

## STUDIE ÜBER DEN ZONENBAU DER PLAGIOKLAUSE. II.

### *Über den Zusammenhang der zonaren Struktur mit der Temperatur.*

Von A. LENGYEL.\*

— Mit einer Tabelle am Ende des Bandes und mit der Fig. 2. im Texte. —

An den Plagioklasen sämtlicher eruptiver Gesteine kann sich eine zonare Struktur bemerkbar machen, aber nirgends so charakteristisch und ausgesprochen, wie bei den neutralen effusiven Gesteinen. In Tiefengesteinen erscheint sie seltener und nach meinen Erfahrungen kommt in den meisten Fällen keine wirkliche, verschiedene chemische Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften besitzende Zonarität zum Ausdruck, sondern nur eine Unterbrechung des Wachstums derart, dass zwischen dem Kerne und etlichen wenigen Hüllen meist gar kein chemischer oder physikalischer Unterschied beobachtet werden kann.

Infolge zwischen weiten Grenzen des raschen Schwankens der bei der Abkühlung eine Rolle spielenden chemischen und physikalischen Verhältnisse, kommt KONOWALOWS<sup>1</sup> aus der Destillation binärer Mischungen abgeleitete Regel am schönsten in Porphyrgesteinen zur Geltung, laut welcher die zuerst ausgeschiedenen Mischkristalle von dem Komponenten einen Überschuss besitzen, der bei höheren Temperaturen schmilzt. Und in der Tat ist der Kern der zonaren Plagioklase in den Fällen normaler — gleichmässig abnehmender — Magmaabkühlung immer Anorthit-reicher, als die äusseren Zonen. Dies stimmt mit den von DAY, ALLEN und BOWEN<sup>1</sup> festgestellten höheren Schmelzpunkt des Anorthits überein.

Es ist eine allbekannte Tatsache, dass in der unteren Gruppe der kristallinen Schiefer zonare Plagioklase ebenfalls vorkommen. Die Zonenreihenfolge ist aber immer eine verkehrte, weil infolge des stufenweisen Wachsens der geodynamischen Kraftereinwirkungen die wachsende Tendenz der Temperatur zur Geltung kommt: der Kern wird also Albit-reicher, die Hüllen aber nach aussen immer reicher an An-Molekullen sein.

In höheren Lagen, insbesondere in der oberen Gruppe der kristallinen Schiefer entsteht bei verhältnissmässig viel niedrigerer Temperatur nur Albit, weil (obzwar die Zusammensetzung auch hier das Erscheinen eines basischeren Feldspatgliedes erlauben würde) bei niedriger Temperatur der Ca-Gehalt zur Bildung anderer, exothermaler Mineralgemenge abgebunden wird.

\* Vorgetragen in der am 6. Jänner 1927. abgehaltenen Fachsitzung der Ung. Geologischen Gesellschaft.

<sup>1</sup> H. E. BOEKE: Grundlagen der physikalisch-chemischen Petrographie. Berlin, 1915. p. 156.

Aus neueren physiko-chemischen Untersuchungen ist es bekannt, dass die an künstlichen Silikaten festgestellten Schmelzpunkte bedeutend höher sind, als der bei der natürlichen Bildung verschiedener Mischungsverbindungen derselben Gemenge benötigte Wärmegrad. Ferner wissen wir auch, dass die isomorphen Mischungssilikate und so auch die Plagioklase keinen ständigen und sie individuell charakterisierenden Erstarrungswärmegrad besitzen, sondern Erstarrungsintervalle, ober deren Maximum sie noch geschmolzen, unter ihrem Minimum aber bereits feste Phasen sind. Zwischen diesen zwei Extremen ist der Molekularzustand ein viskoser Brei, in welchem Kristalle und Schmelze im Gleichgewichte neben einander vorkommen.

Infolge der ersten Ausscheidungen — die nach der KONOWALOW-schen Regel von dem bei höherem Wärmegrad schmelzenden Komponenten einen Überschuss haben — verändert sich die Zusammensetzung der Lösung und da bei Silikaten in festem Zustande eine Diffusion sehr schwer vor sich geht, umrindet das mit der Erniedrigung der Temperatur sich parallel verändernde Schmelzgemenge den zuerst ausgeschiedenen Kern. Diese Art der fraktionierten Kristallisation ist auch für die zonaren Plagioklase charakteristisch, wo der zuerst ausgeschiedene Kristall mit der stufenweise abkühlenden geschmolzenen Substanz durch Austausch nicht ins Gleichgewicht kommen kann und die an Bestandteilen, welche einen niedrigeren Schmelzpunkt haben, sich reichere Gemenge nacheinander in der Form von Schalen ablagern.

Aus DAYS, ALLENS und in neuerer Zeit aus BOWENS umsichtigen Untersuchungen wissen wir, dass der Schmelzpunkt sich mit der Zusammensetzung der Plagioklase beständig verändert und dass nur dem Anorthit ein fixer Schmelzpunkt zukommt. Bei den sauereren triklinen Feldspaten erscheint eine grössere-kleinere Erstarrungszeit, resp. Wärmeintervall. Ja sogar die Bestimmung des Schmelzpunktes des sauerst zusammengesetzten Albits ist, infolge des Versagens der Reaktionen nur schwer zu ermitteln, so dass man das Schmelzmaximum bloss mit einer  $\pm 10^0$ -igen Fehlergrenze anzugeben im Stande ist.

BECKE<sup>2</sup> und BRAUNS betrachteten als Entstehungsursache der zonaren Struktur der Plagioklase die Stufenweise Veränderung der chemischen Zusammensetzung des Magmas, während nach ihnen Druck- und Temperaturveränderungen (agent mineralisateur), bloss eine untergeordnete Rolle zugesprochen werden kann. BOWEN<sup>3</sup> hat im Gegensatz dazu mit statischen Experimenten nachgewiesen, dass die Kristallisation der Plagioklas-Mischreihe mit ihrer Schmelztemperatur in geradem Verhältnisse steht. Die chemische Zusammensetzung und die Erstarrungstemperatur verfolgen eine mit einander parallele, sich stufenweise hebende, resp. senkende

<sup>2</sup> F. BECKE: Tschermaks Mitt. 1906., 25., 1.

<sup>3</sup> H. E. BOERE: Grundlagen der phys.-chem. Petrographie. Berlin 1915. p. 157.

Bahn. Die Gleichung der Zusammensetzung der Mischungskristalle enthält nach ihm nur die Schmelztemperatur beider Mischungskomponenten.

Der Schmelzpunkt irgend einer Feldspatmischung hängt also vom Mischungsverhältnisse und in gewissem Masse vom fallweisen Drucke ab, mit welchem im Verhältnisse sich der Schmelzpunkt verändert, welcher immer niedriger ist, als die Schmelztemperatur der bildenden Komponenten. Bei aus einer Mischung bestehenden geschmolzenen Substanz erfolgt die Ausscheidung bereits unter dem Erstarrungstemperaturmaximum der Bestandteile mit höherem Schmelzpunkte. Da die Schmelztemperatur der zwei isomorphen Bestandteile verschieden ist und sie sich aus der geschmolzenen Substanz nicht gleichzeitig ausscheiden können, enthalten die sich zuerst ausscheidenden Kristallkerne mehr von den schwerer schmelzenden Bestandteilen, die eine höhere Schmelztemperatur besitzen, welche von dem später, bei niedrigerer Temperatur erstarrenden geschmolzenen Gemenge in der Form einer Hülle umgeben werden.

Während der Untersuchung der zonaren Plagioklase der Andesite des Donauwinkelgebirges verfolgte ich mit besonderer Aufmerksamkeit jene Symptome, die auf die Verbindung der chemischen Zusammensetzung und der Temperatur hinweisen und, die ich kurz im folgenden zusammenfasse.

Eine jede meiner Beobachtungen bezeugt, dass bei der Ausscheidung der Feldspatmischungen innerhalb der vom Magma gegebenen chemischen Zusammensetzung in effusiven Gesteinen neben der untergeordneten Rolle des Druckes in erster Linie die Temperatur von entscheidender Bedeutung ist. Bei verschiedener Temperatur ist die Konzentrationsfähigkeit der verschiedenen Feldspatgemengen verschieden, was sich innerhalb der Grenzen der gegebenen Verbindung in der Verbindungsmodalität, resp. im Verhältnisse des Ab- und An-Molekulgruppen äussert. Für effusive Gesteine ist eben das Freiwerden von hohem Druck und die raschere Temperaturabnahme charakteristisch, welche zur Ablagerung von Zonen nicht nur eine günstige Gelegenheit bietet, sondern dazu sogar zwingend einwirkt. Wenn der Druck beim zonaren Aufbau eine entscheidende Rolle spielen würde, dann würde sich bei der Erstarrung von Tiefengesteinen eine reichliche Gelegenheit zum lenkenden Einfluss dieses Faktors bieten. Da aber die Abkühlung hier ein ungemein langsamer Prozess ist, kann eine zonare Struktur schon deshalb nicht erscheinen, weil infolge der aussergewöhnlich lange Zeit andauernden hohen Temperatur sich reichlich Gelegenheit bietet, zur mit der magmatischen Zusammensetzung zusammenhängenden Gruppierung der Feldspatmoleküle: zur Ausscheidung eines einheitlichen Feldspates.

Im Gegensatz dazu fällt auf Grund meiner Andesitstudien als eine verallgemeinbare Gesetzmässigkeit auf, dass in effusiven Gesteinen, deren Erstarrung bei rapider Temperaturverringerung und verhältnismässig kleinem Druck von statten geht und wo die chemischen und physikalischen Bedingungen während und nach der Effusion noch kürzere oder längere Zeit hindurch zum weiteren Wachstum der Kristalle günstig waren die zonare Struktur unaus-

bleiblich erfolgt. Es gibt kaum eine Andesitart, an deren Plagioklasen die mit der Temperaturverringering während der Erstarrung eng zusammenhängende und überaus manigfaltig erscheinende Zonarität nicht zu erkennen wäre.

An Feldspatindividuen von grossen Dimensionen gibt es gewöhnlich mehr Zonen, an kleineren weniger, während sie an den Mikrolithen zu meist fehlen. Je grösser das Zeitintervall während des Aufbaues der Kristallzentren war, desto verschiedener ist die Grösse der Einsprenglinge und je länger das Magma unter günstigen Verhältnissen auf dem zur Feldspatausscheidung nötigen Temperaturoptimum verweilte, um so grösser ist verhältnismässig der Kern. Und endlich: eine je längere Zeit die Abkühlung der effusierten Magmamasse in Anspruch nahm, desto grösser ist und einen desto feineren Übergang hat die Anzahl der den Kern umgebenden Zonen.

Bei plötzlich abkühlenden, glasigen, kleinkristallinen Gesteinen (der Pyroxen-amfibolandesit des Kis Kik) kann man die zonare Struktur zwar auffinden, jedoch ist sie nicht ausgesprochen. Die Grenzlinien sind verwaschen und zwischen der Extinktion der einzelnen Glieder ist blos ein geringer Unterschied zu bemerken. Es ist offenkundig, dass in solchen Fällen — in verhältnissmässig kleinen Magmamassen nicht Zeit genug und kein genügendes Temperaturoptimum zur Zonenablagerung, also zur Ausscheidung von Feldspatgliedern grösserer Variation vorhanden war.

Die äusserste Zone sondert sich in vielen Fällen von den übrigen scharf ab. Abgesehen von den Fällen, in denen diese bestimmte physikalische Absonderung die Folge einer grösseren Veränderung der inneren, basischeren Hüllen ist, weisen die optischen Verhältnisse (Lichtbrechung  $\leq 1.54$ ; Extinktion 3—4°) der äusseren, frischen Zone übereinstimmend darauf hin, dass sie nahezu eben so sauer ist, wie der Albit. In solchen Fällen müssen wir voraussetzen, dass die allgemeine chemische Zusammensetzung des Magmas die Ausscheidung eines so saueren Feldspatgliedes vor der Erstarrung der aus Feldspat- und Quarzeutektikum bestehenden Grundmasse zulies.

Besonders in saueren Andesiten mit felsitischer Grundmasse werden die Plagioklase von einer sich scharf absondernden, breiteren äusseren, saueren Hülle umgeben, zum Zeichen, dass ihr Wachstum bei gleichmässig rascher erfolgreicher Magmaabkühlung, infolge des für die saueren Feldspatgemenge charakteristischen breiteren Erstarrungsintervalles, lange Zeit bei ungestörten physikalischen Verhältnissen andauerte. Diese Beobachtung steht mit dem weiten Erstarrungstemperaturintervall der Albitarten im Einklange, deren Maximum um 1100° liegt — aber laut Laboratoriumsuntersuchungen setzt sich die Temperaturgrenze in einer unbestimmten Breite gegen das Minimum fort.

Wenn wir nun von der Fundamentalvoraussetzung ausgehen, dass im Falle isomorpher Zonarität die Ausscheidung der auf einander folgenden Hüllen bei einer sich stufenweise verringern Temperatur vor sich ging, so müssen wir voraussetzen, dass jede einzelne Hülle das für jene Feldspatmischung

charakteristische Temperaturintervall vertritt, welches DAY und ALLEN mit ihren Experimenten für die einzelnen Glieder feststellten.

Jenes Faktum aber hingegen, dass die zonare Struktur in ihren äusserem Erscheinen keine allmählig übergehende ist, sondern sich in von einander scharf abgrenzende Zonen sondert, (innerhalb deren sie aber homogen sind) lässt jener Voraussetzung den Vorrang, dass die Ab- und An-Moleküle nicht in jedwedem denkbaren Verhältnisse ein Isomorphgemenge bilden, obzwar man dies theoretisch erwarten könnte. Entweder tritt während der Ablagerungszeit der einzelnen Zonen in der Empfindlichkeit gegen die Temperatur innerhalb gewisser Grenzen eine gewisse Stagnation ein, in welchem Falle die Zonen ein für Gemengglieder grösserer Variation charakteristisches Temperaturintervall vertreten, — oder wird die Gruppierung in dem sich stufenweise abkühlenden und immer viskoser werdenden geschmolzenen Magma der jeweiligen Temperatur entsprechenden Komponentenmoleküle zu einer starren Phase immer schwieriger. Man kann daher mit Recht voraussetzen, dass die Zonenbreite mit dem rascheren oder langsameren Tempo der Abkühlung in geradem Verhältnisse steht. Nämlich bei Voraussetzung identischer Konzentrationsverhältnissen, ist anzunehmen, dass je dünner die Zonen sind, die Abscheidung des Gemenggliedes um so kürzere Zeit dauerte. Es überstand also das Magma um so schneller das für jenes Feldspatgemenge charakteristische Temperaturintervall. Und entgegengesetzt: je breiter die Zone ist, in einem verhältnismässig desto langsameren Tempo ging auch die für jenes Gemengglied charakteristische Temperaturabnahme von statten, weshalb dem Wachstum der Zonen identischer Zusammensetzung ein grösserer Zeitraum zu Gebote stand.

Wenn wir also — bei identischen chemischen und physikalischen Verhältnissen — die Wachstumsgeschwindigkeit der Kristallisation als gleichmässig annehmen, was auch neuere Experimente bezeugen, so gibt die verschiedene Breite der Zonen vom Prozesse der Temperaturabnahme des Magmas ein getreues Bild. Der Kern wuchs bei noch stabiler Temperatur zur vorhandenen Grösse, aber das Erscheinen der Zonen zeigt schon die — für Feldspatglieder charakteristische — rasche Abnahme der kritischen Erstarrungstemperatur des Magmas. In diesem Sinne können also die Einsprenglinge der effusiven Gesteine streng genommen nicht als intratellurisch betrachtet werden, — wie dies die Theorie ROSEBUSCHS lehrt, da die nähere Untersuchung der zonaren Plagioklase zeigt, dass ihr Wachstum grösstenteils während der Effusion und in geringerer Menge nach derselben vor sich ging, sich also eigentlich bis zum Zeitpunkte der gänzlichen Magmaerstarrung fortgesetzt hat. In der verhältnismässig grössten Tiefe entstand — beim Eintreten der für die Ausscheidung günstigsten Temperatur — der Kristallkern, dessen weiteres, zonares Wachsen teilweise schon in hypabissischen Tiefen, teilweise an der Oberfläche von statten ging. Dieser letztere Fall bezieht sich ausschliesslich auf grosse, langsam auskühlende effusive Massen, was man auch an den Feldspaten der jüngeren Laven des Ätna bemerken kann.

Da zwischen dem Gange der Magmaabkühlung und der Zonenbreite ein enger Zusammenhang besteht, ist es sehr wahrscheinlich, dass bei identischer Temperatur und Kristallisationsfähigkeit zum Ablagern eine z. B. 2  $\mu$  mässenden, dünnen Hülle, zweimal so viel Zeit erforderlich ist, als bei einer Stärke von 1  $\mu$ . Es ist also kein Ding der Unmöglichkeit — im Besitze der notwendigen Laboratoriumsexperimente — auf Grund der verhältnismässigen Mächtigkeiten der Feldspatzonen und mit Hilfe des Anziehungskoeffizienten der Feldspatmoleküle, resp. der Kenntnis seiner Wachstumsgeschwindigkeit, die Zeitdauer der Ausscheidung, der Kristallisierung, also auch die Abkühlung der effusiven Magmamasse, sowie ihre Erstarrungsgeschwindigkeit zu konstatieren.

Sehr interessante Ergebnisse erhalten wir in dem Falle, wenn wir an orientierten, möglichst zwillingsfreien Feldspatschnitten (mit der 010 Fläche ||) die Breite der Zonen mit dem optisch bestimmten Ab- An-Gemengeverhältnis resp. der ihm entsprechenden Erstarrungstemperatur in eine Parallele stellen.

Aus der Untersuchung der zonaren Struktur mehrerer hundert mannigfacher, oft kompliziert aufgebauter Schnitte, konnte ich verschiedene Typen der Zonarität erkennen, auf welche die komplizierten zonaren Strukturen zurückgeführt werden können.

Wenn wir nämlich auf die Ordinate eines Koordinatensystems das Ab- An-Gemengeverhältnis, auf die Abszisse die der chemischen Zusammensetzung entsprechende Erstarrungstemperatur auftragen, ergeben die Schnittpunkte folgende schematische Kurven (Siehe die Tabelle):

1. Typus. Bei lange andauernder und gleichmässiger Abkühlung sind die Hüllen von einer annähernd gleichen Breite. Eine grössere Abweichung ist nur im Ausmasse des Kernes und der äusseren Hülle zu beobachten. Graphisch können wir den Lauf der Unterkühlung mit einer stufenweise sinkenden, parabolistischen, kühn geschwungenen Kurve darstellen, auf welcher jedoch den eventuellen Temperaturschwankungen entsprechend, auch kleinere Schwingungen erscheinen können. Die Kristallisierungskurve ist in ihrem Anfangsabschnitte während des Ausscheidens des Kernes — den fallweisen Ausmassen des Kristallkernes entsprechend — horizontal. Infolge der von den übrigen scharf abgegrenzten der äussersten saueren Zone nähert sich der untere Teil der Kurve stark dem Temperaturmaximum des Albits. Die Zonen sind bei diesem Typus einen langen Abschnitt hindurch von gleicher Breite, sie sind aber im allgemeinen schmal und haben einen äusserst feinen Übergang. Besonders an den Plagioklasen der grossmassigen, langsam abkühlenden Pyroxenandesiten (Dömörkapu, Bölcsöhegy) kann man diese Art der isomorphen Zonenstruktur erkennen.

2. Typus. Für die saueren Andesite des Szentendre-Visegráder Gebirges bedeutend charakteristischere — im Falle vorherrschend erscheinender kleinerer Lavadecken, Lavaströme, agglomeratischer Tuffe und Breccien — gibt das Graphikon der gleichmässig schneller werdenden Abkühlung eine schief sinkende, wiederholt unterbrochene Linie. Der obere Teil der Kurve ist — nach

der relativen Grösse des Kernes — auf einem grösseren-kleineren Abschnitt auch hier nahezu horizontal, weil wir die Ausscheidung des Kernes bei annähernd gleicher Temperatur voraussetzen müssen. Die Biegungsrichtung seines unteren Teiles weist in vielen Fällen auf ein dem Albit nahestehendes Glied, infolge der mit ihm in Verbindung stehenden Temperatur. Das Vorhandensein von reinem Albit ist selbst im Falle der sich scharf absondernden äusseren Hülle sehr selten zu konstatieren, dessen Erklärung wahrscheinlich darin besteht, dass die Ausscheidung reinen Albits von der plötzlich eintretenden Erstarrung des die Grundsubstanz bildenden Feldspat-Quarz Eutektikums verhindert wird. Die aufeinander folgenden Zonenglieder sind manchmal bereits von verschiedener Breite: die inneren, auf den Kern folgenden Hüllen sind gewöhnlich breiter, die nach auswärts folgenden werden successive schmaler, dem Tempo der gleichmässig schneller erfolgenden Abkühlung entsprechend.

3. Typus. Ein interessantes Bild der isomorph-zonaren Struktur zeigen jene Fälle, wenn die Zonen öfter abwechselnd von abweichender Breite sind. Anscheinend sind sie rekurrentzonar, bei näherer Untersuchung ergibt sich aber, dass die abweichende Breite der aufeinander folgenden Hüllen keine sprungartige Schwankung der chemischen Zusammensetzung, sondern bloss eine im Laufe der Abkühlung eingetretene öftere Verlangsamung bedeutet, wobei sich nämlich günstige Gelegenheiten zur Ablagerung breiterer, aber der Substanz nach homogenen Zonen ergeben.

4. Typus. Wenn in der chemischen Zusammensetzung des Magmas eine plötzliche Änderung eintritt oder infolge des ruhigen Verlaufes der Erstarrung störenden Ursachen in der Temperatur der Abkühlung sprungartige Schwankungen (meist Erhöhungen) platzgreifen, dann tritt anstatt einer Isomorph-zonarität eine rekurrent-zonare Struktur auf, deren Kurve — nach meinen Untersuchungen — mehrfach, aber mit immer negativ sinkender Tendenz sich rückerhebend ist. Eine vollkommen inverse Zonarität habe ich nie beobachtet und eine solche ist bei den bekannten chemischen und physikalischen Gesetzmässigkeiten der Mineralausscheidung total ausgeschlossen.

Das Graphikon rekurrent-zonarer Feldspate stellt also — nach der Anzahl der fallweisen Rekurrenzen (meist 1—2) — eine mehrmal zurückfallende Kurve dar. Ihre sich erhebenden Teile zeigen die basischen (einen höheren Schmelzpunkt besitzenden) Wiederholungen an, welche aber in auswärts gehender Reihenfolge meist saurere Gemengteile vertreten, als die vorigen.

Die hier besprochenen reinen Typen der zonaren Struktur kommen selten vor. Genaue Untersuchungen überzeugten mich davon, dass die erstarrenden Feldspatkristalle gegen die chemischen und physikalischen Änderungen innerhalb gewisser Grenzen mit der Verhältnisveränderung der Ab- An-Molekülen reagieren.

Im zonaren Aufbau sind die meisten Plagioklase mannigfaltige, eines eingehenden Studiums werthe Kombinationen obiger Typen.

FOUQUÈ hielt es in den 1890-er Jahren nicht für wahrscheinlich, dass zwischen dem Albit und dem Anorthit eine ununterbrochene Mischungsserie bestehe. Auf Grund seiner Untersuchungen unterschied er 8—9 „Typen“, welche nach seiner Meinung durch keine Übergangsglieder mit einander verbunden wären, aber infolge ihrer isomorphen Eigenschaften einander fortwachsend Mischkristalle bilden können. Wie bekannt, stellte später G. TSCHERMAK auf Grund sorgfältiger Analysen seine Mischungstheorie auf, welcher sämtliche triklinen Feldspäte zwischen beiden Endgliedern (Ab-An) in vielerlei, theoretisch möglicher Mischungsverhältnissen Kristalle bilden können.

Ohne der Richtigkeit dieser mit physikalischen (hauptsächlich optischen) Untersuchungen unterstützten Theorie nahetreten zu wollen, konnte ich aus der Untersuchung der zonaren Plagioklase als Erfahrungen folgendes schliessen:

Trotz der zwischen den zwei äussersten Endgliedern der Feldspäte annehmbaren endlosen Mischungsmöglichkeit, kommen in der Gesteins-Welt doch nur 10—12 Feldspatarten vor, welche infolge ihrer Häufigkeit den Eindruck selbständiger Feldspatglieder erwecken. Und obgleich an den Plagioklasen der effusiven Gesteine die chemische und physikalische Gelegenheit ebenfalls gegeben ist, dass die Theorie handgreiflich erwiesen werde und der Zusammensetzung und Temperaturverringerung entsprechend unzählige Feldspatmischungen entstehen, stützen meine Untersuchungen jene Wahrscheinlichkeit, dass aus verschiedenen, von den physiko-chemischen Untersuchungen noch nicht geklärten Ursachen, doch annehmbar von der gegebenen chemischen Zusammensetzung des Magmas und den bestehenden physikalischen Verhältnissen abhängig, hauptsächlich infolge strukturmolekularer Ursachen nicht sämtliche mögliche Mischungskristalle in der Gestalt von Zonen erscheinen. Es treten unter ihnen scharfe Sprünge, Unterbrechungen in der Zusammensetzung auf, welche mit wichtigen gesteinsphysiologischen Momenten verbunden sind.

Die Erscheinung der eng abgegrenzten Zonen beweist, dass der Temperaturabnahme entsprechend die ausscheidende Feldspatmischung nicht stufenweise saurer werdend war, sondern binnen einem ziemlich breiten (für die einzelnen Ab- An-Gemengteile individuell charakteristischen und auch vom Tempo der Abkühlung abhängenden) Temperaturintervalle, die Ausscheidung einer Feldspatart identischer Zusammensetzung längere Zeit hindurch möglich war. Später, nach einer gewissen Temperaturerniedrigung die Ablagerung ruckartig aufhörte und mit scharfer Grenze die Ausscheidung eines neuen, bedeutend saurer zusammengesetzten Gemengteiles begann. Für diese Annahme spricht die Tatsache, dass in saureren Andesiten, — welche in relativ kürzerer Zeit etstarren — die Zonarität eine viel schärfere Grenzlinie besitzt, auffallender ist und aus weniger Gliedern besteht, wie in basischeren Gesteinen. Temperaturwechsel in rascherem Tempo hat eine schnellere Artveränderung zur Folge. Es kann daher keine so breite Skala des Übergangs vorhanden sein, wie in den langsamer abkühlenden basischen Gesteinen. In den Effusiven saurerer Zusammensetzung hindert oder erschwert



wahrscheinlich auch die viskosischere Natur des Magmas die geschmeidigere Gruppierung der Feldspatmoleküle.

Nach der Auffassung BECKES ist der wichtigste Grund der Zonarität die stufenweise Veränderung der chemischen Zusammensetzung des Magmas, welche immer ärmer wird an schwerer schmelzenden, basischeren Bestandteilen. Wenn aber bei der Entstehung der Zonarität die chemische Veränderung eine stufenweise ist und die chemische Zusammensetzung überhaupt eine anschlussgebende Rolle spielen würde, so fragt es sich, warum die Ablagerung der Hüllen nicht kontinuierlich und ohne Übergänge aufeinander erfolgt ist. Warum erscheint an den Plagioklasen überhaupt eine zonare Struktur? Dem endlosen Übergange der chemischen Zusammensetzung entsprechend müsste sich wohl eine optisch undulöse, sich in einem Bogen neigende, ununterbrochene Extinktion einstellen. Man könnte zwar auch annehmen, dass das Fehlen von Material die Ursache der zonalen Struktur ist, dass zeitweise aus dem Umkreise der erstarrenden Kristalle der eine oder andere Bestandteil des Feldspatstoffes aufgebraucht worden wäre und das Auftreten des neuen Gemenggliedes den zonalen Aufbau verursacht hätte. In diesem Falle wäre die Reihenfolge der auf einander folgenden Zonen ziemlich rhapsodisch. Und infolge des im Wachstum eintretenden selbst bloss einen Moment andauernden Stillstandes, würden Fremdkörper zwischen die Zonen getrieben und einverleibt worden sein, was man aber nicht beobachten kann. Von primären Einflüssen können wir in zonarer Verteilung vorherrschend Glas (Grundsubstanz), Flüssigkeitstropfen und Gasblaseneinschlüsse erkennen, welche beim Wachsen des Kristalles beständig zugegen sind und von welchen die letzteren die momentane Gasarmut oder den Gasreichtum des Magmas bezeugen.

Bei der Annahme, dass eine scharf abgegrenzte zonare Struktur zustande kommen kann, treten zwei Möglichkeiten in den Vordergrund: entweder gelangt der porphyrische Feldspat während der Abkühlung in Magmateile von abweichender Zusammensetzung, in welchem Falle ausschliesslich die Bildung von rekurrent-zonarem Feldspat denkbar wäre. (Einen wachsenden Kristall kann man sich selbst im Falle geschlossener, unbeweglicher Magmamassen kaum absolut ruhend vorstellen.) Oder es verursacht die Schwankung der Temperatur die Ausscheidung der Feldspatmischungen verschiedener Zusammensetzung und verschiedener Schmelztemperatur, in welchem Falle sowohl eine isomorph als auch eine rekurrent-zonare Kristallbildung möglich ist. Wenn die Temperaturverringerung keine leitend wichtige Rolle bei diesem Verlaufe spielen würde, könnte auch eine inverse Zonarität eintreten, weil der Kristall während seiner Bewegung immer An-reiche Magmateile finden könnte. Während meiner Untersuchungen fand ich aber kein Beispiel dafür.

Zur richtigen Erklärung der Entstehung der zonalen Struktur geben uns die bereits erwähnten neueren Ergebnisse der physiko-chemischen Untersuchungen eine Anleitung und Handhabe.

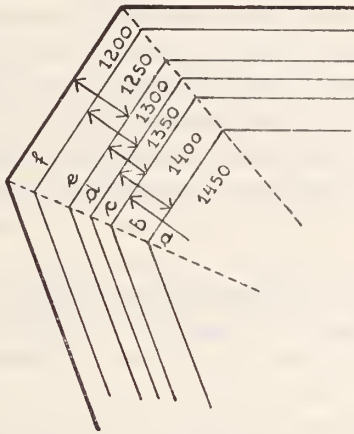
Die chemische Zusammensetzung hat mit der Erstarrungstemperatur im engen Zusammenhange eine sich gleichmässig hebende oder senkende Laufbahn, welche graphisch mittelst einer Kurve dargestellt werden kann. Die mit reinen Feldspatgliedern vollzogenen künstlichen Schmelzexperimente wenigstens bezeugen dies. Beim Zustandekommen natürlicher Feldspatkristalle aber ist — infolge der vielen praeeexistierenden Nebenumstände — in der Verbindung ihrer chemischen Zusammensetzung und der Temperaturverhältnisse der vollkommene Parallelismus nicht vorhanden. Der gleichmässigen Temperaturschwankung folgt nicht Schritt auf Schritt parallel auch eine Artveränderung. Es entstehen Lücken, Sprünge, welche sich in der eigentümlichen Struktur der zonaren Feldspate widerspiegeln.

Bei der Erklärung dieser Erscheinung treten mit der Temperatur und der allgemeinen und charakteristischen negativen Eigenschaft der Silikate, der Viskosität in Verbindung molekularstrukturelle Ursachen in den Vordergrund. Die zonare Struktur ist die Folge eines koordinativen Zusammenhanges dieser Faktoren. Wenn man dieselben im Auge behält, wird es verständlich, dass die Anpassung der chemischen Zusammensetzung der Feldspate an die Temperaturschwankung keine vollkommene ist. Daraus folgt, dass die Kristalle meist in sprungweisen Mischungsverhältnissen mit zonarer Struktur wachsen. Die sich zuerst ausscheidenden Mischungskristallkerne sind meist unabhängig von der allgemeinen Zusammensetzung des geschmolzenen Magmas und stehen nur mit der kritischen Erstarrungstemperatur im Einklange. Und im Gegensatze zu den später erscheinenden Hüllen, haben sie von jenem Mischungskomponenten einen Überschuss, dessen Auftreten die Hebung der Schmelzkurve bedingt. Die Feldspatsubstanz der sich auf den Kern ansetzenden Zonen kann aus molekularstrukturellen Ursachen dem gleichmässigen Sinken der Temperatur nicht in einer strengen Parallele folgen, sondern es wird die Ausscheidung, in gewissen — für die Feldspatglieder charakteristischen — weiteren-engeren Temperaturintervallen einer entsprechenden Feldspatart möglich. Die Sache scheint, als ob sie — zwischen gewissen Temperaturgrenzen die Haltestelle eines jeden erscheinenden Gemengtheils wäre. Beim Eintreten des zu ihrer Ausscheidung bereits ungünstigen Temperaturminimums erscheint mit einer stufenförmigen Hinabgleitung, in einer sprungartig scharfen Abgrenzung ein neues Mischglied mit bedeutend niedrigerem Schmelzpunkte, welches also relativ saurer ist. Für jede Feldspatzone ist also ein gewisses Erstarrungstemperaturoptimum charakteristisch, in welchem sie längere Zeit verharren und mit dessen Aufhören ein inscharfer, zonarer Absonderung saureres Feldspatgemenge erscheint.

Die aus TSCHERMAKS Mischungstheorie und aus der Untersuchung der zonaren Plagioklase der Andesite erhaltenen — damit in scheinbarem Widerspruche stehenden Ergebnisse können in den vollkommensten Einklang gebracht

werden. Ab- An-Moleküllenverbindungen können in jedem Verhältnis zustande kommen. Beim Entstehen der zonaren Struktur der Feldspate aber spielt innerhalb der gegebenen magmatischen Zusammensetzung die Temperatur eine ausserordentlich wichtige Rolle, deren stufenweisem Sinken oder sprungartigen Schwankungen die viskosen Silikat-Schmelzen nur in scharf begrenztem, zonaren weiteren Wachsen folgen können.

Dieser Hergang erscheint derart, als ob die Erstarrungstemperaturintervalle der einzelnen Feldspatgemenge ineinander hinübergreifen würden, wenn das Erstarrungsminimum eines Feldspatgliedes mit höherem Schmelzpunkte in breiterem Streifen mit dem Maximum des darauf folgenden sauereren



Figur. 2.

Gliedes zusammenfällt. Und zwischen diesen Temperaturgrenzen wird die Ausscheidung einer homogenen Feldspatmasse in zonarer, scharfer Absonderung möglich (Siehe die Figur 2.).

Die endgültige Lösung des Problems des zonaren Weiterwachsens der Plagioklase — samt jener der ähnlich aufgebauten übrigen gesteinsbildenden Gemengteile — wird mit der Durchführung der notwendigen Laboratoriumsexperimente erbracht werden können.

\* \* \*

Szeged, aus dem petrographischen und geologischen Institute der kön. ung. Franz Josephs-Universität, im Monate Dezember 1926.