlüsse im Zechsteinsalzager. *Zentralbl. f. Min. usw.* 1917, S. 172.
- , Entstehung des südharzer anhydritischen Sylvinit-Halits. *Zentralbl. f. Min. usw.* 1917, S. 490.
- , Die Zusammensetzung und die Entstehung der zwischen dem Polyhalitlager und dem kieseritischen Carnallit-Halit liegenden Teile der Kalisalzager. *Kali* 1918, H. 24, S. 383.
- , Zusammenfassende Übersicht der Gliederungsverhältnisse und Umwandlungsvorgänge im älteren Zechsteinkalisalzager. *Zentralbl. f. Min.* 1918, S. 361.
- C. RÜHLE, Aufbau der Kalisalzagerstätte des Bernburger Sattels usw. *Dissert.* Leipzig 1913, abgedr. im 6. Jahresber. des Niedersächs. Geol. Ver. zu Hannover 1913.
- J. SCHLUNCK, Salzager und Kalisalze im oberen Buntsandstein (Röt). *Kali* 1913, H. 11, S. 272, H. 13, S. 314, H. 14, S. 350, H. 16, S. 398.
- TH. SCHMIEBERER, Die gebirgsbildenden Vorgänge zwischen dem Flechtinger Höhenzug und der Helmstedter Braunkohlenmulde. *3. Jahresber. des Niedersächs. geolog. Ver. zu Hannover* 1910, S. 217.
- , Zur Tektonik des oberen Allertals und der benachbarten Höhenzüge. *Monatsber. d. deutschen geol. Ges.* 1909, S. 499.
- FR. SCHÖNDORF, Über das Aufsteigen des Salzgebirges. *Kali* 1913, H. 19, S. 481.
- G. SCHRÖDER, Studien über die Zunahme der Plastizität beim Steinsalz durch Temperaturerhöhung. *Dissert.* Greifswald 1914.
- F. SCHÜNEMANN, Untersuchungen auf den Kaliwerken des Staßfurter Sattels. *Zeitschr. f. prakt. Geol.* 1913, Bd. 21, S. 205.
- E. SEIDL, Die permische Salzagerstätte im Graf Moltke-Schacht usw. *Archiv für Lagerstättenforschung* 1914, Heft 10.
- K. STIER, Strukturbild des Benther Salzgebirges. *Dissert.* Leipzig, 8. Jahresber. des Niedersächs. geol. Ver. zu Hannover 1914.
- H. STILLE, Über das Alter der deutschen Mittelgebirge. *Zentralbl. f. Min. usw.* 1909, S. 270.

H. STILLE, Die Kalischätze der Provinz Hannover 1910.

—, Das Aufsteigen des Salzgebirges. Zeitschr. f. prakt. Geolog. 1911, Bd. 19, S. 91.
 —, Überfaltungerscheinungen im Hannoverschen Salzgebirge. 4. Jahresber. des Niedersächs. geolog. Ver. zu Hannover 1911.

—, Die Faltung des deutschen Bodens und des Salzgebirges. Kali 1911, H. 16, S. 341, H. 17, S. 365.

—, Injektivfaltung und damit zusammenhängende Erscheinungen. Geolog. Rundschau 1917, Bd. VIII, S. 89.

—, Tektonische Evolutionen und Revolutionen in der Erdkrinde. Antrittsvorlesung, Leipzig 1913.

—, Die saxonische Faltung. Monatsber. d. deutsch. geol. Ges. 1913, Bd. 65, S. 575.

—, Tektonisches Bild des Benther Sattels. 7. Jahresber. d. Niedersächs. geolog. Ver. zu Hannover 1914.

—, Hebungen und Faltungen im sogenannten Schollengebirge. Monatsber. d. deutsch. geolog. Ges. 1916, Bd. 68, S. 269.

—, Über Hauptformen der Orogenese und ihre Verknüpfung. Ber. d. Ges. d. Wissensch. zu Göttingen, math.-phys. Kl. 1918, S. 362.

G. TAMMANN, Über die Art des Fließens kristallinischer Körper. Ber. d. Ges. d. Wissensch. zu Göttingen, math.-phys. Kl. 1915.

TORNQUIST, Deutschlands Kaliindustrie. Beil. zur „Industrie“ 1906, S. 93.

H. THÜRACH, Das Kalisalzlager im Tertiär des Rheintales und seine mögliche Verbreitung in Baden. Allgem. österr. Chem.- u. Techn.-Ztg. 1908, H. 1.

J. WALTHER, Lithogenese der Gegenwart. Jena 1893/94.

—, Das Gesetz der Wüstenbildung in Gegenwart und Vorzeit. Leipzig 1912, Quelle u. Meyer.

—, Die Entstehung von Salz und Gips durch topographische und klimatische Ursachen. Zentralbl. f. Min. usw. 1903, S. 211.

—, Geschichte der Erde und des Lebens. 1908.

—, Salzlagerstätten und Braunkohlenbecken in ihren genetischen Lagerungsbeziehungen. Kali 1918, H. 13, S. 210.

W. WAGNER, Kalisalzlager im Tertiär des Oberelsaß. Mitteil. der Philomath. Ges. in Els.-Lothr. 1911, Bd. 4, H. 4.

—, Gliederung und Lagerung des Tertiärs im Kalisalzgebiet des Oberelsaß. Ebenda 1912, Bd. 4, H. 5.

—, Einpressungen von Salz in Spalten von Salz- und Kalisalzablagerungen des Oberelsaß. Mitteil. der geolog. Landesanst. Els.-Lothr. 1916, Bd. IX, H. 2.

L. VAN WERWEKE, Tektonische Vorgänge zur Zeit der Entstehung der Salzlagerstätten. Mitteil. d. Philomath. Ges. in Els.-Lothr. 1911, Bd. 4, H. 4.

—, Stauchungen in der Lettenkohle. Mitteil. der geolog. Landesanst. Els.-Lothr. 1913, Bd. VIII, H. 2.

—, Tektonik des Sundgaues und Beziehungen zum Kalisalzvorkommen im Oberelsaß und Baden. Ebenda.

W. WETZEL, Eine Umwandlung des Gipses im Bereich der deutschen Zechsteinsalzlager. Kali 1911, H. 3. S. 58.

HESS v. WICHENDORF, Der Gips- und Salzstock von Sperenberg. Monatsber. d. deutsch. geol. Ges. 1913, Bd. 65, S. 141.

v. WOLFF, Die Bedeutung der Salzpetrographie für den Kalibergbau. Jahrb. des Halleschen Verbandes f. d. Erforsch. d. mitteld. Bodenschätze 1919, S. 15.

- E. ZIMMERMANN, Marine Versteinerungen aus der Kaliregion des norddeutschen Zechsteins. Monatsber. d. deutsch. geol. Ges. 1904, Bd. 56, S. 47.
- , Über den „Pegmatitanhydrit“ usw. Ebenda 1907, Bd. 59, S. 136 und Kali 1909, H. 14, S. 309.
- , Literatur über die Geologie der deutschen Salzablagerungen. Deutschlands Kalibergbau. Festschrift zum X. allgemeinen Bergmannstag zu Eisenach 1907.
- , Steinsalz mit Wellenfurchen von Schlitz in Hessen. Monatsber. d. deutsch. geol. Ges. 1908, Bd. 60, S. 70.

Ausführliche Zusammenstellung der Salzliteratur von 1600—1907 von E. ZIMMERMANN s. o.

Leipzig, Institut für Mineralogie und Petrographie.
Talstr. 38.