

Beobachtungen über Diapirismus

Autor(en): **Heim, Arnold**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **51 (1958)**

Heft 1

PDF erstellt am: **26.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-162425>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

ECLOGAE GEOLOGICAE HELVETIAE

Vol. 51, N° 1 — 1958

Beobachtungen über Diapirismus

Von Arnold Heim, Zürich

Mit 18 Textfiguren und 2 Tafeln (I und II)

Gedruckt mit Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung
der wissenschaftlichen Forschung

INHALT

| | |
|---|----|
| Die allgemeine Erscheinung | 1 |
| Gase | 3 |
| Flüssigkeiten | 4 |
| Ton und Schlamm | 4 |
| Eis; Hydrodiapire | 5 |
| Diapire aus Sedimentgesteinen – Evaporite | 6 |
| Zagros-Ketten, SW-Iran | 7 |
| Diapirinseln im Persischen Golf | 12 |
| Zentral-Iran | 16 |
| Atlasgebirge, Nordafrika | 17 |
| Rumänien | 19 |
| Norddeutschland | 21 |
| Nordalpen | 23 |
| SW-Frankreich, Spanien, Portugal | 23 |
| Formen, Kombinationen, Inhalt, Zeitfolge | 25 |
| Laven und Tuffe | 26 |
| Magmen der Tiefe | 27 |
| Inkompetente und disharmonische Faltung | 28 |
| Tektonische Diapire und diapirartige Antiklinalen | 29 |
| Diapirdruck | 30 |
| Literaturnachweis | 31 |

DIE ALLGEMEINE ERSCHEINUNG

Unter Diapirismus versteht man in der Erdgeschichte eine der Schwerkraft entgegengerichtete Durchbruchsbewegung einer relativ leichten beweglichen Gesteinsformation durch schwerere, darüber gelagerte Schichten. Der Diapir ist die Gestalt der ausgestossenen Masse.

Die jetzt international gebräuchliche Bezeichnung Diapir wurde zu Anfang dieses Jahrhunderts durch den bedeutenden Geologen und ehemaligen Kultusminister L. MRAZEC (1914/15) in Bukarest geprägt auf Grund seiner Untersuchungen

der Salzstöcke im Petroleumgebiet von Ploesti. Dort wurde wohl zum erstenmal durch zahlreiche Bohrungen die Tiefenstruktur der Salzstöcke genau festgestellt. Seither sind unzählige Diapire in den verschiedenen Erdteilen gefunden worden, sowohl an der Oberfläche, wie auch als fossile Diapire unter allseitiger Bedeckung durch Formationen, die jünger sind als die durchbrochenen. Anlass zum Aufsuchen und genauen Feststellen der unterirdischen Diapire durch Bohrungen und geophysikalische Vermessungen gaben die Erdölansammlungen in den Randzonen der Salzstöcke.

Die Auslösung zum Durchbruch an einer relativ schwachen Stelle der Erdrinde kann veranlasst sein durch Erdbeben, durch tektonischen Zusammenschub oder auch durch Zerrung auf Klüften im Hangenden der primären Salzformation. Der Durchbruchsort kann bestimmt werden durch primäre Unebenheiten an der Basis der Salzformation. Die Auswirkung ist jedoch an sich atektonisch, durch die Schweredifferenz des Salzes im Vergleich zu den hangenden Formationen bestimmt. Unter atektonisch verstehen wir eine Deformation in der Erdrinde, die sich ohne Tangentialdruck, durch reine Halokinese, vollziehen kann. Zur Entfaltung von Salzdiapiren genügt ein Belastungsdruck von wenigen hundert Metern nicht. Die meisten stammen aus Tiefen von mehr als tausend Metern.

In den häufigsten Fällen steht aber der Diapirismus in den sedimentären Formationen in Zusammenhang mit tektonischen Einwirkungen, wie Faltungen, Überschiebungen, Verwerfungen. Der diapirische Auftrieb kann bei der tektonischen Deformation mitwirken oder auch stören. Im Einzelfall können Diapire anscheinend ganz unmotiviert auftreten, nicht nur in Antiklinalachsen, sondern auch in Schenkeln oder gar in Synklinalen (Iran).

Die grossen Diapirfelder in Zentraliran, Norddeutschland und Texas-Louisiana sind nicht linear gelagert, wie man sie an Verwerfungen erwarten sollte, sondern zeigen eine unregelmässig individuelle Gruppierung. Äusserlich bilden sie meist Stöcke und Säulen von kreisrundem oder ovalem Horizontalschnitt (Taf. II oben). Wie von B. G. ESCHER (1955/56) bereits klargelegt, ergibt sich die zylindrische Form aus dem Bestreben der Diapirmasse, auf kleinstmöglicher Reibungsfläche aufzusteigen. Dies gilt ja auch für vulkanische Schlote.

ESCHER und KUENEN haben 1929 prachtvolle Diapire verkleinert experimentell dargestellt unter hohem Vertikaldruck. Diapire können auch in vollkommen horizontaler Schichtlage ohne tektonischen Einfluss, bloss vermöge der Schweredifferenz, also durch reine Halokinese entstehen, wie an der Gulf Coast in USA.

Wo immer eine schwere Masse über eine leichtere zu liegen kommt, gerät die unterliegende in ein labiles Gleichgewicht, und ist bestrebt, nach oben auszuweichen. Die Kraft zum Auftrieb und Durchbruch entspricht dem Druck der überlagernden Formationen. Sind diese aber nicht lockere Sedimente, sondern bilden ein massives, festes Dach, so muss dieses gesprengt werden. Ein solcher Fall, wo der sich bildende Diapir im embryonalen Stadium eines Salzkissens zurückgeblieben ist, bietet die Antiklinale von Qum in Iran, wo in 2670 m Tiefe, unter ungeheurem Druck das Erdöl aus Bohrung Alborz Nr. 5 ausgebrochen ist.

Das Ausweichen nach oben kann sich in der Erdrinde nur dann vollziehen, wenn die leichteren, liegenden Formationen genügend deformierbar und beweglich

sind, und wenn sich diesen durch irgend einen Anstoss (Erdbeben) oder eine darüber entstehende Schwächezone die Tür aus der Gefangenschaft öffnet.

Mehr oder weniger plastisch sind ja bekanntlich alle Gesteine in grosser Tiefe, wo die allseitige Belastung grösser ist als die Druckfestigkeit. Diapirisch können sich auch solche relativ leichte Gesteine verhalten, die an der Erdoberfläche völlig spröd erscheinen. Dazu gehören Eis und vor allem Salzgesteine (Evaporite).

Füllen wir in einen Glaszylinder einen schweren Brei, der z. B. Eisenpulver enthält, darüber einen leichteren, und stellen alsdann den Zylinder vorsichtig auf den Kopf. Der leichte Brei mag sich geraume Zeit in diesem labilen Zustand halten, bis durch eine Erschütterung der diapirische Aufstieg ausgelöst wird. Derartige Experimente sind durch NETTLETON (1934) durchgeführt und ausführlich beschrieben worden.

Die Abbildungen der künstlichen Diapire von ESCHER und NETTLETON zeigen die verschiedenen Stadien der Entwicklung, die den grossen Diapiren der Natur mit ihrer peripheren Ringeinsenkung entsprechen. Sie werden ohne Seitendruck hervorgebracht.

Die natürlichen Diapire zeichnen sich durch grosse Mannigfaltigkeit aus, sowohl inhaltlich, als auch räumlich und zeitlich. Fast jeder Diapir zeigt seine Eigenart. Vergessen wir vor allem nicht den Zeitfaktor. Ein Gestein, das uns hart und spröd erscheint, kann sich schon an der Oberfläche während sehr langer Zeit bruchlos verbiegen. In Wüsten von Argentinien und Iran überraschten mich oft einzelne Pfeiler aus horizontal geschichteten Mergeln mit einer harten Sandsteinbank, die sich kappenförmig über den Pfeiler herabgebogen hatte.

Diapirismus ist aber nicht ausschliesslich bedingt durch inverse Schwere Lagerung. Unter tektonischem Tangential- oder Vertikaldruck kann auch eine relativ schwere, aber sehr plastische oder flüssige Masse durch die darüberliegenden leichteren ausgepresst werden, wie z. B. bei Basaltlaven oder Phonolithen. Über die Plastizität des Anhydrits (Dichte 3) scheinen noch keine Experimente vorzuliegen. Der leichtere Gips (Dichte 2,3) wird ja daraus erst durch Aufnahme von Wasser gebildet.

Der Diapirismus der Erde ist dadurch bedingt, dass die Zentrifugalkraft ihrer Rotation kleiner ist, als die Gravitation. Würde die Erde mehr als 18mal schneller rotieren, so gelangten die schwersten Massen an die Oberfläche. Es gäbe dann Diapire schwerer Gesteine, welche die leichteren durchstossen.

Betrachten wir nun in den folgenden Abschnitten den Diapirismus als eine allgemeine Erscheinung bei inversen Schwereüberlagerungen. In diesem weitesten Sinne kommen nicht nur feste Gesteine, sondern auch Gase und Flüssigkeiten der Erdrinde in Betracht. Unter Halokinese versteht man im Sinne von TRUSHEIM (1957) die Bewegungsform von halogenen Evaporiten (Salsen). Halokinese ist also eine spezielle Art des Diapirismus.

GASE

Alle Gase, die schon bei der Sedimentation am Wassergrund vorhanden waren, sowie diejenigen, die sich dort durch Zersetzungen bilden (z. B. aus organischer Substanz) und die sich bei der Diagenese ausscheiden, streben nach oben. Sie warten auf eine günstige Gelegenheit, um auszubrechen, oder sie entweichen durch

Diffusion ganz langsam, sofern die überliegenden Gesteinsformationen eine über Millionen von Jahren fortsetzende Durchdringung ermöglichen. Dazu gehören Luft, CO₂, CH₄ und andere Gase. Bilden sie sich am Grunde der Gewässer, so steigen sie als Blasen auf, das Wasser durchbrechend. Bei starkem Ausbruch aus tieferen Erdschichten sind die Gase imstande, Schlamm und die verschiedensten Gesteinsbrocken mitzureissen, wie bei den Schlammvulkanen. Die grössten bekannten Schlammvulkane sind wohl diejenigen der Petroleumgebiete von Baku im Kaukasus. Sehr bedeutende sind uns auch in Iran bekannt geworden, so in Gurgan im Norden und am Golf von Oman im Süden. Wie neuerdings K. KREJCI-GRAF (1940) überzeugend demonstriert hat, zeigen diese Schlammvulkane überraschende Ähnlichkeiten mit dem Vulkanismus. Man könnte sie auch Gasdiapire nennen.

FLÜSSIGKEITEN

Alle Sedimentgesteine, die im Wasser abgesetzt wurden, sind ursprünglich wasserhaltig. Sie entäussern sich teilweise schon des Wassergehaltes bei der Diagenese. Durch Überlastung mit weichen, dann festen Sedimenten wird der Wassergehalt mehr und mehr ausgepresst, und gar erst, wenn ein tektonischer Druck einsetzt. Wird die Überlagerung durch poröse Gesteine gebildet, so kann das Wasser sich langsam entleeren. Es verdunstet an der Oberfläche oder bildet kleine ständige Quellen. Ist der Auftrieb erschwert, so kann aus den Sedimentgesteinen ein ruckweises Austreten entstehen, umso stärker, wenn die Wasser gas- haltig oder erhitzt und dampfhaltig sind. Dazu gehören die zahlreichen juvenilen Quellen, viele Thermen, Säuerlinge, Mineralquellen, radioaktive Quellen, Geysire etc. Sie sind teilweise an magmatische Intrusionen gebunden, können aber auch Sedimentgesteinen entstammen, deren Wassergehalt ununterbrochen oder etappenweise ausgepresst wird. Solche juvenile Quellen sind bekanntlich von ganz anderer Entstehung, als die vadosen, von der Oberfläche stammenden.

Noch stärker als der diapirische Auftrieb des Wassers ist der Auftrieb des leichteren Erdöls mit oder ohne Gasgehalt. Bekanntlich sammelt sich bei einer normalen Erdölantiklinale unter dem Gebirgsdruck innerhalb der porösen Schichtlage über dem Wasserniveau das Erdöl und zu oberst das Gas. Ein Erdölausbruch ist also gewissermassen ein «flüssiger Diapir».

TON UND SCHLAMM

Zwischen Tongestein und Wasser stehen plastischer Ton und Schlamm, deren Dichte je nach dem Wassergehalt zwischen 2,6 und nahe an 1 variieren kann.

Auf die Schlammvulkane wurde schon hingewiesen. Es gibt auch solche (Salsen) ohne Gas.

H. H. SUTER hat aus Trinidad Tondiapire beschrieben, bei denen freilich der tektonische Tangentialdruck massgebender war, als die Schweredifferenz zum Nebengestein. Gleiches gilt auch für die auffallenden Tondiapire, die WIEDENMAYER (1950) aus dem Apennin beschrieben hat. Dort sind es die Tone der Scaglia (Obere Kreide), die durch die Tertiärschichten ausgebrochen sind.

Solche Tondiapire scheinen sich auf junge Faltungszonen und relativ geringe Tiefe zu beschränken, weil die alten Tongesteine in grosser Tiefe ihren Wassergehalt durch den hohen Druck schon grossenteils eingebüsst haben und erhärtet sind.

EIS; HYDRODIAPIRE

Das Eis von der Dichte 0,9 und darunter zeigt mit dem Verhalten des Salzes manche Ähnlichkeit. In beiden Fällen ist die leichte Deformierbarkeit in Beziehung zum inneren Kristallgefüge.

Eis ist das leichteste feste Gestein. Unter allseitigem Druck erweist es sich besonders nahe dem Schmelzpunkt noch plastischer als das Steinsalz und äussert sich im Fliesen der Gletscher. Während Anhydrit sich durch Wasseraufnahme bläht und zu Gips wird, entsteht Eis gewissermassen durch Blähung von Wasser, wodurch die Dichte sich um 10% vermindert. Ein wesentlicher Unterschied zum Salz besteht darin, dass das Eis bei einer Temperatur von über 0 Grad schmilzt und dadurch in die fast unkomprimierbare bewegliche Phase übergeht.

Das sich aus Schnee bildende Gletschereis ist lufthaltig. Gelangt es an den Grund der Gletscher, so wird die eingeschlossene Luft komprimiert. Schläge ich mit einer Messerspitze auf ein Stück eines gestrandeten Eisbergs, so platzt es explosionsartig. Anders verhält sich das fast luftfreie Grundeis, das unter Wasser oder in der Tiefe aus Grundwasser entsteht. Bekanntlich bildet sich Grundeis, wenn Wasser über hartgefrorenen Grund in Täler oder Wannen fliesst.

Da das Eis leichter ist als Wasser und erst recht leichter als darüberlagernde Sedimentschichten, so wären die Grundbedingungen zur Bildung von Eisdiapiren in hohen Erdbreiten gegeben.

Diese Zeilen waren bereits geschrieben, als ich einem Vortrag von FRITZ MÜLLER in der Geographisch-Ethnographischen Gesellschaft in Zürich vom 20. März 1957 beiwohnen konnte, der über seine jahrelangen Eisforschungen in NW-Grönland und in NW-Canada berichtete. Verblüffend schöne Aufnahmen von Eishügeln wurden projiziert, die aus einem Eiskern mit Schutt-Decke bestehen und oft ein kraterartiges Seelein aus Schmelzwasser tragen. Diese Hügel sind nicht zu verwechseln mit den Schmelzkegeln auf der Oberfläche der Gletscher, die sich von oben her als Relikte durch Ablation bilden, sondern sie erheben sich von unten her aus den Alluvionen der Talgründe, und erreichen Höhen von 50 m mit einem Basisumfang von 500 m oder mehr.

Zuerst wurden solche Eishügel von russischen Forschern aus Sibirien und Nordural beschrieben und Bulgunyakhi genannt. TOSTICHIN beschreibt sie aus Transbaikalien und nennt sie Hydrolakkolithe.¹⁾ In den dortigen Alluvialebenen herrschen bekanntlich die grössten Temperaturdifferenzen der Erde zwischen Sommer und Winter. HANS STAUBER hat Bulgunyakhis in NE-Grönland gefunden.

H. BÜTLER (1954) gibt ausgezeichnete Fotobilder mit Beschreibung von Eishügeln in NE-Grönland, die er ebenso als Hydrolakkolithe bezeichnet. Da es sich nicht nur um einen eruptiven, sondern einen diapirischen Vorgang ohne Einwirkung von grosser Hitze handelt, wird die Bezeichnung Hydrodiapire vorgeschlagen. Im Mackenzie-Delta von NW-Canada hat F. MÜLLER hunderte solcher Pseudovulkane überflogen, wo sie Pingo genannt werden. Dort und auch in NE-Grönland hat er einige derselben mittelst Schächten und Bohrungen bis in alle Einzelheiten untersucht. Mit Spannung sieht man seinem noch auszuarbeitenden Werk entgegen (Taf. I oben).

¹⁾ Vergl. STOLTENBERG in Geol. Rundschau 26, 1935, p. 412.

Die Pingos sind nach H. BÜTLER und F. MÜLLER das Ergebnis von «aus der Tiefe aufstossendem Grundwasser, das unter oder zwischen dem Dauerfrostboden zirkuliert». Als Folge der aus dem Inneren stammenden Erdwärme schmilzt der Frostboden (Permafrost) von unten. Seine Tiefe, durch Bohrungen ermittelt, kann einige hundert bis 600 m betragen. Das Wasser steigt diapirisch auf, gefriert wieder unterwegs und sammelt sich infolge der Druckentlastung nahe der Oberfläche in Form einer Eiskuppe unter dem Schuttmantel, den sich der Diapir beim Aufsteigen aufgeladen hat. Nach den genannten Forschern sind die Eiskuppen die Folge einer Erhöhung der Tiefentemperatur von einigen oder vielen Jahren. Diese Innentemperatur kann variieren als Folge innerer Krusten- und Wärmebewegungen, vor allem aber auch als Folge von langfristigen Temperaturveränderungen von der Erdoberfläche her, also von klimatischen Veränderungen.

Ist diese Auffassung richtig, so drängt sich die Frage auf, ob die Tausende ähnlicher Pingos in NW-Canada und N-Alaska im Zusammenhang stehen mit dem allgemeinen Rückgang der Vergletscherung im Laufe der letzten 150–200 Jahre, der ja auch bedingt ist durch Temperaturerhöhung als kosmische Erscheinung. Die Pingos wären dann umgewandelte Sonnenstrahlung. Umgekehrt könnte man vielleicht auch bis zu einem gewissen Grad Rückschlüsse ziehen aus der Grösse und Verbreitung der Hydrodiapire auf Temperaturveränderungen der Vergangenheit und auf die Niveauveränderungen am Grund des Permafrostes. Je tiefer dieses Niveau liegt, umso höher kann ein von dort stammender Auftrieb reichen, analog den tiefsten und daher höchststrebenden Salzdiapiren im persischen Golfgebiet. Wir ständen theoretisch vor der Möglichkeit einer ganzen Stufenfolge nach Bildungszeit und Formgrösse. Von den Blasen im Centimetermaßstab, die sich auf Wegen und Asphaltstrassen über Nacht oder nach Wochen bilden, können wir uns Hydrodiapire vorstellen, die zu ihrer Bildung Jahrhunderte bis Jahrtausende benötigten, aber vielleicht an der Oberfläche durch kürzerfristige Erwärmung dahinschmolzen oder erodiert wurden, nachdem der Auftrieb abgeschlossen war. Vielleicht findet man aber noch solche Giganten von Eisdiapiren in den immerkalten Gebieten der Antarktis.

Bedenken wir noch, dass die Dichtedifferenz zwischen Eis von 0,9 zu Gesteinschutt mit bis 2,6 ein Mehrfaches ist von derjenigen zwischen Steinsalz (2,1) und der Überlagerung (2,6), so ist die theoretische Möglichkeit von reinen Eisdiapiren aus fossilen Eisschichten auch ohne Mitwirkung von Wasser gegeben. Auch wenn sich Eisschote aus Wasserauftrieb gebildet haben, so können diese diapirisch aufsteigen ohne weitere Mitwirkung von Wasser, ebenso gut oder noch besser als Salzstöcke; die Pingos wären demnach als eine Wechselwirkung von flüssigem und festem Hydrodiapirismus aufzufassen.

In allen Fällen sind die Hydrodiapire atektonischen Ursprungs, das heisst, sie entstehen unabhängig von tektonischen Einflüssen.

DIAPIRE AUS SEDIMENTGESTEINEN – EVAPORITE

Die meisten der zahllosen Salz-Gips-Stöcke sind zum Unterschied der magmatischen Stöcke entstanden ohne besondere Erhitzung, ohne Durchgasung und ohne magmatische Einwirkungen, wenn gleich gelegentlich magmatische Begleiterscheinungen vorkommen.

Folgende Gesteine kommen in Betracht:

| Evaporite | Dichte | Neben- und Deckgesteine | Dichte |
|--|--------|--|---------|
| Karnallit $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | 1,60 | Kalkstein CaCO_3 | 2,4–2,6 |
| Sylvit KCl | 1,98 | Dolomit $(\text{CaMg})(\text{CO}_3)_2$ | 2,8–2,9 |
| Kainit $\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ | 2,10 | Mergel | 2,6–2,7 |
| Halit, Steinsalz NaCl | 2,16 | Ton, Kaolin (trocken) | 2,6–2,7 |
| Gips, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 2,33 | Sandstein | 2,4–2,7 |
| Anhydrit, CaSO_4 (wie Basalt) | 2,98 | Tonschiefer | bis 2,8 |

Wenn unter dem Druck grosser Meertiefen Anhydrit CaSO_4 abgelagert wird, so kann dieser vermöge seiner hohen Dichte von 3 im Diapir nur als mitgerissen auftreten, wie ein Nebengestein. Wurde aber schon primär Gips abgelagert, so kann dieser vermöge seiner Dichte von 2,3 im Diapir auch aktiv mitwirken. Verwandelt sich der Anhydrit während des Auftriebes durch Wasseraufnahme in Gips, so wird er auch noch infolge seiner Volumvermehrung und die dabei erzeugte chemische Energie bei der Umkristallisierung erst recht energisch mitwirken. Die durch Blähung und Quellung entstandenen Fältelungen der Gipsschichten sind ja allgemein bekannt. Sie unterscheiden sich von Fältelungen ohne Quellung dadurch, dass die Schenkel statt der Umbiegungen verdickt sind, während die Umbiegungsstellen umso dünner werden. So entsteht im Kleinen wie im Grossen eine disharmonische (inkompetente) Faltung (Fig. 18).

ZAGROS-KETTEN, SW-IRAN

Die südwestlichen Randketten des Zagros-Gebirges in der Umgebung des Golfes von Hormuz gilt als das klassische Land von Salzdiapiren und zugleich wohl auch das schönste Land der Erde für junge Brachyantiklinalen.

Im Gegensatz zu Norddeutschland, Rumänien und Texas-Louisiana stehen die persischen Diapire nicht in Zusammenhang mit Erdölfeldern, oder zur Zeit wenigstens noch nicht, und dies, obwohl sich in der nordwestlichen Fortsetzung das grossartige Produktionsgebiet der ehemaligen Anglo-Iranian Oil Co. befindet. Die dortige Produktion stammt von kompetenten Antiklinalen unter einer mächtigen miozänen Salz-Gipsformation.

Trotzdem ist die fundamentale Kenntnis auch der unproduktiven Salzdiapire den britischen Geologen zu verdanken (PILGRIM, HARRISON, RICHARDSON, LEES, DE BÖCKH, LEHNER, HENSON, THOMAS, O'BRIEN u. A. der AIOP).

Etwa 100 kleine und grosse Salzdiapire wurden in der Umgebung des Golfes von Hormuz auf dem Festland (Laristan) erkannt. Dazu kommen noch zahlreiche Diapirinseln im Persischen Golf (Fig. 1).

Die äussere Form der Antiklinalen entspricht infolge ihrer Jugendlichkeit in grossen Zügen der tektonischen Form. Sie bilden im Grundriss mehr oder weniger langgestreckte Ovale mit beidseitigem Achsengefälle von 20 Grad und darüber. Jede dieser Antiklinalen bildet einen Bergrücken und jede Synklinale dazwischen eine Talniederung. So entsteht ein weites Feld, das äusserlich einem solchen von Drumlins entspricht, jedoch in 20 bis 100facher Vergrösserung.

Die Diapire sind teils axial in die Antiklinalen eingedrungen und haben diese durchstossen. Manche sind exzentrisch oder treten in Schenkeln oder gar in den Synklinaltälern auf. Der Durchstoss der Salzstöcke ist also jünger als die durchstossenen Formationen (Kreide bis Miozän) oder gleichzeitig, doch wissen wir nichts Sicheres über den Beginn des Auftriebs. (Taf. I unten und Taf. II oben; Fig. 3).

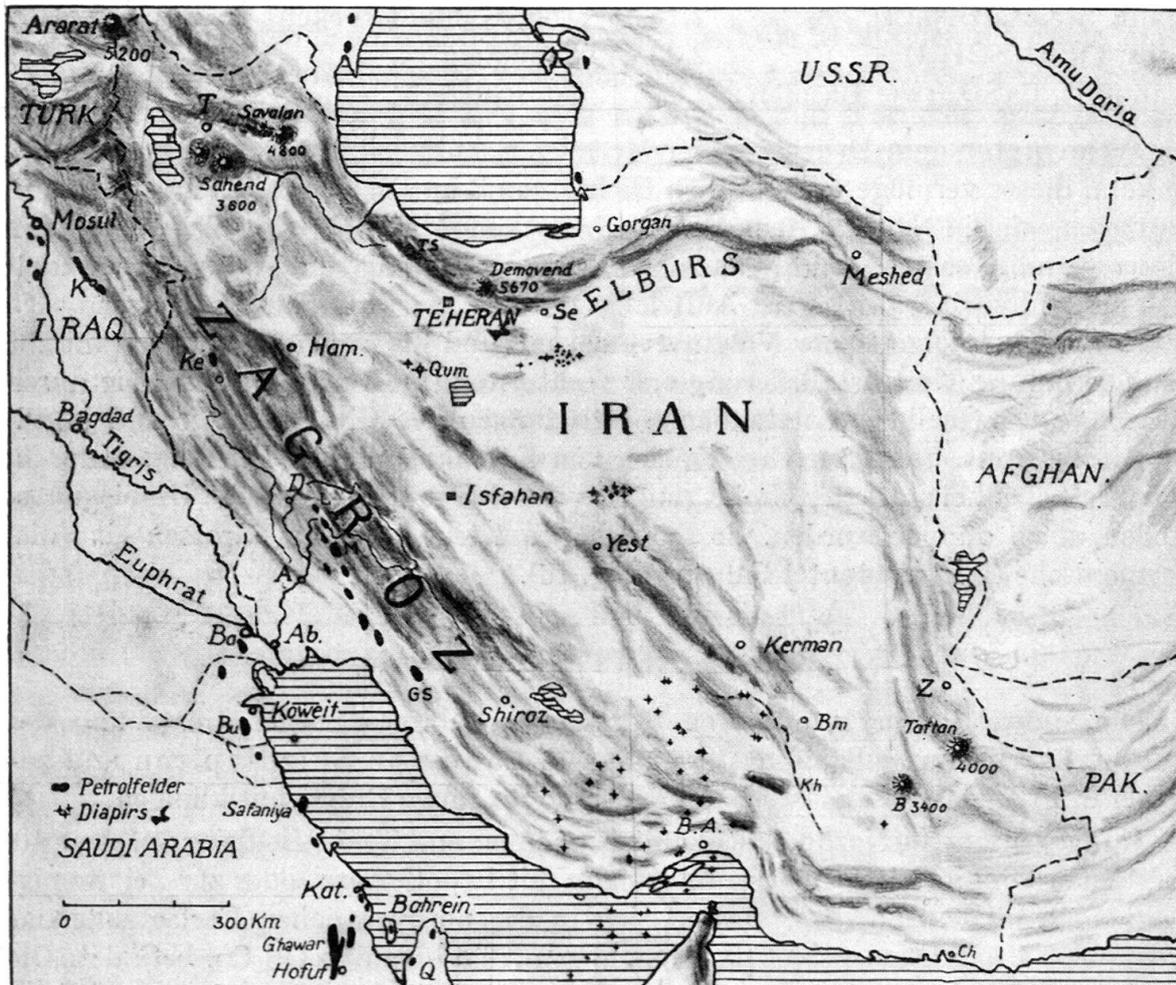


Fig. 1. Übersichts-Kartenskizze von Iran, darstellend die Landesgrenzen, die wichtigsten Orte, die Kettengebirge, die Vulkane, die Erdölfelder (schwarz), die Diapire (Kreuzchen).

| | | | |
|-----|-----------------------|-----|--------------------------------------|
| A | = Ahwaz | Kat | = Katif |
| Ab | = Abadan, Raffinerie | Ke | = Kermanshah, Ölfeld |
| B | = Vulkan Bazman | Kh | = Khush Kuh |
| BA | = Bandar Abbas | L | = Lali, Ölfeld |
| Ba | = Basra | M | = Masjid-i-Sulaiman, altes Ölfeld |
| Bm | = Bam | Q | = Qatar, Halbinsel |
| Bu | = Burgan Ölfeld | Se | = Semnan |
| D | = Dizful | T | = Tabriz, Stadt |
| GS | = Gatch Saran, Ölfeld | Ts | = Takht-i-Suleiman, Gipfel |
| Ham | = Hamadan | Z | = Zahedan, Grenzstadt |
| K | = Kirkuk, Ölfeld | | |

Es ist möglich, dass Durchbruchstellen mehr von Schwächenzonen in den ursprünglich hangenden Schichten als durch die kompetente tiefere Tektonik bestimmt waren. Nichts ist von einer zonaren Anordnung auf Verwerfungen zu erkennen. Schon die Falten selbst zeigen keine regelmässig linienförmige Anordnung und erst recht nicht die Diapire. Trotz dieser «Eigensinnigkeit» sind die Diapire deutlich vom horizontal wirkenden Faltenschub beeinflusst. Erdbeben und lokale Bruchflächen können den Auftrieb veranlassen. Gerade die Provinz Laristan ist ja ein eigentliches Erdbebengebiet. Das letzte katastrophale Beben fand am 29. Oktober 1956 statt. Nach Zeitungsberichten sollen dabei 400 Menschen umgekommen sein.



Fig. 2. Kuh Khorgu (Kuh-i-Namak), 43 km N von Bändär Abbas am Golf von Hormuz. Westliches Ende der Brachy-Antiklinale, gesehen aus SW, mit Diapirdurchbruch (linke Seite). Die Salzmasse ist gletscherartig gegen das flache Vorland geflossen und überbordert die junge Terrasse links. Fot. A. HEIM 1951

Manche der Salzdiapire sind vermutlich heute noch von innen her in leichter Bewegung, aber auch von aussen. Darauf hat schon LEES (1929) hingewiesen und mit Recht von Salzgletschern gesprochen, die unter ihrem Eigengewicht wie Gletscher in Bewegung sind und durch Breschen in den Antiklinalschenkeln in die Ebene ausfliessen (Fig. 2), Breschen, die sich die Diapire bereits bei ihrem Auftrieb geschaffen haben. An einer steilen Salzwand im Innern des Kuh-i-Anguru (Fig. 3) vernahmen wir ein leises Knistern. Schon bei weniger als 500 m Eigengewicht beginnt im Salzkörper eine langsam fliessende Bewegung an der Oberfläche.

Gletscherartiges Ausfliessen in die Ebene ist beobachtet von Kuh-i-Puhal, Kuh-i-Anguru (Fig. 3), Kuh Khorgu = Kuh-i-Namak und Kuh-i-Shamil. Vom Kuh-i-Namak in Laristan gibt O'BRIEN (1953) prächtige Abbildungen.

Die Diapire um den Golf von Hormuz enthalten verschiedenartige kleine und grosse Einschlüsse, unter denen LEES als erster kambrische Trilobiten entdeckte. Später wurden auch noch Graptoliten und andere altpaläozoische Fossilien gefunden. Die fremdartigen, passiv vom Diapir beim Auftrieb mitgeschleppten Gesteinskomplexe wurden unter der Bezeichnung Hormuz-Serie zusammengefasst (Fig. 10). Sie beweisen ein kambrisches, möglicherweise sogar präkambr-

sches Alter der Salzformation. Auf Grund eines Vergleiches mit der normalen mesozoisch-paläozoischen Schichtfolge im zentralen Zagros wurde die Tiefe des kambrischen Salzes auf mindestens 7 km geschätzt. Durch Berechnung der Massendifferenz vom Salz und Nebengestein für die bis auf 1200 m Höhe aufgedrungenen Salzstöcke von Laristan (Kuh Khorgu = ca. 1300 m) würde man auf etwa 10 km gelangen, ja noch mehr, wenn man bedenkt, dass die Diapire am Golf ausser ihrem Salz noch viel schwere Nebengesteine, selbst Hämatit mit 70 % Eisen mitgeschleppt haben. Freilich ist anzunehmen, dass bei den antiklinalen Durchspiessungen der Auftrieb durch den tektonischen Faltendruck noch wesentlich verstärkt wurde.

Die kambrischen Diapire im Wüstengürtel des Persischen Golfes sind vermutlich diejenigen aus grösster Tiefe der Erdrinde. Dem gewaltigen Druck der mächtigen Schichtfolge entsprechend haben sie anscheinend auch die grösste Höhe aller Diapire der Erde erreicht. Freilich ist zu bedenken, dass in humiden Klimaten wegen der Auswaschung nicht auf die Tiefe der Herkunft geschlossen werden kann.

Nach Aufbau, äusserer Form, Grösse und Lage in bezug auf die begleitenden tektonischen Gebilde zeigen die Falten und Diapire am Persischen Golf eine grosse Mannigfaltigkeit. Jede Gestalt hat ihre besonderen Charaktereigenschaften und würde eine Spezialuntersuchung rechtfertigen.

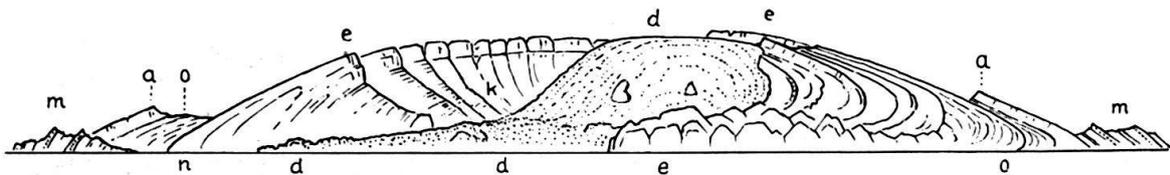


Fig. 3. Brachyantiklinale des Kuh-i-Anguru. Skizze aus SW, etwas schematisch, den gletscherartig ausfliessenden Salzdiapir darstellend.

- | | |
|--------------------------------|---|
| k = Senon-Eozänmergel | a = oligo-miozäner Asmarikalk |
| e = Eozän-Kalke | m = miozäne Molasse, Mergel mit Sandsteinbänken |
| o = oligozäne grünliche Mergel | d = Salzdiapir mit Kalkeinschlüssen |

Eine der schönsten Gestalten ist der Kuh-i-Anguru (Fig. 3) in der Provinz Laristan. Er bildet einen Antiklinalberg über der Ebene von etwa 50 km Länge und 13 km Breite. Der leicht exzentrische Diapirdurchbruch mit nachfolgender Erosion hat einen Eingang in den Kern geschaffen, der die normale Schichtfolge vom Eozän mit prachtvollen Nummulitenkalken hinab durch mächtige Flysch- und Oberkreidemergel zu einem Kern von weissem, dichtem Mittelkreidekalk mit Inoceramen offen entblösst. Wie Figur 3 zeigt, ist der Diapir aus dem Innern dieser Antiklinale gletscherartig über den Rand in die Ebene ausgeflossen.

Die tektonisch am eigenartigsten dastehende Gestalt ist der Khush Kuh, 60 km nordöstlich von Bandar Abbas. Abgesehen von einer Abdrehung des östlichen Teils mit 50° steilem Achsenfallen gegen die problematische Zindon Range mit ihrem exotischen Flysch («coloured mélange») bildet der aus der Küstenebene bis auf 2590 m Höhe sich schroff erhebende Berg eine Brachyantiklinale, die längs seiner Achse gespalten ist. Die gewaltige der Küste zugerichtete mesozoische Felswand ist erzeugt durch eine Verwerfung mit über 1000, vielleicht 2000 m Sprunghöhe, durch welche die dem Golf zugekehrte südliche Hälfte grösstenteils versenkt liegt. Längs der Spalten ist nach eruptiver Art die Salzdiapirmasse eingedrungen. Der Khush

Kuh würde ein wunderbares Thema zu einer monographischen Bearbeitung bieten (Fig. 4-5).

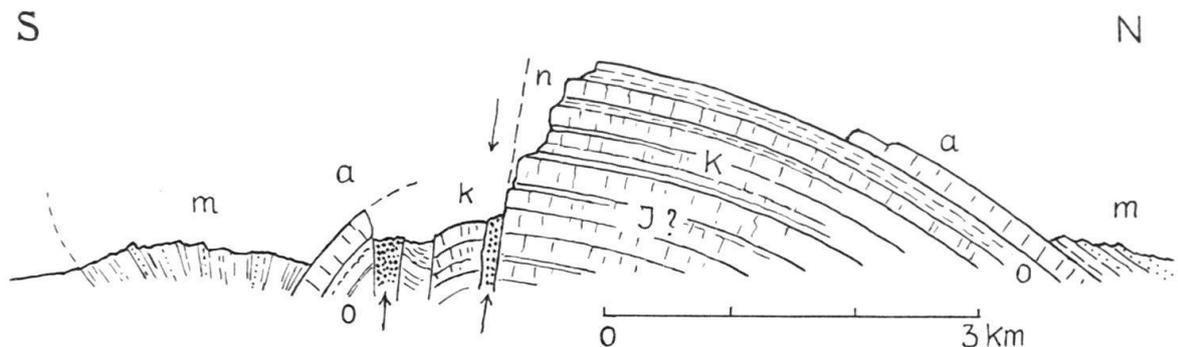


Fig. 4. Querprofil durch den Khush Kuh, 2500 m, 60 km NE Bandar Abbas am Persischen Golf. Beispiel einer längsgespaltenen Brachyantiklinale mit diapirischen Durchbrüchen, etwas schematisch.

J = Kalkfelswände, Jura
 K = Kalkfelswand der Kreide
 n = Nummulitenkalk, Eozän

o = Oligozäne Mergel mit Austerbänken
 a = Asmarikalk, oligo-miozän
 m = miozäne Molasse, Mergel mit Sandsteinbänken. Eng punktiert die Diapire.



Fig. 5. Dorf Khush und Khush Kuh 2500 m. Die dem Beobachter und dem Golf zugekehrte horizontal geschichtete Felswand aus mesozoischen Kalken ist bedingt durch gewaltige Verwerfung längs der Antiklinalachse. Die davor liegenden Felsen am Fuss der Hauptwand bilden den grossenteils versunkenen Südflügel der Brachy-Antiklinale. Auf den Verwerfungen ist das Salzgebirge diapirartig aufgedrungen. Fot. A. HEIM 1951.

Die innere Struktur der Salzstöcke in Iran kann nur ausnahmsweise an der Oberfläche beobachtet werden, so an Bruchflächen (Fig. 6 & 7). Die Transiranische Eisenbahn quert das Zagrosgebirge, und im Tunnel Nr. 122 auch einen Salzstock. Da er durch Auslaugung und wohl auch wegen inneren Bewegungen der Bahn Unterhaltungsschwierigkeiten bereitet, wurde ich zu Rate gezogen. Ich konstatierte intensivste Fältelung und Zerknitterung des Salzkörpers, wie in den Salzstöcken des österreichischen Salzkammergutes.

Die flächenhaft grössten Einzeldiapire von Laristan sind der Kuh-i-Abad mit 20 km und der Kuh-i-Namak²⁾ mit ca. 15 km Durchmesser.

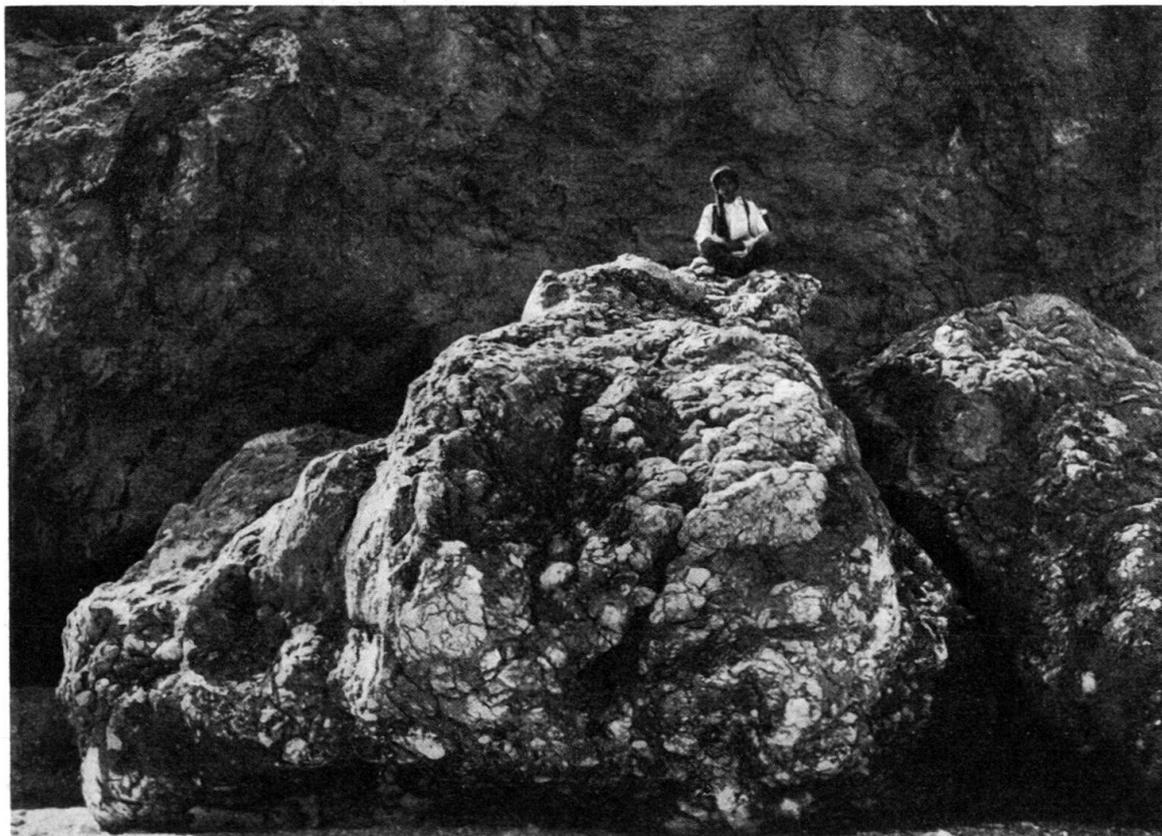


Fig. 6. Detail im Diapir von Khush Kuh, 60 km NE von Bändär Abbas, westlicher Teil des Khush Kuh, zeigt das bunte konglomeratartige gipshaltige «Haselgebirge».

DIAPIRINSELN IM PERSISCHEN GOLF

Während die Diapire des Festlandes im Zusammenhang mit der Faltung stehen, lässt sich ein solcher für die Inseln im Golf von Hormuz und Umgebung nicht erkennen. Auch hier fehlt eine lineare Anordnung, wie man sie erwarten müsste, wenn sie an Verwerfungen gebunden wären.

Nach A. GANSSER (1956) sind nicht nur die grossen Inseln in der Strasse von Hormuz, sondern auch die meisten der zahlreichen kleinen Inseln im Persischen Golf aus Salzstöcken hervorgegangen. «Gerade die Tatsache, dass sich die Salz-

²⁾ Kuh = Berg, Namak = Salz

dome über der Oberfläche erhalten, spricht für eine rezente, andauernde Bewegung». Einen analogen Fall bieten die lebenden Diapire der südöstlichen Molukken (ARN. HEIM 1940).

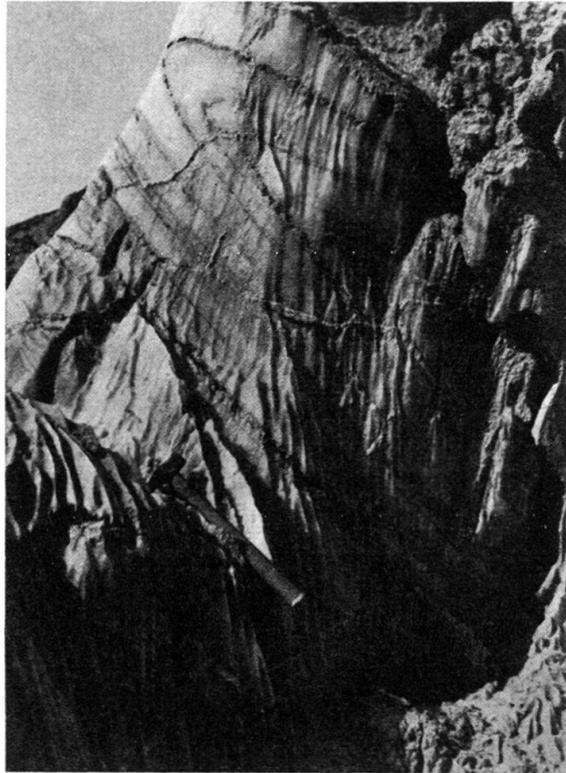


Fig. 7. Faltung im kambrischen Salzfels des Diapirs von Gätshin, 35 km WSW Bändär Abbas.
Fot. A. HEIM 1951

Die 100 km lange küstennahe Qishm-Insel gehört tektonisch noch zu den Zagrosketten des Festlandes. Sie besteht in der Hauptsache aus gefalteten kreidigen Foraminiferenmergeln des Miozän mit Sandsteinbänken und Gipslagen im unteren Teil. Eine längs der Insel streichende aufrechte Antiklinale ist an ihrem Südwestende von einem gewaltigen Diapir durchbrochen. Er bildet einen vertikal stehenden Zylinder von 5 km Durchmesser mit senkrecht aufgestülptem Miozänkragen. Das Salz wird auf der Südseite in Form von glasklarem Fels abgesprengt und als Kochsalz verschifft (Tafel II oben).

Die isoliert dastehenden Inseln Hormuz und Larak (Fig. 8) liegen gegenüber dem Hafen Bandar Abbas und sind von dort aus leicht mit Segelbooten zu erreichen. Weiter südöstlich folgt die Diapirinsel Henjam.

Die interessanteste und mannigfaltigste Insel ist Hormuz mit dem alten portugiesischen Fort und Hafen gleichen Namens. Sie hat einen Durchmesser von ca. 8 km und ist mit einem zwar stellenweise wegerodierten Kragen mio-pliozäner Schichten eingefasst. Auf der SW-Seite bildet dieser steil aufgerichtete Kragen eine Zone von mehreren hundert Metern Breite. Die Jugendlichkeit der Erhebung zeigt sich hier deutlich in Form einer gehobenen Strandterrasse (Fig. 9).

Schon aus der Ferne fallen dem Besucher der Insel weisse Felsen auf, die man zunächst als Salz oder Gips deuten möchte. Sie bestehen aber aus mehr oder weniger kaolinisiertem Quarzporphyr oder Liparit. Diese aus der Tiefe heraufgepressten Felsmassen erreichen viele hundert Meter Ausdehnung. Der auffallendste Fels ist der Ghola-i-Rostam (der Helm des sagenhaften Nationalhelden der Perser). Er bildet einen scharfen Grat von etwa 100 m Höhe, der gegen W abbricht und von dort gesehen einen kühnen Spitzbogen bildet. Seitlich klebt daran in stratigraphischem vertikalem Kontakt eine Schichtfolge von weiss-violetter Tuff mit fremdartigen eisenschüssigen kieselig-kalkigen Platten, die offenbar der Hormuz-Serie angehören. Ist dem so, dann ist auch das saure Eruptivgestein von kambrischem Alter und trotz seiner gewaltigen Dimensionen vom empordringenden Salzdiapir passiv mitgeschleppt (Fig. 10 und 17).

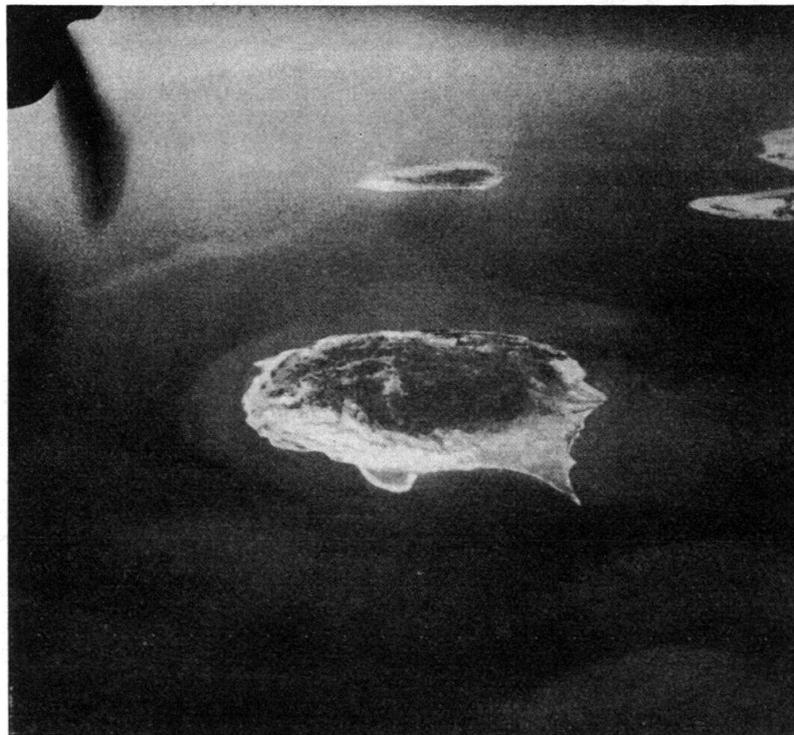


Fig. 8. Die Diapirinseln Hormuz (vorn) und Larak in der Strasse von Hormuz, Golf von Persien, Flugbild, Blick nach SSW. Auf der spitzen Halbinsel rechts liegt das alte portugiesische Fort Hormuz. Die Untiefen der Meeresbucht treten deutlich hervor.

Ausser den genannten sauren Eruptiva sind auch dunkle grünliche Diabase vorhanden, ferner Gips. Den SE-Rand der Insel bildet ein bis 50 m mächtiger Fels von reinem Hämatiterz. An seine Seite lehnt sich ein bedeutendes Vorkommen von blutrotem, weichem Eisenocker, der mit Hacken und Schaufeln in grossem Stil an der Oberfläche abgebaut und täglich mit Segelbooten zum Hafen von Hormuz transportiert wird. Vom dortigen Depot aus wird der Ocker auf Dampfschiffen in ferne Länder gebracht, wo er besonders als Farbstoff Verwendung findet. Eisenerz tritt aber auch häufig auf in Form kleiner loser Hämatitkristalle und «Eisenrosen», die, wie A. GANSSER bemerkt, für die Hormuz Serie charakteristisch sind wie ein Leitfossil.

Vergessen wir nicht, auch zerstreute Fragmente von Sandstein, Dolomit und Tonschiefer zu erwähnen. Auf weite Strecken dehnt sich im Innern der Insel über alles hinweg eine löcherig, rostige bis dunkelbraune Verwitterungskruste, so dass das Salz nur an wenigen Stellen zutage tritt. Das Ganze bildet ein farbenprächtiges Mosaik ohne gleichen.

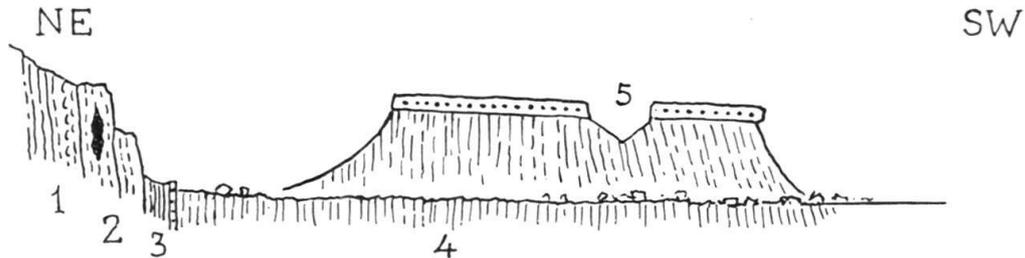


Fig. 9. Detail vom SW-Rand der Diapirinsel Hormuz

- 1 = roter Mergelsandstein mit Muscheln
- 2 = feinsandiger Mergel mit Kleinforaminiferen und einer Linse 1×5 m von Hämatit
- 3 = grünliche Mergel mit sandiger Bank voller Rotaliden
- 4 = einige hundert Meter von kreidigem Foraminiferenmergel
- 5 = subrecentes Strandkonglomerat, gehoben. 1-4 = Miozän.



Fig. 10. Inneres, buntes Durcheinander im zentralen Teil der Diapirinsel Hormuz mit weissen Liparitfelsen in der Gips-Salzmasse und dunkelbraunem Dach aus eisenschüssiger Verwitterungskruste Fot. A. HEIM 1951.

Ähnliche Verhältnisse fanden wir auf der Insel Larak von 10 km Durchmesser. Dunkelgrünliche basische Eruptiva treten dort als Felsköpfe hervor. Die Insel

Henjam bildet hingegen einen flachen Dom aus mio-pliozänen roten und gelblichen Tonen, unter welchen der Salzkörper nur in einer Doline zu finden ist. Schräg gehobene Korallenriffe bezeugen die junge Hebung, die anscheinend noch nicht abgeschlossen ist.

Hier mag noch ein isolierter Diapir genannt werden, den ich auf einem Flug von Zahedan nach der Omanküste in iranisch Balutschistan entdeckte, und zwar auf der SW-Seite des erloschenen 3500 m hohen Vulkans Bazman. Dieser Diapir tritt hervor als weissliches Feld inmitten von buntem exotischem Blockfisch. Über das Alter dieses Vorkommens ist noch nichts bekannt.

Zentral-Iran

Zum Unterschied der aus kambrischem Salz gebildeten Diapire am Persischen Golf auf der Südseite des Zagrosgebirges stammen die zahlreichen neu gefundenen Salzstöcke in der zentralen Wüste von Iran aus dem Tertiär, besonders dem Miozän. Sie sind aber ebenso erst im Pliozän durchgebrochen.

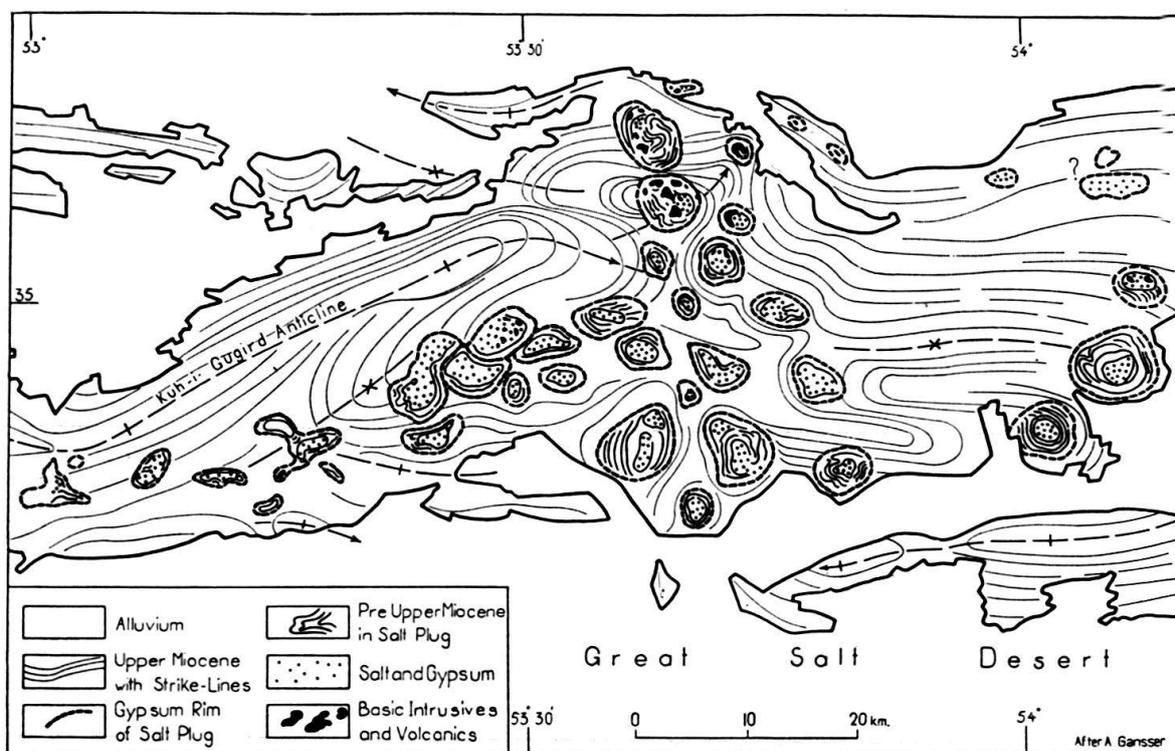


Fig. 11. Die tertiären Salzdiapire von Semnan 200 km ESE von Teheran in der zentralen Wüste von Iran nach A. GANSSER 1956.

Schon lange bekannt ist einzig der Kuh-i-Namak bei Qum, 120 km südlich Teheran. Er hat den steil axial westfallenden Scheitel der grossen produktiven Qum-Antiklinale durchbrochen und bildet einen ovalen Berg von 3 mal 4 km Durchmesser und 300 m Höhe über der Ebene (H. HUBER IN GANSSER 1957). Das Salz wird von glasklaren Felsen abgesprengt und geht ohne Raffination in den Handel. Dieser Diapir hat keine direkte Beziehung zu dem jüngsten gewaltigen Petroleumausbruch im 15 km weiter östlichen, axial höheren Gebiet der Qum-Antiklinale, wo der Scheitel der Upper Redbeds (Miozän) geschlossen ist.

Neugefunden haben wir auf einem Flug eine Gruppe von etwa 40 Diapiren mit $\frac{1}{2}$ bis 8 km Durchmesser im nördlichen Randgebiet der zentralen Wüste bei Semnan östlich Teheran. Sie sind von einem Mantel von Gips umgeben und teilweise über den Kragen der Upper Redbeds gestülpt. Nach A. GANSSER (1955) ist ihr Inhalt nicht reines Salz, sondern (in einem genau untersuchten Fall) ein Gemenge von mitgeschlepptem miozänem Sandstein mit Mergel und Ölschiefer, die zusammen samt dem Salz spezifisch kaum leichter sind, als die Miozänschichten der Umgebung. Es kann sich also nicht um rein statisch bedingten Diapirismus handeln, und dies erst recht nicht bei jenen Stöcken, in denen basische Intrusiva mitgeschleppt wurden (Fig. 11).

Man könnte daran denken, dass sich ein Diapirfeld mit so zahlreichen Salzstöcken bilden würde unter einem sich kreuzenden Horizontalschub, wie etwa bei Wellen. Dem widerspricht aber die völlig ungeordnete Gruppierung, die sich auch nicht an die Richtung der Falten anschliesst. Noch manches Rätsel des Diapirismus harret seiner Lösung.

Einzelne Diapire mit verworrener Umrahmung haben die nördlichen Antiklinalketten der zentralen Wüste südöstlich Teheran durchbrochen (Kuh-i-Gugird; Kuh-i-Gätschab).

Wichtiger ist 80 km südöstlich Teheran eine förmliche *diapirische Verkettung* der südlichsten Falten des Elbursgebirges durch enorme Gipsmassen, die auf 30 km fjordartig die Faltenzüge quer verbinden. Dort möchte man Intrusionen auf Spalten vermuten. H. HUBER hat diese Gegend detailliert kartographisch aufgenommen.

Eine zusammenhängende Gruppe von etwa 10 Diapiren hat A. GANSSER (1955) auch im südlichen Teil der grossen Wüste, 100 km nördlich Yest und 70 km nordöstlich von Ardakan festgestellt. Sie ist vermutlich von gleicher Entstehung wie diejenige von Semnan (Fig. 1).

Rückblickend können in Iran folgende Gruppen von Diapiren unterschieden werden:

1. Diapire aus dem Kambrium und zwar
 - a) Diapire in den Zagros-Randfalten
 - b) Inseldiapire
2. Diapire aus dem Tertiär in den Randfalten der zentralen Wüste;
3. Diapir im exotischen Flyschgebiet jenseits der Oman-Faciesgrenze von noch unbekannter Herkunft.

Atlasgebirge, Nordafrika

Von der Sahara her kommend stösst man an der Strasse 28 km nördlich Djelfa unvermittelt auf den öden, sanftwelligen «Haute Plaines», auf einen isolierten kahlen, runden Bergstock von 50–80 m Höhe aus verwaschenen, grünlichem Ton mit Brocken von Sandstein und Gipskristallen. In der Mitte vertieft er sich zu einem kraterartigen Loch mit glitzernden Salzkrusten und einem darin eingeschlossenen massiven Steinsalzfels, der abgebaut wird (Fig. 12).

Wohl die verwickeltste Tektonik der Erde in bezug auf den intrigierenden Diapirismus bieten die nördlicheren Sahara-Ketten, insbesondere der Tell-Atlas³⁾.

³⁾ Vergl. die Monographies Régionales, Congrès Géol. Intern. Alger 1952–1953, No. 9 von J. GUILLEMINOD; Nr. 14 von M. J. FLANDRIN und Nr. 20 von La SN REPAL, A. DE SPENGLER.



Fig. 12. Innenstruktur des Salz-Diapirs 28 km nördlich Djelfa in den Hautes Plaines (Sahara Atlas), Algerien. Fot. A. HEIM, 5. III. 1934.

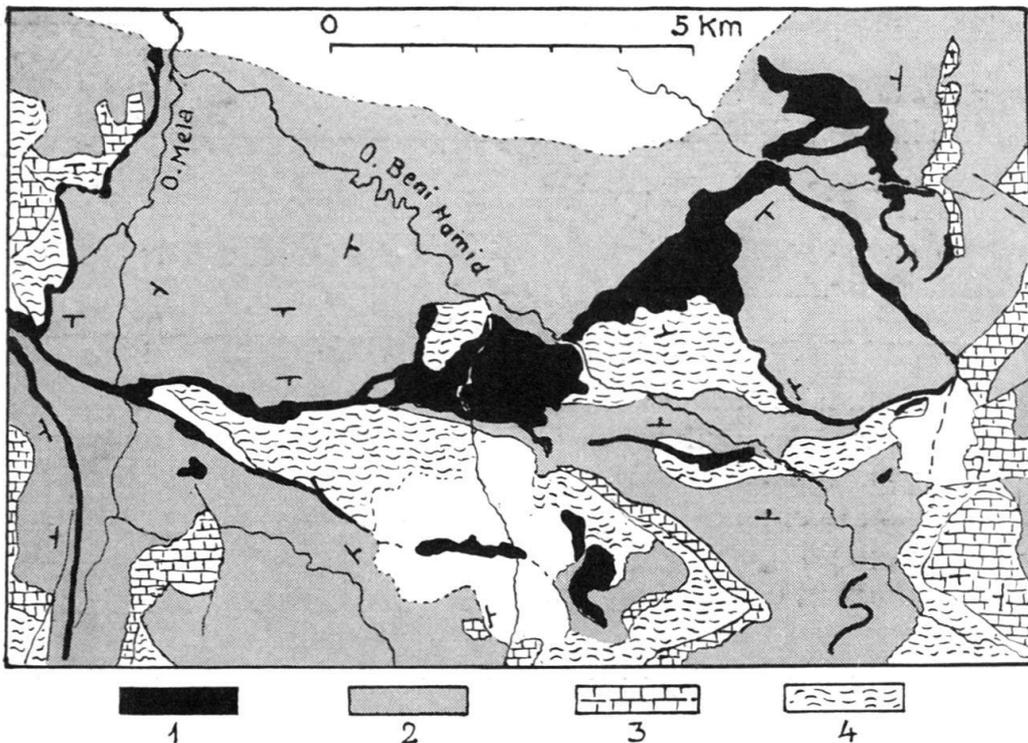


Fig. 13. Ausschnitt aus der Karte von A. de SPENGLER, Régions Sud-Telliennes et Atlas Saharien.

Pl. II, in SN Repal, Monogr. Rég. Nr. 20, Congrès Géol. Intern. Alger 1952.

1 = (schwarz) Diapirische Trias

3 = Yprésien bis Lutetien inf.

2 = Senon bis Montien

4 = Lutetien

Was auf den Karten der französischen Geologen als Trias bezeichnet wird, ist gleichbedeutend wie die Ausdehnung der Salz-Gips-Durchbrüche. Die Trias-Evaporite durchstossen nicht nur die Falten der Kreideformationen, sondern sie treten auch kreuz und quer auf Verwerfungen auf nach Art von Eruptivgesteinen, ja, sie bilden die gleitende Unterlage von beträchtlichen, nordgerichteten Schubdecken. Ein solcher Fall bietet das Petroleumfeld von Qued Gueterini nördlich von Sidi Aissa, wo die Bohrungen durch die Überschiebung hindurch auf produktive Ölhorizonte gestossen sind. BRUDERER und LEVY haben in Bohrungen bis 2600 m Tiefe eine Schubdecke an der Basis der Kreidebildungen von 10–20 km Vorstoss ins tertiäre Vorland festgestellt, wobei die Salzformation als Gleitmittel auftritt. Figur 13 ist ein Beispiel der kompliziert verzweigten Durchbruchformen der diapirischen Trias. Sie erinnert an die Diapir-Tektonik am Südrand der Zagrosketten in Iran, wo die jungen Falten ebenso von tertiären Evaporiten kreuz und quer durchbrochen sind (Aufnahmen von H. HUBER in A. GANSSER 1955).

Rumänien

Der Aussenrand des östlichen Karpathenkniees mit seinen Petrolfeldern ist das klassische Diapirland. Denn dort, ähnlich wie in Norddeutschland und in Texas-Louisiana haben sich die produktiven Erdölansammlungen im aufgestülpten Rand der Salzdiapire konzentriert. Durch die zahlreichen Bohrungen wurde in Rumänien zum erstenmal die Tiefenstruktur der Salzpflocke festgestellt.

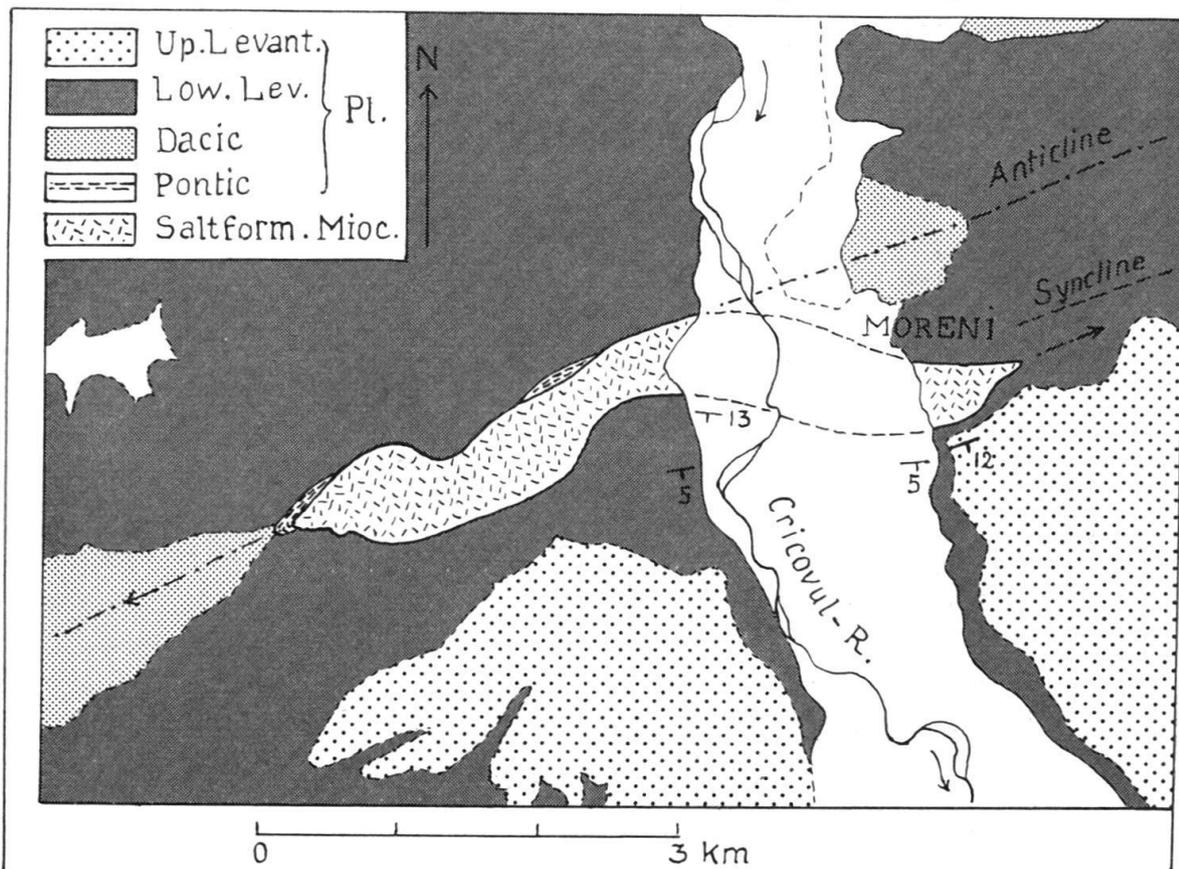


Fig. 14. Kartenskizze des linsenförmigen Salzdiapirs von Moreni, Walachei, Südromänien, nach Aufn. 1926. Die längliche Form des Salzkörpers demonstriert seinen Zusammenhang mit der plio-pleistozänen Faltung.

Wie in Iran, aber im Gegensatz zur Gulf Coast, sind die Diapire an die Zonen junger und jüngster Faltung gebunden. Das gesamte, viergeteilte Pliozän Rumäniens ist in Mitleidenschaft gezogen, und der Auftrieb dauert stellenweise bis ins Pleistozän und in die Gegenwart. Dass die Hebung noch heute fort dauert, fand ich am deutlichsten dokumentiert an einem kleinen Salzstock im Gebirgstheil mit regenreichem Klima, der etwa 20 m hoch mit glatt geleckten Wänden hervortrat. Dies ist nur denkbar bei fort dauernder Hebung, die mindestens das Abschmelzen kompensiert.

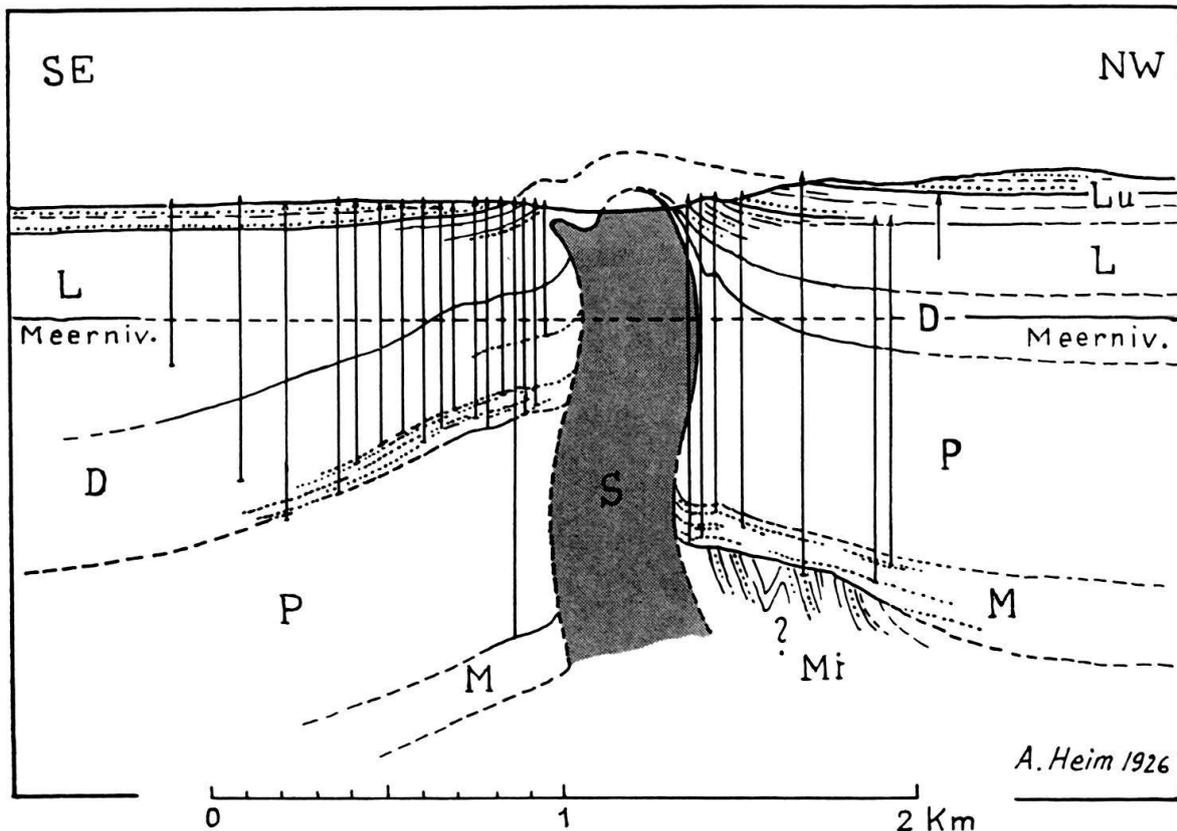


Fig. 15. Querprofil durch den Salz-Diapir von Moreni in Südrumänien.

- Lu = Oberes Levantin, konglomeratisch
- L = Unterer Levantin
- D = Daz, vorwiegend sandig mit sekundären Ölsanden
- P = Pont, vorwiegend schiefrig
- M = Mäot, bunte Mergel mit primären (?) Ölsanden, diskordant über
- Mi = miozäne Salzformation mit primären Ölsanden
- S = Salzkörper.

Im Jahr 1926 hatte ich Gelegenheit, die Diapire der rumänischen Erdölfelder zu studieren. Im Gebiet der Umgebungen von Ploesti ist das Pliozän schön gegliedert und kann auch in Bohrprofilen nach Facies und Fossilgehalt relativ leicht erkannt werden. Im Gebiet Ploesti-Moreni folgen von oben:

- 1250 m Levantin, terrestrisch
- 550 m Daz, marin, sandig
- 800 m Pont, marin, tonig
- 200 m Mäot, mit primären Ölsanden.

Diese Schichtfolge von 2500 bis 3000 m Mächtigkeit liegt mit Diskordanz auf dem salzführenden Miozän, welchem die Diapire entstammen.

Nicht bloss durch Schweredifferenz, sondern auch noch durch faltenbildende Stauung, die bis ins Pleistozän fort dauerte, sind die Diapire emporgehoben worden.

Eines der schönsten Beispiele bietet das bedeutende Erdölfeld von Moreni. Infolge des regenreichen Klimas bildet der langgestreckte Stock nicht eine Terrain-Erhöhung, sondern eine leichte Depression, in der das Salz nicht offen zutage tritt.

Wie die Figur 14 und 15 darstellen, ergaben die Bohrungen verschiedene Mächtigkeiten auf beiden Seiten des Salzauftriebes:

Das marine Daz ist auf der Südseite 300–350 m mächtig, auf der Nordseite aber nur 150–200 m. Dazu scheint auch die Fazies nicht ganz gleichartig zu sein. Schon MRAZEC und KREJCI-GRAF haben daraus geschlossen, dass der Salzauftrieb im Daz oder früher begonnen hat.

Norddeutschland

Auch Norddeutschland ist ein klassisches Gebiet der Salzstöcke. Wie in Rumänien sind die meisten Erdölfelder an den aufgestülpten Rand der Salzdiapire gebunden und durch Bohrungen bis in grosse Tiefen festgestellt. Dazu kommen noch systematisch und musterhaft durchgeführte geophysikalische Untersuchungen (gravimetrische, magnetische und seismische).

Obwohl die meisten Salzstöcke tief unter horizontaler Bedeckung ungefalteter Schichten von Oberkreide, Tertiär und Diluvium verborgen liegen, ist die Tiefenstruktur in manchen Fällen schon sehr genau festgestellt. Sie hat ermöglicht, nicht nur die letzten Phasen des Auftriebs, sondern in einigen Fällen auch den Beginn und den zeitlichen Verlauf desselben festzustellen.

Als Kompensation zum Salzauftrieb und Folge der umgebenden Entsalzung entsteht um den Diapir herum an der Oberfläche eine ringförmige Einsenkung (NETTLETON 1934).

An der Jahresversammlung der Deutschen Geologischen Gesellschaft in Hannover vom 8. Oktober 1956 wurde viel über die Entstehung der Diapire diskutiert. Nach den Befunden der deutschen Geologen bildet sich zunächst an einer schwachen Stelle im Deckgebirge ein «Salzkissen». Dorthin beginnt das Salz von ringsumher zuzufliessen, so dass die weite Umgebung völlig entsalzt werden kann. Bei genügender Konzentration beginnt der Auftrieb und führt zum Durchbruch der hangenden Schichten, die dadurch an ihren Rändern geschleppt und ausgezogen werden. Diese Fliessfähigkeit soll schon in einer Tiefe von 500 m beginnen. Die meisten Diapire der Erde stammen aber aus viel grösserer Überlastung, aus Tiefen von 2000 bis 10000 m.

Im Falle von Wiesenhausen hat sich ähnlich wie in Moreni auch eine Verschiedenheit der Mantelschichten beiderseits des Salzstockes ergeben, wie in Figur 16 nach A. BENTZ dargestellt ist. Dabei muss unterschieden werden, inwiefern die Mantelschichten durch den gewaltsamen Diapirauftrieb geschleppt und gestreckt wurden. In den oberen 1500 m liegen aber nicht nur verschiedene Mächtigkeiten vor, sondern verschiedene Formationen in verschiedenen Höhen, wie es die Figur 16 darstellt. Die Ummantelung des Salzes durch Anhydrit-Gips erinnert an diejenige der Diapire von Semnan in Iran.

In seinem wertvollen Beitrag zur Strukturgeschichte der Salzstöcke Deutschlands ist A. ROLL (1956) für den Salzstock von Wesendorf zum folgenden Ergebnis gelangt:

1. Geburt des Diapirs im Anschluss an eine Trogbildung des mittleren Keupers, bei Vorliegen einer Mächtigkeit des postsalinaren Deckengebirges, die zwischen 2200 und 2500 m liegen mag.
2. Nahezu kontinuierliches Aufsteigen gegenüber der Umgebung, einwandfrei nachweisbar vom Rät bis zum Cenoman und fortgesetzt wahrscheinlich während der ganzen Oberkreidezeit.

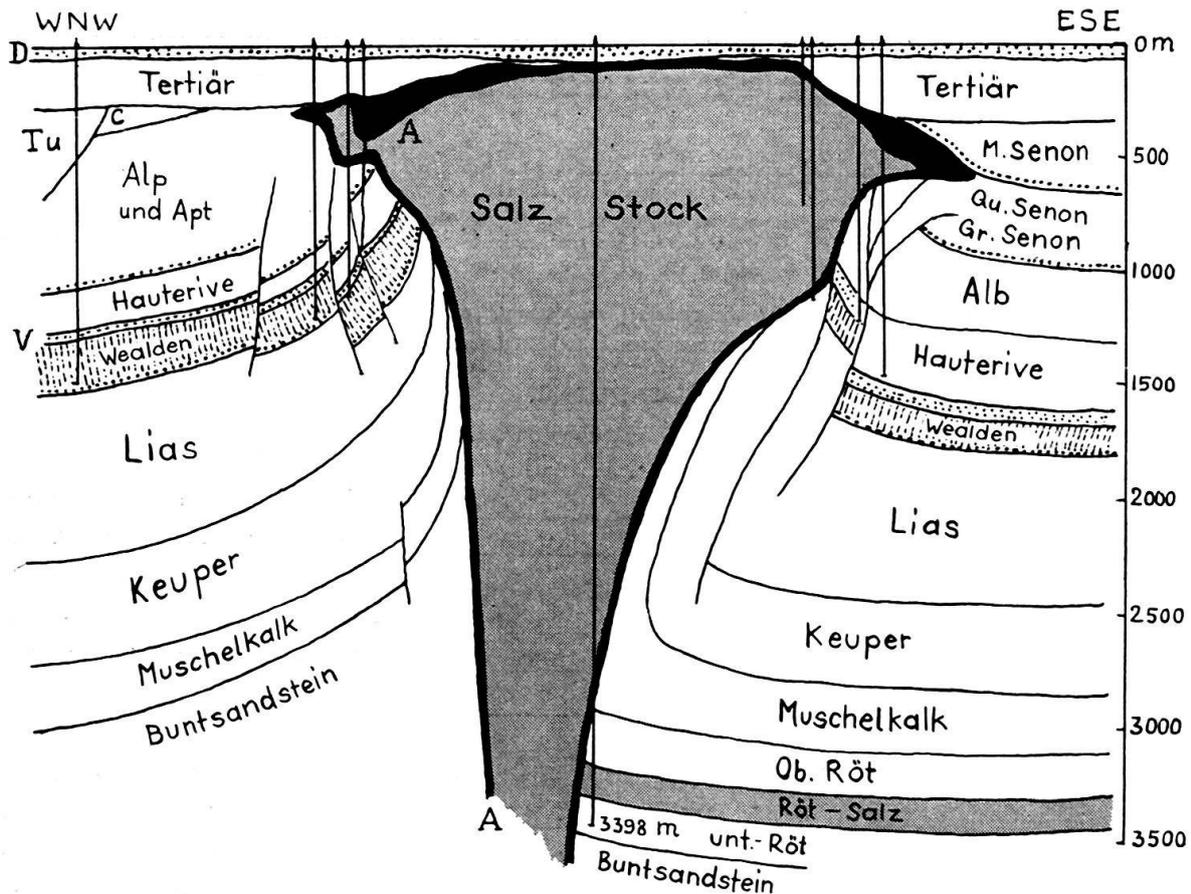


Fig. 16. Schnitt durch den Salzstock von Wiesenhausen-Eicklingen in Norddeutschland, nach A. BENTZ 1956.

A = Anhydrit-Gips-Mantel, schwarz; V = Valendis-Stufe; Tu = Turon; C = Cenoman; D = Diluvium.

Auch die Einzelbewegungen innerhalb der langen Zeitspanne der Entwicklung konnten ermittelt werden. Dabei ergab sich, dass «Form wie Geschichte von Salzstock zu Salzstock variieren können». Auch hier zeigt sich also wie im südwestlichen Iran die Individualität der Diapire.

H. ILLIES (1955) hat nachgewiesen, dass zahlreiche deutsche Salzstöcke sich seit der letzten Überdeckung mit eiszeitlichen Absätzen nachträglich und bis in die Gegenwart bewegt haben.

Inwiefern der Diapirismus in Norddeutschland nur durch die Schweredifferenz bedingt ist, oder dazu noch von der saxonischen Bruchfaltung beeinflusst wurde,

darüber sind die deutschen Geologen geteilter Meinung. Ich schliesse mich mit H. STILLE und A. BENTZ der Ansicht an, dass die Bruchfaltung in manchen Fällen mitgewirkt hat.

Bereits besteht über den norddeutschen Diapirismus im Zusammenhang mit der Erdölförderung und den geophysikalischen Untersuchungen eine umfangreiche Literatur. Das Neueste bietet die hervorragende Arbeit von TRUSHEIM (1957). Nach diesem Autor entsteht in allen Fällen atektonischer Halokinese als erstes Stadium das Salzkissen. Diesem strömt von allen Seiten Salz zu, so dass die weitere Umgebung in der Tiefe entsalzt wird. «Wo in Deutschland das Ende der Salzwanderung an Salzkissen beurteilt werden kann, ist die Erschöpfung des Salzvorrates die Hauptursache des Erliegens: Die Bewegungen gehen an Unterernährung ein. Alles in der Umgebung erreichbare Salz ist in den Kissen akkumuliert, aber die Auftriebskräfte reichen nicht zum Durchbruch aus» (TRUSHEIM 1957). In diesem Stadium des Salzkissens liegen gewiss noch viele ungeborene Diapire in der Tiefe der Erdrinde verborgen. In einer instruktiven Profilerserie gibt SANNEMANN in TRUSHEIM (1957) p. 122, ein Schema der Entwicklung eines Zechstein-Salzstockes vom Liegenden des Zechsteins über Keuper, Lias, Unterkreide und Ende Tertiär bis zum Ende des Salzauftriebes in der Gegenwart.

Nordalpen

Auch das allmächtige alpine Deckengebirge ist im Salzkammergut von Durchspiessungen nicht verschont geblieben. Zu Anfang dieses Jahrhunderts glaubte E. HAUG, das Salz einer besonderen Schubdecke – seiner «Nappe du sel» – zuschreiben zu müssen. Die Salzstöcke haben jedoch die tausend Meter mächtigen kompakten Triaskalke quer durchbrochen. Dies ist besonders eindrücklich bei Hallstadt, wo man zu dem in Ausbeutung stehenden Salzstock im Innern der Triaskalkwände aus 1300 m Höhe in Tunnels hinabsteigen muss (Museum Dr. MORTON in Hallstadt).

Die noch heute betriebenen Bergwerke, die zum Teil den Touristen zugänglich sind, bieten einen wunderbaren Einblick in die innere Struktur des Salzes mit seinen Fältelungen und Zerknüchtungen, die sich in bunten, roten, braunen, weissen und schwarzen Schichten abzeichnen. Dazu kommt noch das «Haselgebirge», eine tektonische Randbreccia.

Wie sich der Diapirismus in Beziehung zur Deckentektonik verhält, darüber sind trotz genauer Erforschung die Kontroversen unter den Geologen noch nicht abgeschlossen (MAYRHOFER 1953).

Südwestfrankreich, Spanien, Portugal

Im Bassin de l'Aquitaine sind Trias-Salzdiapire unter der Mio-Pleistozänen-Ebene durch Bohrungen nach Erdöl festgestellt worden, wie z. B. ein Salzstock unter der Stadt Dax. Weitere Möglichkeiten, solche zu finden, sind in der Ebene südlich Bordeaux vorhanden.

Auch von der gegenüberliegenden Südseite der Pyrenäen und besonders an deren westlichem Ausläufer sind Diapire bereits beschrieben, so besonders durch

LOTZE (1953) in der Umgebung von St. Sebastian. Die Grössten erreichen 10 km Durchmesser. Sie entstammen der oberen Trias und stehen in Beziehung zur Gebirgsfaltung. Sie haben die Kreideformationen durchbrochen, enthalten aber auch mitgeschleppte Blöcke des Paläozoicum, selbst von Kambrium.

Auch aus Portugal sind Diapire bekannt. Nach OERTEL (Geol. Rundschau 1956) waren sie schon im oberen Jura recht aktiv.

Texas–Louisiana

Noch ungleich bedeutender als die Diapire Rümäniens und Deutschlands sind für die Erdölförderung diejenigen der Gulf Coast in USA. Dort ruht die ganze Schichtfolge bis ins Pleistozän horizontal, so dass man wohl annehmen muss, die Diapirauftriebe seien atektonisch, das heisst, allein bedingt durch die Massendifferenz des Salzkörpers zum Nebengestein. Bis in grosse Tiefen sind die meist fossilen Diapire des Flachlandes von Texas und Louisiana durch Geophysik und Bohrungen erforscht. Die aufgestülpten Mantelschichten haben enorme Produktionen gezeitigt. Der Diapirismus ist aber nicht nur die Ursache ihrer Aufrichtung, sondern auch der Abdichtung der Erdölansammlung, der Bildung von «traps». Auch an der Gulf Coast ergab sich eine grosse Mannigfaltigkeit nach Form und Alter der einzelnen Salzstöcke. Jeder Diapir ist gewissermassen eine Persönlichkeit für sich.

Besonders klar ist der West Columbia Salzdom erforscht, der die Oligo-Miozänen Mantelschichten aufgerissen hat und bis zur heutigen Oberfläche emporgedrungen ist.

Molukken

Ähnlich wie im Persischen Golf trifft man in den südöstlichen Molukken lebende Diapirinseln. Auf Jamdena und den kleinen Kei-Inseln traf ich im ganzen etwa 30 Diapire. Es ist ein Erdbebengebiet, wie ja überhaupt Indonesien.

Auf der grossen Insel Jamdena der Tenimbar-Gruppe treten die Diapire auf in Form der Tassiks. Es sind kreisrunde vegetationslose Öffnungen im Urwald, bestehend aus eckigen Fragmenten von verschiedenartigen Sediment- und Erstarungsgesteinen, selten auch kleinen Stücken des kristallinen Grundgebirges, alle in blauem Ton eingebettet. Infolge von Auswaschung sind kaum noch Spuren von Salz erkennbar. In den Tassiks hat FR. WEBER Belemniten und Ammoniten des Jura und Halobien der Trias gefunden. Der Auftrieb stammt somit offenbar aus der dem Grundgebirge aufliegenden Trias.

Nicht nur Eozän, Oligozän und Miozän mit den charakteristischen Nummuliten, Discocyclinen, Spiroclypeus und Lepidocyclina sind durchbrochen, sondern auf Kei auch noch ein subrezenter Korallenkalk.

Die Insel Keswu (Keswoe) von 8 km² ist ein flach schildförmiger Diapirfladen. Auch die kleineren Inseln Wolas und Kabawa sind Diapire. Dazu kommen noch in den Umgebungen der Tenimbar- und Keigruppe zahlreiche kleine Inseln, die entstehen und vergehen. Die Insel Ut (Oet) auf Kei scheint ein Atoll auf einem alten Diapir zu sein. Die Analogien mit den Inseln im Persischen Golf sind verblüffend.

FORMEN, KOMBINATIONEN, INHALT, ZEITFOLGE

Der einfachste Diapir ist ein vertikaler Zylinder. Diese Form ergibt sich aus dem geringsten Widerstand der durchzubrechenden Schichten, sofern diese ruhige Lagerung aufweisen. Ist dies nicht der Fall, so können komplizierte und verzweigte Diapire entstehen, kombiniert mit Faltungen und Verwerfungen aller Art, wie im Atlas und im Elburs. Durch enges Aneinanderschliessen längs tektonischer Schwächezonen sind Verkettungen und Verzweigungen entstanden.

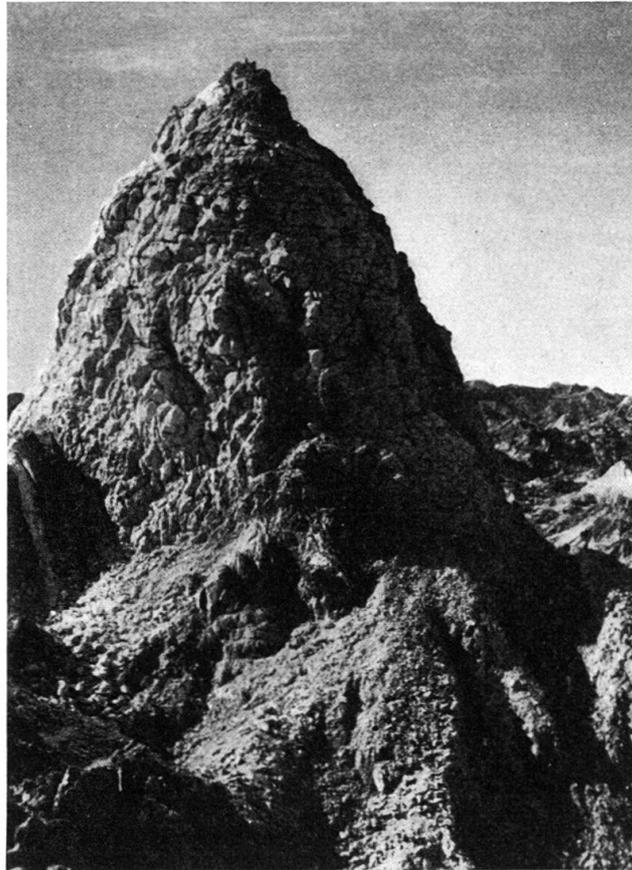


Fig. 17. Liparitfels Ghola-i-Rostam, Gipfelgrat der Diapirinsel Hormuz mit links vertikal anhaftenden kambrischen Schichten. Fot. A. HEIM 1952.

Oft öffnet sich der Kopf des Zylinders pilzförmig und überbortet den aufgestülpten Kragen, wenn der Zufluss vom Kissen fort dauert (Deutschland, Iran). Auch an der Oberfläche kommt der Salzkörper, falls er mächtig genug ist, noch nicht zur Ruhe, da sein Eigengewicht zu langsamem, gletscherartigem Fließen genügt (Laristan, Fig. 3).

Manche Diapire schliessen Eruptivgesteine in sich ein. Sie können rein passiv vom Salzkörper mitgeschleppt worden sein, wie die kolossalen Blöcke von Eruptiva auf den Inseln Hormuz (Fig. 10, 17) und Larak, wo neben sauren auch grünliche, basische Eruptivgesteine im Diapir enthalten sind.

Andere Vorkommen lassen darauf schliessen, dass ihre Eruptiveinschlüsse während oder nach dem Diapirauftstieg intrudiert wurden. Ein Beispiel dafür

scheint der von H. HUBER im Detail aufgenommene Kuh-i-Namak bei Qum in Zentral-Iran zu sein. Die Andesitfelsen liegen dort auf der Südseite intrusivartig im randlichen Gipsmergel eingebettet. A. GANSSER (1955) hat auch Augit-Dolerit in Diapiren der Gegend von Semnan beobachtet, der vermutlich im Pliozän intrudiert wurde.

Die Halokinese ist weder an ein stratigraphisches Niveau noch an bestimmte tektonische Zeiten gebunden. Die Salzformation in SW-Iran ist kambrisch, in Zentral-Iran Mio-Oligozän, in Rumänien Miozän, in Norddeutschland permotriasisch, in Nordspanien triasisch, im algerischen Atlas triasisch, in Texas-Louisiana alt- bis vortertiär.

Die Herkunft des Salzes sagt aber an sich nichts über die zeitliche Entwicklung. Bei den meisten Diapiren, die an der heutigen Oberfläche zutage treten, ist ihr letzter Auftrieb pliozän bis rezent. Jüngste Bewegungen sind in den Karpaten und von SW-Iran, von den Inseln im Persischen Golf und von den Molukken bekannt. In einzelnen Fällen sind in Norddeutschland die quartären Ablagerungen noch durchstossen worden, während die meisten Salzstöcke unter horizontalen tertiären bis senonen Schichten verdeckt, also fossil sind. Die schönsten Beispiele für sukzessive Auftriebsbewegungen seit dem Perm haben die deutschen Geologen auf Grund der zahlreichen Erdölbohrungen in Norddeutschland herausgearbeitet.

G. M. LEES hat nachgewiesen, dass die berühmten Salzstöcke von Iran aus dem Kambrium teils zur Zeit der Oberkreide, teils im Eozän, Miozän oder Pliozän empordrangen, einige davon heute noch lebendig und andere tot sind. Diese Beobachtungen zeigen, wie verschieden alt der Inhalt eines Diapirs im Vergleich zu seiner Entwicklungsgeschichte sein kann.

LAVEN UND TUFFE

Saure Laven oder durchgaste, die leichter sind als die umgebenden Gesteine und leichter als die abgekühlte, entgaste Lava, drängen nach oben auch ohne plötzliche Eruption, und können die Form von Diapiren annehmen oder einem Schlammvulkan in ihrer Fliessform täuschend ähnlich werden. Ich denke an die in Lavafeldern so häufigen aufgesprengten Quellkuppen. Sie entstehen durch den Druck der durchgasten Lava unter bereits verfestigter Kruste, die gesprengt wird (z. B. Kilauea, Kivusee). Ist die Durchgasung bedeutend, so können auch schwere, basaltische Magmen diapirartigen Auftrieb erreichen, selbst wenn deren entgaste Lava schwerer ist, als die durchbrochenen Nebengesteine. Wie bei den sedimentären Diapiren und den Schlammvulkanen werden oft Blöcke aller Art aus den Nebengesteinen mitgerissen.

Unter dem Gesichtspunkt des Diapirismus lassen sich aber auch Schlote von Tuffen anführen, die halbfest oder halbflüssig sein können (CLOOS 1927). Ausser dem Gasdruck kann die relative Leichtigkeit der porösen Tuffe am Auftrieb mitwirken, auch noch nach der Entgasung. Zwischen Tuffen, Laven und Gasen gibt es ja alle denkbaren Übergänge. Im Krater des kleinen Vulkans Otraco, dem Hafen von Goma am Kivusee in Zentralafrika sind alle Übergänge von Laven und Tuffen übereinandergeschichtet und klar aufgeschlossen.

Eine Zwischenstellung von plutonischem und vulkanischem Diapirismus nehmen solche vulkanische Kuppen ein, die im Rahmen älterer Gesteine ohne Explosionen und ohne Kraterbildung mehr oder weniger zähflüssig emporgedrungen sind. Das schönste Beispiel ist der trachytische Drachenfels im Rheinischen Siebengebirge, der von H. und E. CLOOS (1927) bis in alle Einzelheiten untersucht wurde. Wie mir HANS CLOOS selbst an Ort und Stelle demonstrierte, wurden 215 Messungen der Lage von Feldspatkristallen vorgenommen und dadurch die gesamte Kuppenform geometrisch festgestellt, wie sie durch die Fließform aus der Tiefe hervorgegangen ist. Ähnlich verhält sich die Phonolitkuppe des berühmten Hohentwiel im Hegau.

Hier ist freilich darauf hinzuweisen, dass auch in ungeheurer Ausdehnung schwere basaltische Laven ausgegossen wurden, die wenig durchgast waren und als massives Gestein von der Dichte 3 erstarrt sind. Es sei an die kretazische Trapformation Indiens erinnert, die bis zu einem Kilometer Mächtigkeit erreicht, oder an die Basalergüsse von Oregon. Sie sind nicht durch Auftrieb infolge von Schweredifferenz zu erklären, vielleicht aber durch Bruchbildung und tektonischen Horizontaldruck im Bereich der Kontinentalverschiebungen. Die Ursache der Basalergüsse würde vielleicht als tektonische Auspressung aus der Tiefe zu deuten sein. Sie sind ein Gegenstück zum Diapirismus.

MAGMEN DER TIEFE

Es ist das Verdienst von E. WEGMANN (1930) zum erstenmal auf Grund seiner Forschungen in Skandinavien und Grönland an den ältesten Gesteinen der Erdrinde die magmatischen Granitintrusionen unter dem Gesichtspunkt des Diapirismus gedeutet zu haben. Bereits hat er damals schon unterschieden zwischen Granitmassiven, die durch Granitisation emporgehoben wurden und solchen, die durch Diapirismus in hohe Krustenteile hinaufgedrungen sind. Bekanntlich hat der Granit eine Dichte von 2,6–2,7 gegen Diorit mit 2,9, Gabbro-Basalt mit 2,9–3,0 und darüber (Peridotit 3,3). Dies ergibt eine Gewichts­differenz von etwa 10%. Um etwa so viel ist also das saure Magma leichter als das basische. Dazu kommt noch die Hitze und die Durchgasung. Es ist daher einleuchtend, dass bei chemisch-magmatischer Differenzierung sich in der Tiefe granitisches Magma zusammenschliesst und wie beim Salz bestrebt ist, die Oberhand zu gewinnen. Die Auswirkungen sind tausendfach über alle Erdteile bekannt. Es sind die Granit-Batholiten. Meist erstarrten sie im Innern der Erdrinde. Dann wurden sie weiter durch tektonische (epirogenetische) Bewegungen noch höher gerückt. Sie erscheinen an der Oberfläche als massige Stöcke, teils von riesigen Dimensionen (Anden). Durch Erosion sind sie vom Sedimentmantel entblösst. Die meisten hohen Berge der Anden gehören granitischen oder granodioritischen Batholiten an, so z. B. der höchste Berg Patagoniens, San Valentin, 4020 m, und der höchste Berg der Tropenzone der Erde überhaupt, der Huascaran in Peru, 6780 m.

Auch die Entstehung der Mischgesteine magmatischer Entstehung, der Migmatite mit Granit, Porphyry und Pegmatit wird verständlich unter dem Gesichtspunkt des Diapirismus. Ähnliche Mischgesteine, jedoch ohne Tiefenmetamorphose, finden sich ja auch in den Salzdiapiren (Fig. 6).

INKOMPETENTE UND DISHARMONISCHE FALTUNG

Finden sich Salz-Gips-Formationen in tektonisch kräftig ergriffenen Schichtfolgen, so kümmern sich diese Evaporiten oft wenig oder gar nicht um die Tiefen-tektonik und bilden ihre davon unabhängigen, oft völlig disharmonischen Falten mit Verwerfungen und Überschiebungen. Für diese nach tektonischen Stockwerken geschiedenen Ausbildungen haben die britischen Geologen der vormaligen Anglo-Iranian Oil Co. die Bezeichnungen kompetent und inkompetent eingeführt. Die Unterschiede sind in verblüffender Weise durch Bohrungen in jenen klassischen Ölfeldern der südwestlichen Zagrosketten nachgewiesen.

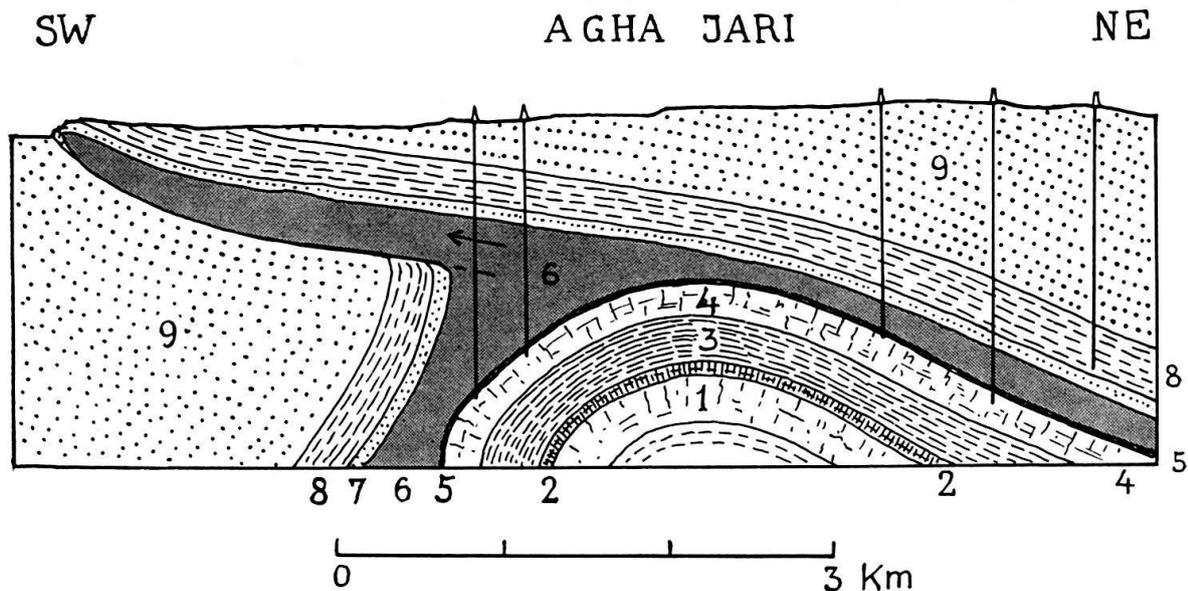


Fig. 18. Profil durch das Erdölfeld Agha Jari, SW-Iran nach den Aufnahmen der britischen Geologen.

1 = Mid. Cretaceous; 2 = Up. Cret.; 3 = Eocene-Oligocene; 4 = Asmari limest.; 5 = Cap rock; 6 = Lower Fars I-II, salt and gypsum; 7 = Lower Fars III; 8 = Middle Fars; 9 = Upper Fars and Bakhtiari, Pliocene.

Zwei Beispiele: Das bedeutendste und älteste dortige Erdölfeld Masjid-i-Suleiman (MIS), ehemals Majdan-i-Naftun genannt, bildet im produzierenden Asmarikalk (Oligo-Miozän) eine schöne aufrechte Antiklinale der Tiefe. Darüber hat sich die stellenweise bis 1000 m mächtige Salz-Gips-Formation (Low. Fars, Up. Miozene) in eine Synklinale gelegt. Hätte sich der Entdecker des dortigen Erdöls D'ARCY im Jahr 1908 von Geologen beraten lassen, so hätte er die produzierende Tiefenantiklinale verfehlt. Er hat einfach von einer Ölquelle im Gips aus an der nächsten Wasserstelle die erste Bohrung angesetzt.

Ähnliches disharmonisches Verhalten ist für die Ölfelder von Lali, Naft Kel und Naft Safid festgestellt. Es hat manche Fehlbohrung gekostet (Fig. 18)⁴.

Nordwestlich Dizful treten unter der Gipsformation die kompetenten Antiklinalen mit dem Asmarikalk offen an die Oberfläche (Tafel II unten).

⁴) Vergl. die Profile Figur 7, Seite 79 in Science of Petroleum vol. VI, Oxford Univ. Press.1953.

Oft war ich auf Reisen überrascht durch unerwartetes Auftreten schneeweisser Gipsmassen. Beispiele:

Chalus-Pass im Elbursgebirge, Iran. Sporadische Gipsmassen im eozänen Flysch.

Hochanden nördlich des Aconcagua, Argentinien. Leuchtende Gipsmassen in verschiedenen Niveaux, ganz unmotiviert, aus dem Malm über kompetenten Falten der ammonitenreichen Dogger-Liaszonen.

Zu disharmonischer Faltung führen bekanntlich nicht nur Salz-Gips-Formationen wegen ihres geringen spezifischen Gewichtes, sondern überhaupt plastische Formationen, auf denen die weniger beweglichen abgleiten. Eines der markantesten Beispiele ist die Alviergruppe der Ostschweiz zwischen Walensee und Sargans. Sogar innerhalb der Säntis-Stammdecke ist die disharmonische Faltung in voller Klarheit erkennbar: im oberen Stockwerk ist es die 600 m mächtige flyschartige Bildung der Berrias-Valangienmergel, im unteren Stockwerk die Schiefergruppe des Aalénien, welche die verschiedenen Bewegungsformen ermöglicht haben.

Es waren vor allem EMILE ARGAND und sein Nachfolger E. WEGMANN, welche auf die Unterschiede der Faltungsvorgänge auch in den tiefsten Zonen der Erdkruste hingewiesen haben. Dazu gehören die unteren penninischen Schubdecken mit ihrem altkristallinen Kern und ihrer Bündnerschieferumhüllung. ARGAND und WEGMANN unterscheiden Plis de Fond und Plis de Surface, oder Untere und Obere Stockwerke.

Um in Erdölfeldern bei Vorhandensein von Gleithorizonten die allein massgebende Tiefentektonik zu ergründen, sind die geophysikalischen, besonders seismischen Methoden unentbehrlich.

TEKTONISCHE DIAPIRE UND DIAPIRARTIGE ANTIKLINALEN

In jüngeren tertiären Formationen sind nicht selten Antiklinalen beobachtet worden, die statt eines Gewölbescheitels vertikale Schichtung aufweisen. Es ist denkbar, dass sie vermöge zahlreicher Brüche und Gleitflächen gebildet sind, ohne jemals eine Gewölbeumbiegung gebildet zu haben, weil sie nahe der Oberfläche entstanden. Ein Beispiel bietet die südliche Randantiklinale der Molasse von Vorarlberg bis zum Genfersee. Sie zeigt sich am auffallendsten im Rheintal und in den Kantonen Appenzell und St. Gallen. Im Scheitel erheben sich senkrecht die oligozänen, kalkigen Sandsteinschichten, und die Schenkel bilden einen umgekehrten Fächer.

C. WIEDENMAYER (1950) hat aus dem Apennin auf Grund von Bohrungen auf Erdöl genaue Profile von Diapirantiklinalen beschrieben und abgebildet, wobei die Tertiärschichten zerstückelt und von plastischen Kreidemergeln (Scaglia) durchbrochen sind. Ähnliche Erscheinungen sind aus Trinidad bekannt, wobei Schweredifferenzen nicht in Frage kommen. Der Diapirismus ist in solchen Fällen allein bedingt durch die verschiedene Plastizität.

Es sind aber auch Fälle bekannt, wo ein Antiklinalkern mit senkrechten Schichten aus hartem Kalkstein und Dolomit aus dem weicheren Mantel heraussticht. Solche habe ich vom Yangtse-Gebiet in der Umgebung von Tschungking im Roten Becken von Szetschuan beschrieben. Dieses Becken wurde deformiert durch

Kontraktion, denn es wird auf drei Seiten von synchronischen postkretazischen Faltenketten eingerahmt (HEIM 1931).

Die Natur arbeitet nicht nach strengen Einteilungen. Übergänge und Zwischenformen sind überall zu finden. Die auffallendsten Beispiele des Ineinandergreifens von Tektonik und Diapirismus bieten die Elburs-, die Zagros- und die Atlasketten.

DIAPIRDRUCK

Bei normalen Gas-, Erdöl- und Wasserauftrieben bietet die Druckmessung meist keine besonderen Schwierigkeiten. Anders verhalten sich grosse langsam sich bewegende Gesteinsmassen. Einen ungefähren Anhaltspunkt bietet vielleicht der gewaltige Erdölausbruch der berühmt gewordenen Bohrung Alborz Nr. 5 vom 24. August 1956 auf der Antiklinale von Qum, 120 km südlich Teheran in Iran.

Jahrelang war der Bohrerfolg verzögert worden durch die Schwierigkeiten, die in sich bewegliche 400 m mächtige Salzformation mit tonigen Zwischenlagen unter den 2260 m mächtigen tonig-sandigen Upper Redbeds (Miozän) zu durchbohren. Der Ausbruch mit über 10000 t = 80000 barrels Tagesproduktion von Leichtöl mit Paraffinbasis erfolgte in dem Augenblick, als die Salzformation durchstossen und der oligo-miozäne Asmarikalk bei 2677 m Tiefe erreicht wurde (GANSSEER 1957).

Beim Austritt aus der Verrohrung betrug der Druck bei teilweisem Schliessen der Ventile nach Schätzung der Bohringenieurere über 300 Atmosphären (A). Der Druck in der Tiefe (bottom hole pressure) musste bei der Dichte des Erdöls von 0,83 um $267 \times 0,83$ grösser sein, also über 500 A. Im Moment des Ausbruches war aber der Tiefendruck noch viel grösser, da der ganze Bohrschlamm von der Dichte 2,17 ausgeschleudert wurde. Das ergäbe eine «bottom pressure» von $300 + 267 \times 2,17 = 870$ A.

Eine lose Gesteinsmasse entsprechend der Bohrtiefe von 2670 m würde betragen: 400 m Salzformation (unrein) von der mittleren Dichte ca. 2,3 plus 2270 m von der Dichte 2,6, zusammen gleich 672 A. Die Differenz von 870 und 672 = 198 A könnte eine Vorstellung geben für den Diapirdruck, wenn nicht auch noch tektonischer Faltdruck aktiv mitwirkte.

Auf Grund der durch Seismik überprüften Tektonik hat A. GANSSEER bereits ein hypothetisches Salzkissen von 1500 bis 2000 m Dicke in seinen Profilen unter dem Asmarikalk angedeutet, nach Art der norddeutschen Salzkissen. Dazu kommt wohl noch etwas diapirischer Druck von 400 m Salzlager über dem Asmarikalk. Er schreibt dazu (1957): «Der aussergewöhnliche Druck könnte mit den möglicherweise diapirischen Salzanhäufungen im Axialgebiet der Antiklinale zusammenhängen, die man zwischen der Qumformation und dem unterliegenden Eozän annehmen muss, wenn man das seismische Bild so interpretiert, wie dies auf dem kombinierten Profil Figur 4 bezüglich der mit Fragezeichen erfüllten Zone geschehen ist.» Der auf der gleichen Antiklinale gelegene Salzdom von Qum «ist jetzt noch aktiv und behält trotz starker periodischer Erosion seine Höhe von 250 m über der Wüstenebene. Rezente Erosionsterrassen sind nördlich des Domes gehoben».

Diapirdruck ist im Grunde nichts anderes als der sich nach oben auswirkende Druck der überlagernden als locker gedachten Gesteinsmasse, also etwas ähnliches

wie der hydrostatische Druck, wobei statt Wasser die Dichte des Diapirkörpers zu setzen ist. Im Falle von Halokinese könnte man von salinostatischem Druck sprechen. Zu der schweren Masse kommt dabei noch die zu überwindende Reibung in Betracht, die den Auftrieb erschwert und verlangsamt.

Mögen die obigen Gedanken fruchtbare Kritik veranlassen!

LITERATURNACHWEIS

- BALK R. (1953): *Salt Structure of Jefferson Island Salt Dome*. Am. Ass. Petr. Geol.
- BENTZ A. (1949): *Ergebnisse der erdölgeologischen Erforschung Nordwest-Deutschlands 1932-1947*, ein Überblick. Band Erdöl und Tektonik in NW-Deutschland. Amt für Bodenforschung, Hannover 1949, p. 7-18.
- BRUDERER W. & LEVI R. G. (1954): *Considérations sur la «Nappe pré-rifaine» d'après les travaux de la Soc. Chérifienne des Pétroles*. Comptes rendus Congrès Géol. Int. Alger, Fasc. 21, p. 277-294.
- BÜTLER H. (1954a): *Die stratigraphische Gliederung in Meddeleser om Grönland 116*, 7. Taf. V.
 - (1955 b): - 155, 1. Taf. VII.
- CARLTON D. P. (1929): *West Columbia Salt Dome and Oilfield*. Am. Ass. Petr. Geol. 2, p. 451.
- CLOOS H. (1941): *Bau und Tätigkeit von Tuffschloten*. Geol. Rdsch. 32, p. 708-800.
- CLOOS H. & E. (1927): *Die Quellungskuppe des Drachenfels am Rhein, ihre Tektonik und Bildungsweise*. Z. Vulkanologie, 11.
- DE BOECK H., LEES G. M. & RICHARDSON F. D. S. (1929): *Contribution to the Stratigraphy and Tectonics of the Iranian Ranges*. Gregory, The Structure of Asia.
- ESCHER B. G. (1955/56): *Tectonique interne et externe des piliers de sel*. Ann. géol. Belgique 79, p. 65-94.
- FURRER A. & SODER P. A. (1955): *The oligo-miocene marine formation in the Qum region (Central Iran)*. Proc. 4. World Petroleum Congress, Sect. I/A/5.
- GANSSER A. (1955 a): *New Aspects of the Geology of Central Iran*. 4. World Petroleum Congress, Sect. I/A/5, p. 279-300.
 - (1956 b): Einleitung in HEBERLEIN H.: *Einsame Inseln, eine Forscherfahrt im Persischen Golf*.
 - (1957 c): *Die geologische Erforschung der Qum Gegend, Iran*. VSP 23.
- HARRISON J. V. (1930): *The Geology of some Salt Plugs in Laristan, S Persia*. Quat. J. Geol. Soc. 86.
- HEIM ARN. (1931a): *Studies on Tectonics and Petroleum in the Yangtse Region of Tshungking*. Geol. Survey of Kwangtung and Kwangsi. Spec. publ. VII.
 - (1956b): *Die Schweizer Virunga Expedition in Zentral-Afrika 1954-55*. Die Erde, Z. d. Ges. für Erdkunde.
 - (1940c): *Lebende Diapire in den südöstlichen Molukken*. Eclogae geol. Helv. 33, 2.
- ILLIES H. (1955): *Pleistozäne Salzstockbewegungen in Nord-Deutschland und ihre regionale Anordnung*. Geol. Rdsch. 43.
- ILLING V. C. (1953): *The World's Oilfields, the Eastern Hemisphere*, 6, 1, p. 79.
- KREJCI-GRAF K. (1940a): *Vulkanismus ohne Feuer*. Natur und Volk, Frankfurt a. M.
 - (1954b): *Probleme des Vulkanismus*. Die Umschau 18.
- LEES G. M. (1929a): *Salzgletscher in Persien*. Mitt. geol. Ges. Wien 20, p. 29-34.
 - (1953b): *Persia, in Illing*. The Science of Petroleum 6, p. 73.
- LEES G. M., & HARRISON J. V. (1931): *Salt Dome Symposium of the Inst. Petrol. Technology* 91.
- LEES G. M. & RICHARDSON F. D. S. (1940): *The Geology of the Oil-Field Belt of SW-Iran and Iraq*. Geol. Magazine 77, p. 227-252.
- LEHNER E. (1944): *The Persian Salt Formations*. Proc. Nat. Ac. Sci. of India 14, 6.
- LOTZE F. (1953): *Salzdiapirismus im nördlichen Spanien*. Z. Deutsch. Geol. Ges. 105, p. 814-823.
- MAYRHOFER H. (1953): *Beiträge z. Kenntnis des Alpenen Salzgebirges etc.* Z. Deutsch. geol. Ges. 105, p. 752.

- MRAZEC L. (1914/15): *Les Plis Diapirs*. C. R. Inst. Géol. de Roumanie 6.
- NETTLETON L. L. (1934): *Fluid Mechanics of Salt Domes*. Bull. Am. Assoc. Petr. Geol. 18, 9 p. 1175–1204.
- O'BRIEN C. A. E. (1953): *Salztektonik in Südpersien*. Z. Deutsch. geol. Ges. 105, p. 814–823.
- ROLL A. (1956): *Zur Strukturgeschichte der Salzstöcke von Wesendorf und Hohenhorn*. Festschr. zum 80. Geburtstag von Hans Stille.
- STILLE H. (1917): *Injektivfaltung und damit zusammenhängende Erscheinungen*. Geol. Rdsch. 8.
- TRUSHEIM F. (1957): *Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands*. Z. Deutsch. geol. Ges. 109, p. 111–158.
- WEGMANN E. (1930a): *Über Diapirismus, besonders im Grundgebirge*. C. R. Soc. géol. Finlande, Nr. 3 & Bull. de la Comm. Géol. de Finlande Nr. 92, p. 58–57.
- (1935b): *Zur Deutung der Migmatite*. Geol. Rdsch. 26, p. 305–350.
 - (1953c): *Lebende Tektonik*. Geol. Rdsch. 43.
 - (1956 d): *Stockwerktektonik und Modelle von Gesteinsdifferenziation*. Geotektonisches Symposium zu Ehren von Hans Stille. Hannover, Okt. 1956.
- WIEDENMAYER C. (1950): *Zur Geologie des Bologneser Appenins zwischen Reno- und Idice-Tal*. Eclogae geol. Helv. 43.

TAFEL I

- Oben: Einer der über tausend Pingos (Hydrodiapire) im Alluvialgebiet des Mackenzie-River in N-Canada. Flugaufnahme von FRITZ MÜLLER.
- Unten: Der Kuh-i-Anguru, Flugbild von N. Im Vordergrund die steil aufgerichteten Bänke des Nordschenkels der Antiklinale. In der Mitte, die Kulmination bildend, der durch den senon-eozänen Antiklinalkern durchgestossene Diapirstock mit dunkler Verwitterungskappe. Im Hintergrund die flache Küste des Persischen Golfes mit dem darin hervortretenden Diapirkuchen von Gätshin. Rechts das Ostende des Kuh-i-Pujal, mit Diapir, 50 km W von Bändär Abbas.



TAFEL II

Oben: Vertikalaufnahme aus 6000 m des zylindrischen Diapirs im westlichen Teil der langgestreckten Qishm-Insel, 100 km SW von Bändär Abbas. Der Diapir hat die weissen antiklinalen Kreidemergel des Miozän durchstossen und diese als Kragen senkrecht aufgestülpt. Antiklinale in Richtung der Pfeile.

Unten: Offene kompetente Antiklinale am SW-Rand der Zagrosketten bei Dizful.

5 = mächtige Salz-Gipsformation, Low. Fars, Obermiozän.

4 = Asmarikalk, Oligo-Miozän, die Randfelswand der Antiklinale bildend;

3 = Nummulitenkalk, Eozän;

2 = Senonmergel

1 = dichter, mittelkretazischer Kalk im Antiklinalkern;

Flugaufnahme A. HEIM 1952.

