

ÜBER DIE ENTSTEHUNG UND BEDEUTUNG VON ERZLAGERSTÄTTEN AUF DEM MOND

Hermann BORCHERT

Technische Universität, Clausthal

ZUSAMMENFASSUNG. — Nach kurzer Erörterung der wichtigsten Vorbedingungen wird die Prognose zu begründen versucht, dass auf dem Mond keinerlei Bodenschätze zu finden sein werden, die je wirtschaftliche Bedeutung gewinnen könnten. Dagegen sollte das ganz ausserordentliche wissenschaftliche Interesse an der noch unabsehbaren Erweiterung unserer geologischen und kosmologischen Erkenntnisse jetzt und in Zukunft im Mittelpunkt aller menschlichen Anstrengungen stehen.

In gründlicheren Untersuchungen geologischer Fachleute wie K. Krejci-Graf (1959), K. v. Bülow (1963 -1967) u. a. findet man meist nur sehr vorsichtige und zurückhaltende Äusserungen zur Wahrscheinlichkeit des Vorkommens nutzbarer Mineralanreicherungen auf dem Mond. Andererseits trifft man doch auch immer wieder auf journalistisch-sensationell aufgebauschte Vermutungen über mögliche Funde von Gold, von Uran, von Diamanten und sonstigen Bodenschätzen, welche die Menschen zur Zeit am meisten achten und begehren.

Zu diesem Problemkreis lässt sich aus allgemeinen lagerstättenkundlichen Erfahrungen doch schon einiges fundiert voraussagen. Dazu wird es jetzt gewissermassen höchste Zeit, da bald die ersten authentischen Nachrichten über unmittelbare Befunde der US - amerikanischen Raumfahrer *Armstrong*, *Aldrin* und *Collins* des Apollo 11 -Unternehmens und über die von ihnen mitgebrachten Proben vorliegen werden.

Einige Voraussetzungen allgemeiner Art, die z. T. erst in den letzten Jahren zunehmende Wahrscheinlichkeit gewonnen haben, müssen zunächst kurz erläutert werden.

1. Das Sonnensystem ist vor ca. 5 Milliarden Jahren entstanden.
2. Irdische, lunare und Solarmaterie zeigen etwa gleichartige Zusammensetzung, wenn man die Häufigkeit der Elemente je auf eine Million Silizium bezieht.
3. Die Kondensation der irdischen und lunaren Materie dürfte nach, der Verflüchtigung der Hauptmenge von Wasserstoff und Helium aus der eigentlichen Solarmaterie in den Weltraum weitgehend gleichartig verlaufen sein (vgl. hierzu A. Eucken, 1944).
4. Dabei bestehen aber sehr wesentliche Unterschiede zwischen unserer Erde (sowie den Planeten Venus und Merkur) einerseits und unserem Mond (sowie dem Planeten Mars) — mit ihren wesentlich niedrigeren Dichten — andererseits; vgl. die folgende Tabelle 1:

Tabelle-1

<i>Himmelskörper</i>	<i>Dichte</i>	<i>Masse im Vergleich zur Erde = 1</i>
Merkur	5,0	0,05
Venus	5,1	0,81
Erde	5,52	1
Mond	3,3	0,012
Mars	3,9	0,107

5. Die Erde besitzt einen Kern mit ca. 3 500 km Halbmesser, dessen äusserer Teil nach seismischen, magnetischen und sonstigen Daten hauptsächlich aus flüssigem Eisen bestehen wird, wie besonders A. Eucken (1944) mit physikalisch-chemischen Argumenten begründet hat. Jedoch dürfte dieser Erdkern doch auch nicht unwesentliche Reste von Solarmaterie enthalten (vgl. Abb. 1).
6. Nicht nur für die Erdkruste, sondern auch für den Erdmantel und auch für die Zwischenschicht ist mit kristallin-festem Zustand zu rechnen, obwohl im Erdinnern über 3 000°C herrschen dürften. Für den Erdmantel wurde der feste Zustand vom Verfasser (zusammen mit W. E. Tröger, 1950) hauptsächlich aus petrologischen, geotektonischen und vulkanisch-magmatischen Gründen gefolgert (vgl. hierzu auch H. Borchert, 1967). In neuerer Zeit hat A. Neuhaus (1965) diese Auffassung durch zahlreiche Experimente und Überlegungen gestützt. Mit wachsenden Drucken ergibt sich eine immer dichtere Packung der Teilchen in den Kristallgittern sowie eine systematische Erhöhung der Koordinationszahl, bei zugleich abnehmenden Anteilen von ionarer Bindung und zunehmender Beteiligung metallischer Bindungsarten.
7. Die Zusammensetzung des Erdmantels ist nicht peridotitisch, hauptsächlich aus $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$ bestehend und damit ähnlich den chondritischen Meteoriten — wie viele Fachgenossen heute noch gern annehmen möchten —, sondern entspricht etwa dem häufigsten irdischen Ergussgestein, nämlich Basalt. Nähere Beziehungen bestehen tatsächlich zu den achondritischen Meteoriten, welche gegenüber Peridotiten erheblich höhere Gehalte an Al_2O_3 , CaO , SiO_2 und TiO_2 haben.
8. Der Mond hat keine Atmosphäre. Seine Gravitationskraft hat mit 0,012 Erdmasseneinheiten wohl nie ausgereicht, um nennenswerte Mengen von Gasen (H , CH_4 , CO , CO_2 , N_2 , O_2 etc.) festzuhalten (vgl. G. P. Kuiper, 1949). Damit war aber auch keine Möglichkeit gegeben, Wasserdampf zu binden, der im kosmischen Stadium aus den basaltartigen Schmelzen bei deren fraktionierter Kristallisation in wesentlichen Quantitäten entbunden sein wird, dabei aber nie eine «Pneumatosphäre» im Sinne von A. Rittmann (1948) bilden konnte, wie noch näher zu erläutern sein wird. Damit konnte es auch nie «anorganisch» zu einer wesentlichen Anreicherung von Sauerstoff in der Uratmosphäre des Mondes kommen (im Gefolge der Einwirkung ultravioletter Sonnenstrahlung auf H_2O - Dampf).
9. Die aus basaltischem Magma fraktioniert auskristallisierenden Mineralien werden gegenüber den irdischen Verhältnissen wesentlich niedrigere OH- und H_2O -

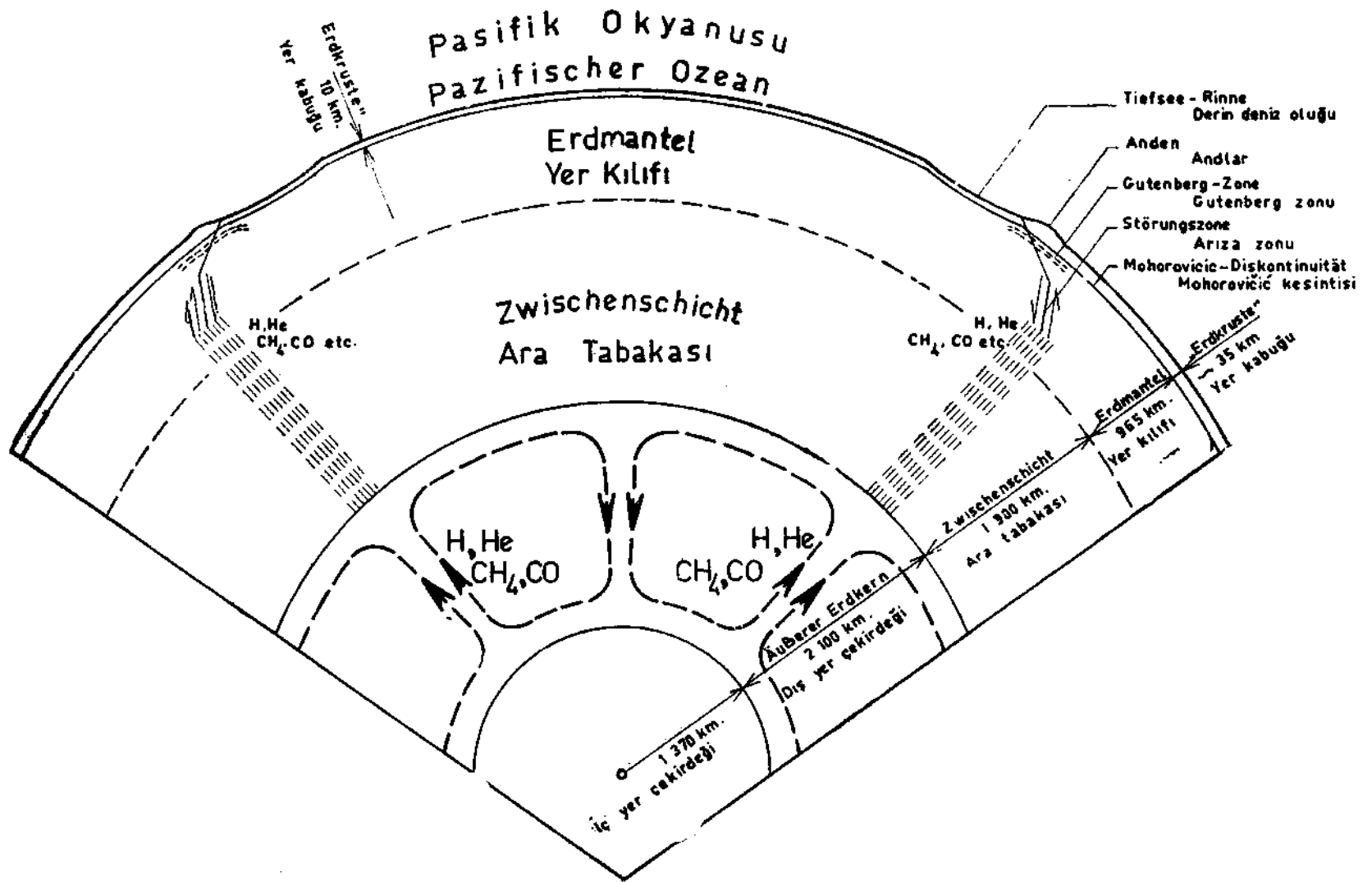
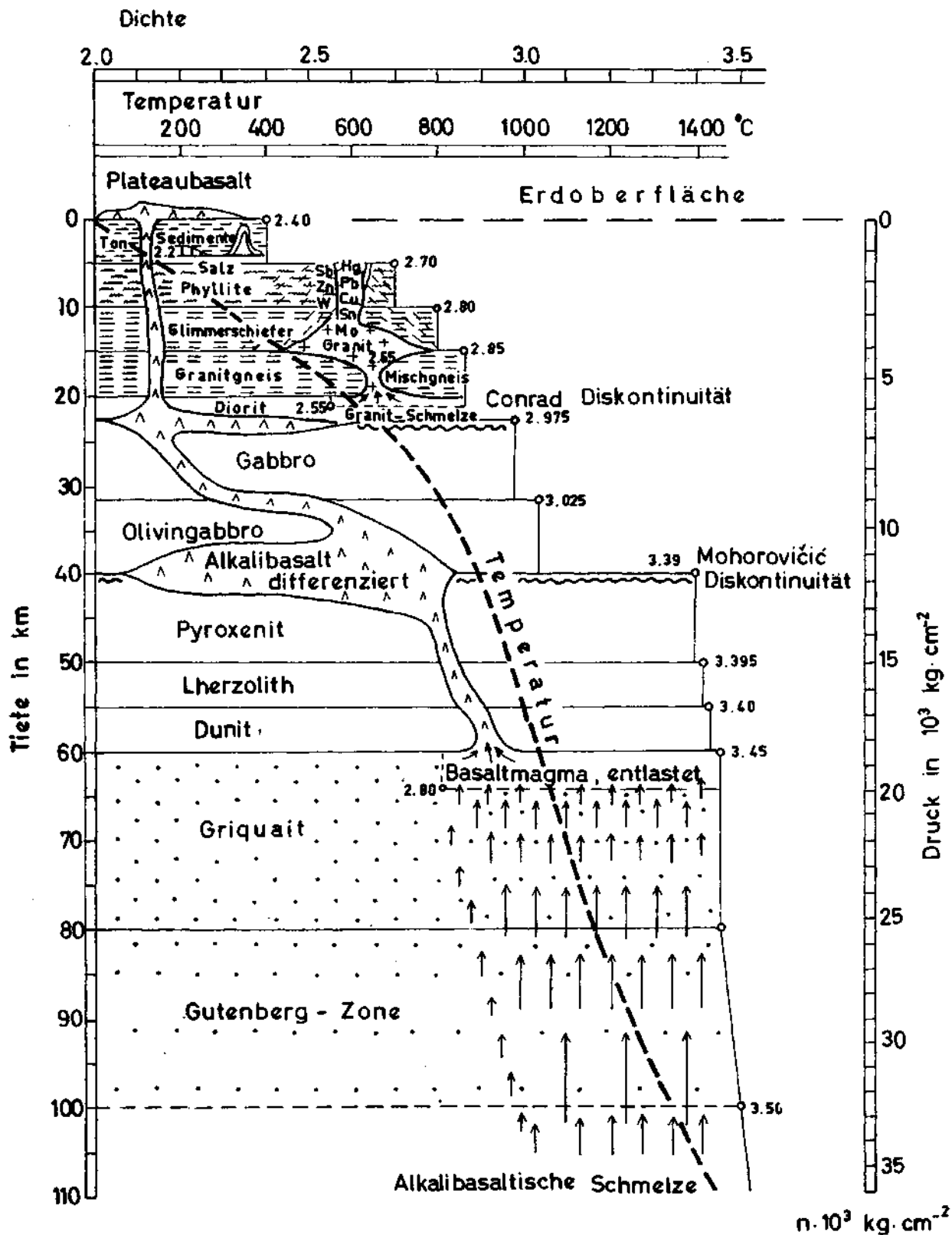


Abb. 1

Gehalte haben. Vor allem aber wird es nie zur Kondensation von Ozeanartigen Gebilden in den Vertiefungen der lunaren «Mare» gekommen sein.

10. Die Abb. 2 zeigt ein schematisiertes Profil durch den normal-kontinentalen Typ unserer Erdkrinde, wie er sich im Laufe der geologischen Geschichte entwickelt hat. Auf Varianten des «Ozeanischen Erdkrustentyps» oder sogenannten «Alter Schilde» mit wahrscheinlich über 100 km von metamorph überprägten kristallinen Schiefen kann hier nicht eingegangen werden (vgl. hierzu etwa H. Borchert und W. Böttcher, 1967; H. Borchert, 1951, 1968; H. G. F. Winkler, 1965). In der Abb. 2 entspricht der Abschnitt in 20-60 km Tiefe auch etwa dem schaligen Aufbau, wie sie primär auch die planetarischen und lunaren Himmelskörper entwickeln würden, deren äussere Silikatschmelzenhüllen basaltische Zusammensetzung haben.
11. Die Mehrzahl der geologischen Fachgenossen stimmt heute darin überein, dass die äusseren Hüllen des Mondes etwa basaltische Zusammensetzung aufweisen. Mit grosser Wahrscheinlichkeit sind die sogenannten Mare hauptsächlich mit basaltischem Schmelzmaterial gefüllt, oft «Lunabas» genannt. Die morphologischen Formen stimmen tatsächlich mit den Ergüssen von basaltischen Laven der Schildvulkane vom Hawaii-Typus so gut überein, dass an einer vulkanischen Entstehung der wichtigsten Gross- und Kleinformen der Mondoberfläche kaum noch zu zweifeln ist.
12. Gegen die lange Zeit — besonders von vielen Amerikanern und von den meisten Astronomen bevorzugte *Impakt-Theorie* für die Entstehung der meisten lunaren Grossformen, der Krater, der Ringgebirge usw. (Meteoriten-Einsturz-Theorie) spricht — neben sehr zahlreichen petrologisch-geologischen Argumenten — schon fast entscheidend die Tatsache einer nicht-statistischen Verteilung der grossen Mare, welche auf der Rückseite des Mondes fest völlig zu fehlen scheinen.

¹ Durch Diskussionen mit Herrn. Dr.-Ing. Horst Lohrmann hat sich inzwischen der Versuch einer theoretischen Begründung dafür herausgestellt, *warum* es nur auf der erdzugewandten Seite die grossen Mare gibt. Es muss nämlich als wahrscheinlich angesehen werden, dass bereits die ersten kosmischen Kondensationsprozesse *schwereres Material bevorzugt auf der erdzugewandten Seite angesammelt* haben. Dadurch müssten auch die nachfolgenden Kristallisationsprozesse einen etwas anderen Verlauf genommen haben und könnte so auch den Vulkanismus auf der erdzugewandten Seite länger und intensiver lebendig gehalten haben. Die Effekte der —mittels Unregelmässigkeiten in den Satelliten-Umlaufbahnen— festgestellten *Schwere-Überschüsse im Bereich von einigen der grossen Mare* müssten hiernach bereits in der kosmischen Bildungsphase des Systems Erde-Mond entwickelt worden sein. So könnte sich bereits in der Kondensationsphase der Mondmaterie eine etwas exzentrische Massenverteilung ergeben haben, welche schwereres Schmelzmaterial und weiterhin auch entsprechende Silikatkrystallite stärker auf der erdzugewandten Seite angesammelt hätten. Damit könnte eine wohl einleuchtendere Erklärung für die wichtige Tatsache gegeben sein, *warum* bei unserem Erdmond — und bei etlichen sonstigen Planetenmonden — der «Tagesumlauf» mit der Monatsumlaufzeit übereinstimmt. — Die übliche Erklärung für die Übereinstimmung von Rotations- und Umlaufzeit durch «Gezeitenreibung» und dergleichen würde also nicht den Kern der Sache treffen. Im übrigen liefern diese Überlegungen ein weiteres Argument für die Auffassung, dass für die wichtigsten Gross- und Kleinformen der Mondoberfläche die «vulkanistische» Theorie viel mehr Wahrscheinlichkeit für sich in Anspruch nehmen kann als die «Impakt-Theorie». — Weiter ist zu folgern, dass die bei Geowissenschaftlern vielfach noch recht beliebte «*Planetesimaltheorie*» der Planetenentstehung (Zusammenballung von kaltem Meteoriten-artigem Material und Erwärmung bis zum Schmelzen durch radioaktive und Gravitationsenergie) z. B. im Fischer-Lexikon «Astronomie» neben drei ernst zu nehmenden Theorien noch nicht einmal der Erwähnung für würdig gehalten wird und nach unserem heutigen Wissen als höchst unwahrscheinlich klassifiziert werden muss.



Im wesentlichen nach Borchert u Tröger(1950)

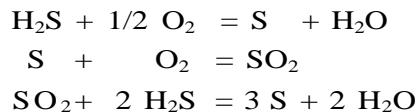
Abb. 2

13. Das Material der Ringgebirge, welche die Mare umgeben und auch sonst viele Gebirge bevorzugt aufbauen, die wegen der geringeren Schwerkraft des Mondes relativ zur Erde viel grössere Höhen aufweisen, besteht wohl aus etwas SiO₂-reicherem Gestein, oft «Lunarit» genannt. Dieser Lunarit hat auch etwas niedrigere Gehalte an Eisen, Titan und Nickel. Wahrscheinlich handelt es sich um Alkali-reicheres Restschmelzenmaterial basaltischer Magmen, wobei lockere vulkanogene Tuffe mit sehr variablen Körnungen (von Staubform bis zu Grossblöcken) wesentlich beteiligt sein dürften.
14. Die *Grossformen der Mare* stellen — oft staffelförmig abgesunken — *Einbruchbecken* dar, welche *durch Leerförderung tieferer Schmelzherde + konzentrisch eingesunken* sind. Entsprechende «Caldera» Formen finden sich in zahlreichen irdischen Vulkangebieten, wenn auch meist mit relativ kleineren Dimensionen, wie sie dem Leerlaufen lokalerer und seichter Magmenkammern in höheren Erdkrindbereichen entsprechen. Wichtig ist, dass auch die allermeisten Kleinformen der Mondoberfläche entscheidend *für die vulkanistische und gegen die Meteoriten-Impakt-Theorie* sprechen.
15. Viele Befunde machen wahrscheinlich, dass die meisten Gross- und Kleinformen des Mondes schon anlässlich der primären Abkühlung und Erstarrung der wohl mindestens etliche 100 km dicken Silikatschmelzmassen basaltischer Zusammensetzung entstanden sind. Die Grundzüge der Mondmorphologie dürften bereits vor mehr als 3 Milliarden Jahren geprägt worden sein. Vielleicht sind die wichtigsten Formen der Mondoberfläche sogar schon ca. 4,5 Milliarden Jahre alt.
16. Die fraktionierte Kristallisation der Mondmaterie wird im Bereich der obersten etwa 60 km einen ähnlichen Verlauf genommen haben wie in der Urkruste der Erde. Aber auch weiterhin ist in grösseren Tiefen und bei zunehmenden Drucken mit ganz ähnlichen Prozessen zu rechnen wie im Erdmantel und der Zwischenschicht. Über die beteiligten Hochdruck-Kristallfraktionen liefert das Werk von A. F. Williams (1930) wesentliche Anhaltspunkte (vgl. auch A. Neuhaus, 1965; H. Borchert, 1962, 1967).
17. Der wichtigste Unterschied zwischen Erde und Mond besteht darin, dass der *Mond offenbar keinen Kern aus flüssig gebliebenem Eisen* aufweist — ähnlich der Metallphase der Meteoriten. Dies wird allein schon durch die sehr verschiedenen Dichten von Erde und Mond wahrscheinlich gemacht (vgl. Tabelle 1). Es ist von entscheidender Bedeutung für den Werdegang planetarischer und lunarer Himmelskörper, ob ein solcher Eisenkern, in welchem grossräumige Konvektionsströmungen über Milliarden von Jahren andauern können, vorhanden ist oder nicht. Bei Nichtvorhandensein kann die Erstarrung der Silikate bis zum innersten Kern fortschreiten und solche Himmelskörper haben *«keine lebendige Tektonik»*; sie haben *keine «geologische» Geschichte*. Aus dieser *Geschichtslosigkeit* nach der ersten Erstarrung — abgesehen von sporadischen Meteoriteneinschlägen und wohl auch nur minimaler Zersetzung des Oberflächenmaterials als durch Weltraum- und insbesondere Sonnenstrahlung, mechanischer Beeinflussung durch extreme Temperaturwechsel etc. — folgt in Verknüpfung mit allgemeinen lagerstättenkundlichen Erwägungen, dass es im Bereich der Mondoberfläche so gut wie keine mineralischen Bodenschätze geben wird; ganz sicher

gibt es kein Uran, kein Gold und keine Diamanten und sonstige besonders begehrte Rohstoffe.

Diese Prognose soll jetzt etwas näher erläutert und begründet werden.

- I. Zunächst kann es grundsätzlich wohl nur diejenigen nutzbaren Mineralien geben, welche mit der fraktionierten Kristallisation basaltischer Magmen zu verknüpfen sind. Hierbei kommen aber speziell wieder nur solche Bodenschätze in Frage, welche nicht das Vorhandensein einer Meerwasser-«Vorlage» (vgl. Abb. 3) zur Voraussetzung haben, in welchen also Schwermetall-haltige Restlösungen basaltischer Magmen die entsprechenden Erze des Eisens (Lahn-Dill-Typ) zum Absatz gebracht haben könnten, oder Massen von \pm Cu-haltigem Schwefelkies (Typus Huelva, Lökken, Outukumpu, die Mehrzahl der japanischen Kieslagerstätten etc.), ferner auch Buntmetall-haltige Erzsedimente nach Art des Rammeisbergs, von Meggen an der Lenne etc.) oder schliesslich die seit dem Archaikum sehr weit verbreiteten Manganerze der «geosynklinalen» Schiefer-Hornstein-Split-Formation.
- II. Prinzipiell möglich sind allerdings die Mineralbildungen aus vulkanischen Exhalationen. Diese besitzen, generell betrachtet, jedoch selbst auf der Erde eine vergleichsweise geringe Bedeutung, so dass sie auf dem Schema von Abb. 3 überhaupt nicht mit zur Darstellung gebracht worden sind. Möglich sind z. B. Eisenchloride und im einzelnen zahlreiche weitere Verbindungen, die original in den letzten Restschmelzenlösungen von intrakrustal gelegenen Magmamassen anlässlich der ersten Erstarrung und fraktionierten Kristallisationsprozesse angereichert worden waren. Besonders könnten z. B. Realgar (AsS) und Auripigment (As₂S₃) in Frage kommen, kaum dagegen wesentliche Mengen von gediegen Schwefel, von dem öfter gesprochen wird. Original dürften wohl nicht unwesentliche Gehalte an H₂S in den Ur-Exhalationen des Mondes vorhanden gewesen sein, aber daraus könnten nach den folgenden Gleichungen:



nur dann Schwefelsublimat erwartet werden, wenn in der Mondatmosphäre freier Sauerstoff in nennenswerten Mengen vorhanden gewesen wäre, was nicht sehr wahrscheinlich ist. Als viel wahrscheinlicher muss gelten, dass auch H₂S wie andere Gase ganz überwiegend in den interplanetarischen Raum abdiffundiert sind.

Wenn also auch nichts Bedeutsames an irgendwie technisch-wirtschaftlich nutzbaren Mineralanreicherungen an der Mondoberfläche zu erwarten ist, so werden die *sporadischen und spärlichen Funde*, die man im Laufe der nächsten Jahre und Jahrzehnte machen wird, *doch von grösstem wissenschaftlichen Interesse sein*.

- II. An potentiell nutzbaren mineralischen und insbesondere erzmattischen Rohstoffen darf grundsätzlich alles erwartet werden, was auf Abb. 3 als «intra-krustale» Bildung angedeutet worden ist. Das beginnt mit liquid-magmatischen, als Frühkristallisationsprodukten basaltischer Magmen ausgeschiedenen Chromitanreicherungen im Verband von ultrabasischen Peridotiten und Harzburgiten,

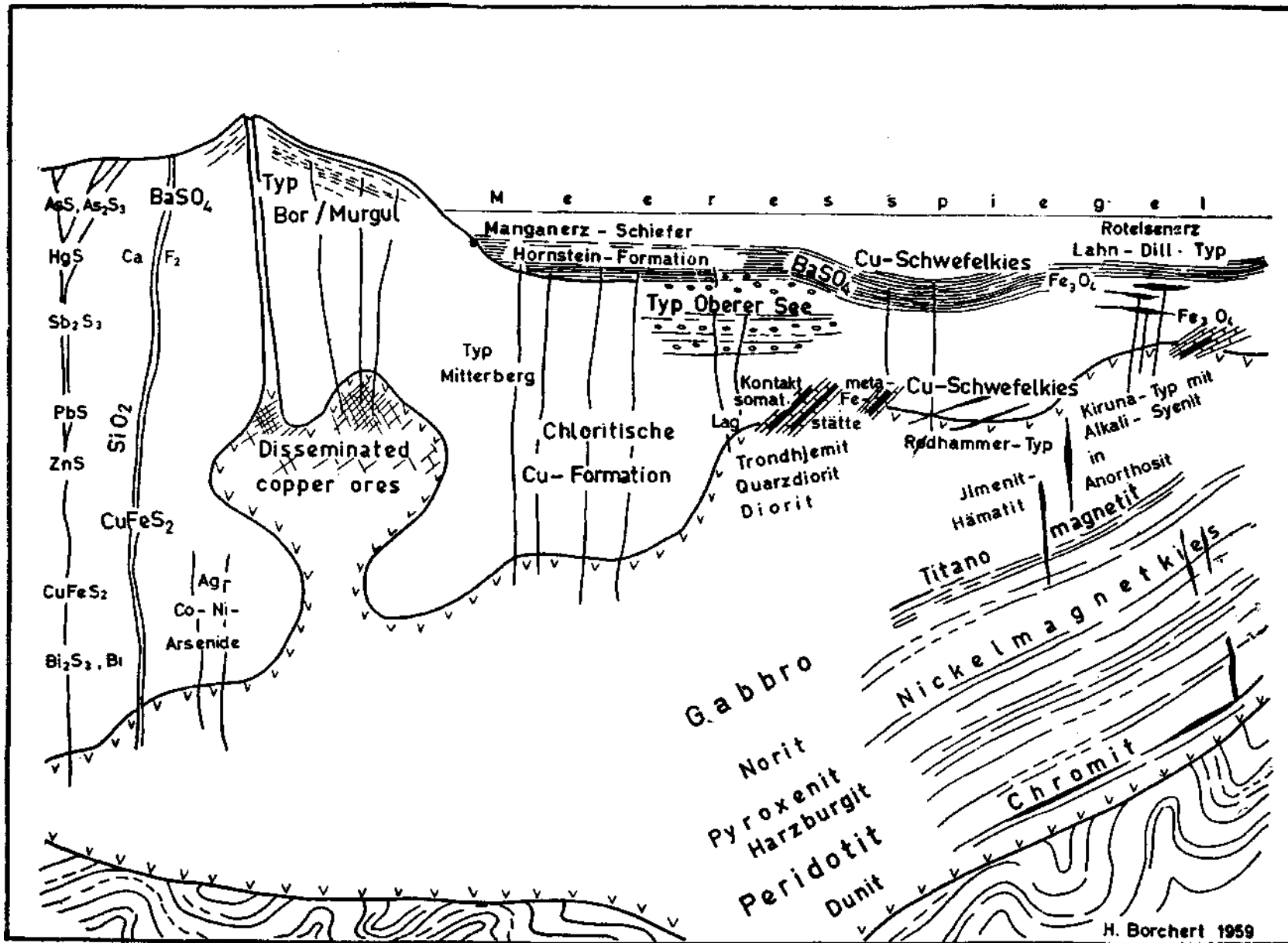


Abb. 3

also FeO , Cr_2O_3 in Gesteinen aus hauptsächlich Mg-Fe-Silikaten mit nur ca. 40% SiO_2 -Gehalt. Es wird in tieferen Bereichen der Mondkruste (Größenordnung etliche 100 m bis etwa 20-40 km unter der Oberfläche) auch Nickelhaltige Sulfidanreicherungen mit hauptsächlich Magnetkies (FeS) und Kupferkies (CuFeS_2) geben, wobei die Beteiligung auch von Platinmineralien (jedoch nur in der Größenordnung von 0,1-1 g/t Erz) nicht ganz unwahrscheinlich ist. Weiter sind Titanomagnetitausscheidungen im Verband von Pyroxeniten und Gabbrogesteinen (mit ca. 50 % SiO_2 -Gehalt) zu erwarten sowie auch Anreicherungen von Magnetit (Fe_3O_4) und dem Ca-Phosphat Apatit in schon saureren, SiO_2 - und alkalireicheren Silikatgesteinen (Typus Kiruna, Nordschweden). Alle diese Mineralbildungen gehören zur liquidmagmatischen «Frühkristallisation» von basaltischen Magmen, die *im Erstarrungsintervall zwischen etwa 1200-900°C* anzusetzen ist. Anreicherungen der eben genannten Erze dürfen tatsächlich in mondumspannenden Anreicherungs-zonen vermutet werden, die Hauptmengen aber wohl erst in 10 und mehr km Tiefe.

Aus letzten Restschmelzen tiefer gelegener Silikatschmelzmassen dürfen ferner in der Dachregion von original basaltischen Magmenherden die in Abb. 3 angedeuteten Anreicherungen von Fe_3O_4 , FeS_2 und CuFeS_2 mit Spuren auch von anderen Schwermetallverbindungen vermutet werden, möglicherweise auch gediegen Kupfer der sogenannten zeolithischen Formation vom Typ Lake Superior.

Aus der primären Ansammlung von Schwermetallen und flüchtigen Bestandteilen wie H_2O , HCl , HF , H_2S , H_3BO_3 , CO_2 etc. in den Restschmelzen gehen bei der weiteren Abkühlung und bei der Kondensation der wichtigsten Komponente H_2O die Erzlösungen hervor, welche im Temperatur- und Druckgefälle bis zur originalen Mondoberfläche hauptsächlich alle die Erze zur Ausscheidung bringen können, welche auf Abb. 3 in zonaler Folge von unten nach oben angedeutet sind. Neben SiO_2 (als freier Quarz), CaF_2 und BaSO_4 könnten hierbei auch noch Karbonate der Erdalkalimetalle wesentlich beteiligt sein. Als metallische Komponenten dürften Cu-Erze — neben zurücktretenden Mengen der sonstigen «Buntmetalle» — eine dominierende Rolle spielen.

Jedoch werden sich alle diese potentiell nutzbaren Mineralanreicherungen *wesentlich nur intrakrystal* und meist erst recht tief unter der Mondoberfläche finden. Sie werden nach aller Wahrscheinlichkeit auch in der Zukunft *nie wirtschaftlich interessant* werden können, *weil* ein Bergbau auf dem Mond mit gigantischen Schwierigkeiten — und entsprechenden Kosten — verknüpft ist. Schon allein die Herstellung von Sprengbohrlöchern ohne Wasserspülung und der Antransport von Bergbaugeräten würde sehr teuer werden.

Unmittelbar an der Mondoberfläche wird es um Größenordnungen seltener Ausbisse von Erzvorkommen geben als an unserer Erdoberfläche, wo solche im Gesamtdurchschnitt der 510 Millionen km^2 auch nicht gerade häufig sind, wo sie aber doch schon dem Menschen der Kupfer- und Bronze-Zeit den ersten Anreiz zur bergbaulichen Gewinnung der metallischen Werkstoffe gegeben haben.

- IV. Warum der Mond lagerstättenkundlich völlig andere Verhältnisse darbietet als unsere Erde, hängt einerseits mit der andersartigen Bruttozusammensetzung

(vgl. die Dichten in Tabelle 1), andererseits mit der ganz andersartigen kosmisch- «geologischen» Entwicklung zusammen. Die wichtigsten unterscheidenden Gesichtspunkte sollen kurz erläutert werden.

- A. In der irdischen Uratmosphäre, der «Pneumatosphäre» im Sinne von A. Rittmann (1948) waren die Ozeane zunächst in verdampfter Form enthalten. Am Boden gegen die erstarrende basaltische Silikatschmelze dürfte ein Druck von ca. 400 kp/cm² geherrscht haben. Unter solchen Bedingungen waren in der langsam abkühlenden Pneumatosphäre bei Temperaturen von 600-400°C zunächst sehr wesentliche Mengen von Schwermetallverbindungen und Alkalien gelöst, hauptsächlich wohl in chloridischer bzw. halogenidischer Form. Diese Erze und Salze werden dann — bei weiterer Abkühlung — in den kondensierenden Ozeanen aufgenommen worden sein. Sie konnten hier erste erreiche Sedimente bilden, während nur die eigentlichen Gase in der Ur-Atmosphäre zurückblieben. Diese irdische Ur-Erzbildung in den ersten Meeressedimenten kann auf dem Mond keine Rolle gespielt haben.
- B. Ozeane und «Atmosphäriilien» (H₂O-Wolken, CO₂, O₂ usw.) bedingten auf der Erde sehr intensive Verwitterungsprozesse der Gesteine, was zu Bodenbildungen und — in Verknüpfung mit Erosion und Abtragung der kontinentalen Regionen — zur Ansammlung von Sedimenten in den Ozeanbecken führen musste, mit allmählich zunehmenden Mächtigkeiten von Hunderten bis Tausenden von Metern, weiterhin örtlich bis über 30 km. Zunächst kann es derartige Sedimentationsprozesse, mit denen auch manche Erzlagerstättenbildungen verknüpft sein können, auf dem Mond nie gegeben haben.
- C. Noch wichtiger ist aber die auf dem Mond schon seit Urzeiten praktisch fehlende «Tektonik», das sind stärkere Krustenbewegungen, durch welche original tiefere Krustenbereiche im Gefolge von Faltungen und Verwerfungen im Ausmass von bis zu vielen Kilometern auch vertikaler Bewegungen and die Oberfläche verfrachtet sein könnten. Die letzte Ursache des Fehlens einer solchen Tektonik, deren Andauern bis zur Gegenwart sich u. a. auch in zahllosen Erdbeben zeigt, ist durch das *Fehlen eines mobilen Kerns von flüssigem Eisen* bedingt. Wie Abb. 1 andeutet, sind grossräumige Strömungszyklen im äusseren Erdkern der eigentliche Motor für die Geotektonik, für den Vulkanismus, für die Gebirgsbildung und auch für wesentlichste Prozesse der Entstehung von Erzlagerstätten. Deshalb aber auch werden die im tieferen Mondinnern wohl wahrscheinlich vorhandenen Bodenschätze (nach Art von Abb. 3) praktisch doch so gut wie nirgends an der Mondoberfläche greifbar geworden sein können.
- D. Die seit über 3,5 Milliarden Jahren andauernde Geotektonik hat seit Urzeiten auch immer wieder basaltische Magmen aus der Region des Oberen Mantels (vgl. Abb. 1 und 2) — im Gefolge von Wiederschmelzungsprozessen durch Druckentlastung in der *Gutenberg-Zone* — in höhere Erdkrustenstockwerke verfrachtet. Dabei sind als Restschmelzen *saurere granitartige Massen* («Sial») im Laufe der Erdgeschichte laufend und *immer stärker in den äusseren Regionen der Erdkruste angereichert* worden, wie insbesondere G. Fischer (1951, 1957) im einzelnen begründet hat. Diese zunehmende Sial-Ansammlung bedeutet gleichzeitig eine zunehmende Anreicherung von selteneren Elementen im Gefolge der immer wieder wiederholten fraktionierten Kristallisation von aufwärts geförderten Silikatschmelzen. Erst dadurch sind viele Erze von Lithium, Rubidium,

Cäsium, Beryllium, Bor, Molybdän, Zinn, Wolfram, Niob, Tantal, Kupfer, Wismut, Nickel, Kobalt, Zirkon, Hafnium, Seltene Erdmetalle, Thorium, Uran, Silber und Gold etc. in wesentlichen Mengen für die menschliche Zivilisation greifbar geworden, insbesondere aber auch z. B. Graphit und Diamanten. Die kontinuierliche Sial-Zufuhr seit über 3,5 Milliarden Jahren und die grosszügige Wiederaufschmelzung von Erdkrustenmaterial («Palingenese») unter geotektonisch bedingten Geosynklinalregionen hat für die Entwicklung der irdischen Bodenschätze eine ausschlaggebende Rolle gespielt. Die wichtigsten, d. h. mengenmässig vorherrschenden Erzkomponenten, welche bevorzugt durch sialisch-palingene Wiederaufschmelzungsprozesse von Oberkrustenmaterial entstehen können, sind auf Abb. 4 angedeutet (nähere Erläuterungen u. a. bei H. Borchert, 1951, 1961, 1968; A. Cissarz, 1965; P. Routhier, 1963).

Der Hauptgrund für die negativen Prognosen betreffs mineralischer Bodenschätze besteht also darin, dass der Mond *keine lebendige Tektonik* besitzt, welche die unerlässliche Voraussetzung dafür ist, dass sich ein Vulkanismus und damit verknüpft auch wichtigste Erzanreicherungsprozesse bis in die Gegenwart erhalten konnten und wertvolle mineralische Rohstoffe in Reichweite des Menschen gerückt wurden. Auf dem Mond kann so gut wie nichts Bedeutsames an nutzbaren Bodenschätzen erwartet werden.

Der Mond teilt mit grosser Wahrscheinlichkeit dieses Schicksal mit dem Mars, dessen Oberfläche einen recht Mond-ähnlichen Charakter zu haben scheint (vgl. hierzu besonders G. P. Kuiper, 1964). Die letzte Ursache für praktisch fehlende potentiell nutzbare Mineralanreicherungen liegt also darin, dass auch der Mars keinen Kern von flüssigem Eisen haben wird (vgl. die durchschnittlichen Dichten von Tabelle 1) bzw. höchstens einen so kleinen, dass auch auf dem Mars die lebendige Tektonik und magmatisch-vulkanische Phänomene schon seit einigen Milliarden Jahren erstorben sein werden.

Vorstehend sind in gedrängter Kürze einige Argumente vorgebracht worden, warum auf dem Mond keine bedeutsamen Bodenschätze anzutreffen sein werden. Die Bestätigung dieser Prognose wird natürlich einige Jahre bzw. sogar Jahrzehnte in Anspruch nehmen, wenn man nämlich an der 10. und 20. Landungsstelle unseres Erdtrabanten immer noch nichts Nennenswertes an nutzbaren mineralischen Anreicherungen und schon gar keine «Schätze» im landläufigen Sinn gefunden haben wird.

Dennoch wurde unter Abschnitt II schon angedeutet, dass es wohl mit Sicherheit auf dem Mond *nicht nur gewöhnliche Silikatgesteine* geben wird, hauptsächlich mit etwa basaltischer Zusammensetzung, aber wohl auch etwas SiO₂- und alkalreichere Differentiationsprodukte. Deren Mineralien werden aber ganz überwiegend durch Armut an OH- und H₂O-Komponenten gekennzeichnet sein, bedingt durch die weitgehende Abdestillation aller leichtflüchtigen Bestandteile anlässlich der Ur-Erstarrung der Silikatschmelzen in das Vakuum des Weltraumes. Auch Wasser wird auf dem Mond ein kostbarer, nur mit grossem technischen Aufwand zu gewinnender Rohstoff sein. Auch Eis dürfte sich selbst in tiefen Schluchten der Polregionen kaum erhalten haben können.

Dennoch werden durch die gigantischen Anstrengungen des Apollo-Unternehmens unsere gesamten naturkundlichen Kenntnisse durch unmittelbare Erfor-

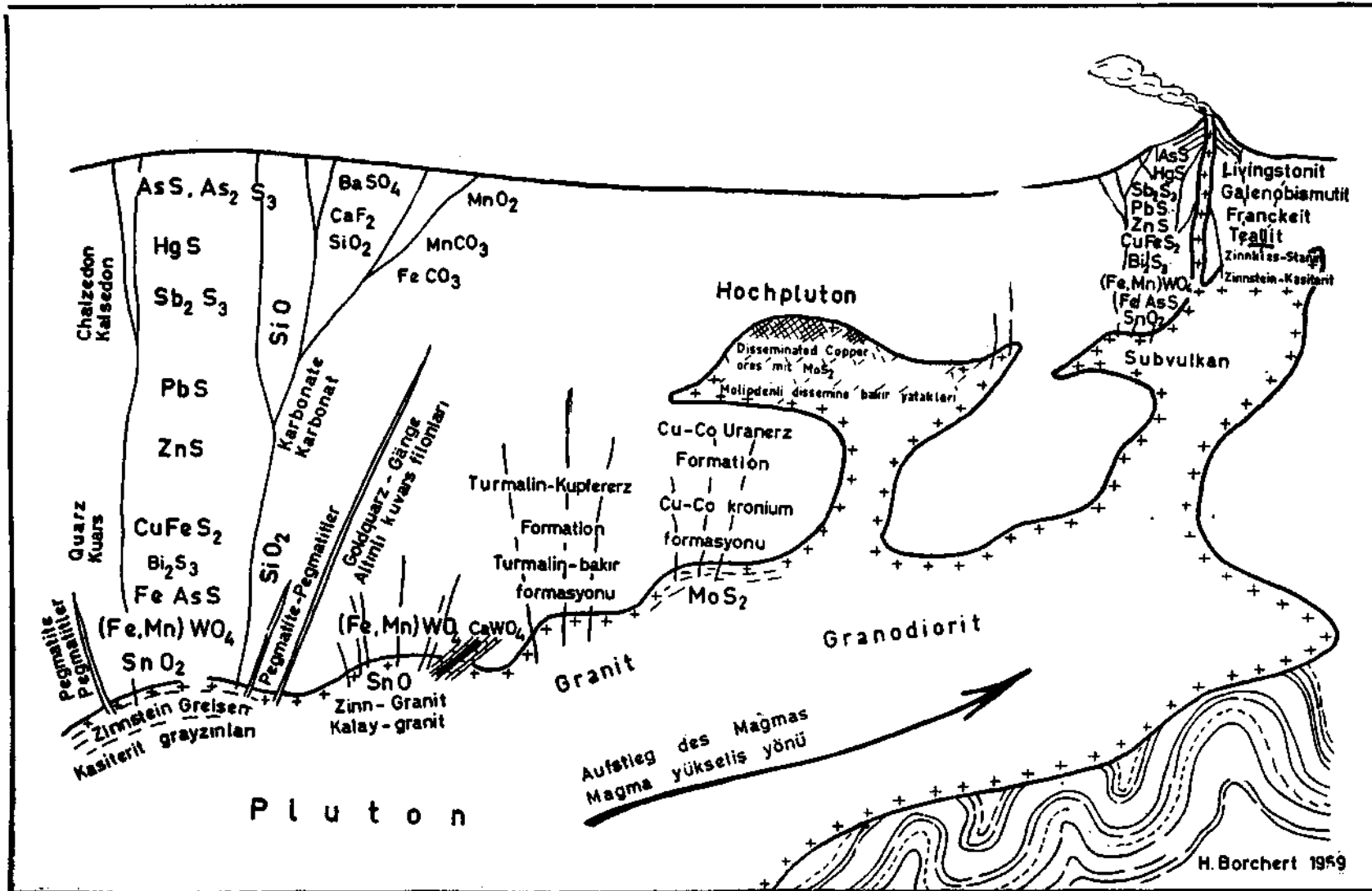


Abb. 4

H. Borchert 1959

schung des Mondes entscheidend erweitert werden. Das gilt zunächst die Einzelheiten der angetroffenen Gesteine. Es gilt für die speziellen Mineralien dieser Gesteine, von denen viele zwar wahrscheinlich für den Fachmann alte Bekannte sein werden, aber auch dann werden die Körnungen und Gefüge als solche schon höchst interessant sein. Besonders gespannt sein darf man aber auch auf die aus vulkanischen Exhalationen gebildeten Mineralien, von denen manche —im Kontakt mit dem interplanetarischen Vakuum entstanden und nicht in Wechselwirkung mit einer Sauerstoff-reichen Atmosphäre — auf der Erde überhaupt nicht anzutreffen und beobachtet sein könnten. Hohen Gewinn an wissenschaftlichen Erkenntnissen versprechen zahlreiche Details der seit einigen Milliarden Jahren eingefrorenen vulkanischen Phänomene, die erstmalig einen Himmelskörper im ± gut erhaltenen Urzustand studieren lassen. Das gilt weiter für viele «geologische» Beobachtungen der Mondkruste, ihre magnetischen und sonstigen «lunophysikalischen», insbesondere auch radioaktiven Eigenschaften, über welche natürlich schon einiges durch die Mondsonden-Beobachtungen bekannt geworden ist. Es gilt für die seismischen und Meteoriten-Einschlagseffekte und sehr vieles andere mehr, auf das man äusserst gespannt sein darf, nachdem am 20. Juli 1969 um 20 Uhr, 17 Minuten und 46 Sekunden MEZ der «Adler» mit den Astronauten *Neil Armstrong* und *Edwin Aldrin* — mit *Michael Collins* im Raumschiff von Apollo 11 — sanft im Mare Tranquillitatis gelandet ist und damit das Tor für eine neue Welt aufgestossen worden ist.

Manuscript received July 28, 1969

L I T E R A T U R H I N W E I S E

- BALDWIN, R. B. (1949) : The Face of the Moon. Chicago 1949.
- BORCHERT, H. (1951): Die Zonengliederung der Mineralparagenesen in der Erdkruste. *Geol. Rdsch.*, 39, 81 - 94.
- (1961) : Zusammenhänge zwischen Lagerstättenbildung, Magmatismus und Geotektonik. *Geol. Rdsch.*, 50, 131 - 165.
- (1962) : Chemismus und Petrologie der Erdschalen sowie die Entstehung und Ausgestaltung der wichtigsten Diskontinuitäten der Erdkruste. *N. Jb. f. Mineral., Mh.*, 7/8, 143-163.
- (1967) : Vulkanismus und Oberer Erdmantel in ihrer Beziehung zum äusseren Erdkern und zur Geotektonik. *Bol. Geofisica Teorica ed Applicata*, 9, N. 35, 194-213.
- (1968) : Der Wert gesteins- und lagerstättengenetischer Forschung für die Geologie und Rohstoffnutzung. *Ber. deutsch. Ges. geol. Wiss., B, Mineral. Lagerstättenforsch.*, 13,1, 65-116.
- & BÖTTCHER, W. (1967) : Zur Petrologie der Lithosphäre in ihrer Beziehung zu geophysikalischen Diskontinuitäten, auch der Gesamterde. *Gerlands Beitr. z. Geophysik*, 76, 4, 257 - 277.
- & TRÖGER, E. (1950) : Zur Gliederung der Erdkruste nach geophysikalischen und petrologischen Gesichtspunkten. *Gerlands Beitr. z. Geophys.*, 62, 101 - 126.
- v. BÜLOW, K. (1963 - 1967): Beiträge zur Selenogeologie.

I und II,	Geologie,	12, H. 10,	1129 - 1137,	Berlin,	1963.
III,	»	13, H. 4,	449 - 455,	»	1964.
IV,	»	13, H. 6/7,	899 - 913,	»	1964.
V,	»	14, H. 3,	330 - 343,	»	1965.
VI,	»	15, H. 6,	726 - 631,	»	1966.
VII,	»	15, H. 7,	841 - 845,	»	1966.
VIII,	»	16, H. 8,	916 - 921,	»	1967.
IX,	»	16, H. 9,	1045 - 1052,	»	1967.

- v. BÜLOW, K. (1967): Die heutige Erforschung des Mondes und ihre Ergebnisse. *Universitas*, 22, H. 8, 815-826.
- CISSARZ, A. (1965): Einführung in die allgemeine und systematische Lagerstättenlehre. 2. völlig umgearbeitete Auflage, Stuttgart.
- EUCKEN, A. (1944 a): Physikalisch-chemische Betrachtungen über die früheste Entwicklungsgeschichte der Erde. *Nachr. Akad. Wiss. Göttingen, math.-phys. Kl. r*, 1 - 25.
- (1944 b): Über den Zustand des Erdinnern. *Naturwiss.*, 32, 112-121.
- FISCHER, G. (1951): Granit und Sial. *Geol. Rdsch.*, 39, 32-77.
- (1957): Die Unterkruste vom Standpunkt des Petrographen. *Geol. Rdsch.*, 46, 131 - 136.
- KREJCI - GRAF, K. (1959): Der Bau der Mondoberfläche im Vergleich mit der Erde. *Astronautica Acta*, 5, 3-4, 163 - 223.
- KUIPER, G. P. (1952): The Atmospheres of the Earth and the Planets. Chicago 1949. 2. Edition Chicago 1952.
- (1964): The moon and the planet Mars. *Advances in Earth Science, Internat. Conference, Massachusetts Inst. of Technol.*, Sept. 1964, 21-70.
- MIYAMOTO, S. (1960): A geological interpretation of the lunar surface. *Contrib. Inst. Astrophys. and Kwasan Observatory*, No. 90, Kyoto 1960.
- NEUHAUS, A. (1965): Die moderne Hochdruck - Hochtemperatur - Forschung und ihre geochemisch - petrologischen Aspekte. *Freiberger Forschungshefte*, C 210, 113-131.
- RITTMANN, A. (1948): Zur geochemischen Entwicklung der prägeologischen Lithosphäre. *Schweiz. miner. petrogr. Mitt.*, 28, 36-48. (Niggli-Festschrift).
- ROUTHIER, P. (1963): Les gisements metalliferes, geologie et principes de recherche. 2 Bde., 1282 S., Paris 1963.
- SCHNEIDERHÖHN, H. & BORCHERT, H. (1956): Zonale Glieder der Erzlagerstätten. *N. Jb. Mineral., Mh.*, 136-161.
- UREY, H. C. (1952): The Planets, their origin and development. New Haven 1952.
- WHIPPLE, F.L. (1947): Earth, Moon and Planets (*Harvard- Books*). Philadelphia - Toronto 1947.
- WILLIAMS, A. F. (1930): The genesis of diamond. 2 Bde., 676 S., London 1930.
- WINKLER, H. G. F. (1965): Die Genese der metamorphen Gesteine. 218 S., Berlin - Heidelberg - New York 1965.