

Fortschritte der Geologie und Palaeontologie

herausgegeben

von **Professor Dr. W. Soergel**, Freiburg i. Br.

Band XIII Heft 42

Bausteine zu einem System der Tektonogenese

von

Franz Ed. Suess

- I. Periplutonische und orogene Regionalmeta-
morphose in ihrer tektonogenetischen Bedeutung

Mit 7 Figuren im Text

Berlin

Verlag von Gebrüder Borntraeger

W 35 Koester Ufer 17

1937

Fortschritte der Geologie und Palaeontologie

Die **Fortschritte der Geologie und Palaeontologie** bilden eine Sammelstätte für Arbeiten aus allen Gebieten der Geologie und Palaeontologie, in denen nicht die einfache Darstellung neuer Beobachtungstatsachen und die nächsten aus ihnen ableitbaren Schlußfolgerungen, sondern die Entwicklung neuer Methoden, die Lösung wesentlicher Probleme im Vordergrund stehen. Eine Schilderung neuer Tatbestände ist an sich dabei durchaus erwünscht, sie soll aber eingegliedert sein in den Rahmen einer geschlossenen Argumentation. Einfache Sammelreferate bleiben ausgeschlossen. Doch sind Arbeiten willkommen, die an der Hand kritisch gesichteter und von neuen Gesichtspunkten aus beleuchteter, bekannter Tatsachen zu neuen Lösungen führen.

Innerhalb der Geologie sollen in die Sammlung auch Arbeiten einbezogen werden, die in Grenzgebieten, in der Geophysik, in der Petrographie wurzeln, sofern sie unter Zuhilfenahme geologischer Forschungsergebnisse oder überhaupt geologischer Methoden zu wichtigen allgemeinen Ergebnissen gelangen. Gerade aus den Grenzgebieten erfahren die Einzelwissenschaften erfahrungsgemäß die stärkste Befruchtung.

Aus dem Gebiet der Palaeontologie (Palaeozoologie, Palaeobotanik) sind neben Arbeiten, die sich auf breiterer Basis mit Problemen der Phylogenie, des Entwicklungsmechanismus, der Systematik, der Palaeobiologie beschäftigen, auch solche erwünscht, die an einem oder an einzelnen Beispielen neue Methoden erläutern und prinzipielle Ergebnisse ableiten.

Geologie und Palaeontologie bilden die Grundlage der ihnen durch engste wechselseitige Beziehungen verbundenen Palaeogeographie. Aus dem umfassenden Bereich dieser Wissenschaft werden sowohl regionalen als einzelnen grundsätzlichen Problemen gewidmete Darstellungen in den Fortschritten Aufnahme finden.

Willkommen sind schließlich auch Abhandlungen, die eine Klärung der Begriffe anstreben, die Fragestellungen auf ihre Möglichkeit oder Berechtigung kontrollieren, die versuchen erkenntnistheoretisch die Grenzen der üblichen Methoden und ihre Mängel aufzuzeigen. Denn die weitere Entwicklung einer Wissenschaft und der von ihr geförderten Erkenntnisse hängt nicht nur ab von einer ständigen Bereicherung des Beobachtungsmaterials und seiner Durcharbeitung, sondern in vielfach stark unterschätztem Grade auch von einer stetigen kritischen Überprüfung der Grundlagen, auf denen eine Wissenschaft aufbaut, der Theorien, nach denen sie arbeitet, die Arbeitsmethode und Fragestellung, ja selbst die Beobachtungen nach Art und Auswahl entscheidend beeinflussen.

Die auf der 3. und 4. Umschlagseite angegebenen Preise sind Einzelpreise. Bei Abnahme eines ganzen Bandes oder von 4 verschiedenen Heften ermäßigen sich die Einzelpreise um 25 %.

Alle Zuschriften und Sendungen werden an den Herausgeber erbeten.

Die Verlagsbuchhandlung:

Gebrüder Borntraeger
Berlin W 35, Koester Ufer 17

Der Herausgeber:

Professor Dr. W. Soergel
Geologisches Institut, Freiburg i. Br.

Fortschritte der Geologie und Palaeontologie

herausgegeben

von **Professor Dr. W. Soergel**, Freiburg i. Br.

Band XIII Heft 42

Bausteine zu einem System der Tektogenese

von

Franz Ed. Suess

I. Periplutonische und enorogene Regionalmeta-
morphose in ihrer tektogenetischen Bedeutung

Mit 7 Figuren im Text

Berlin

Verlag von Gebrüder Borntraeger

W 35 Koester Ufer 17

1937

**Alle Rechte,
insbesondere das Recht der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten
Copyright 1937, by Gebrüder Borntraeger in Berlin**

Druck von E. Buchbinder (H. Duake) G. m. b. H., Neuruppin

Printed in Germany

Zur Einführung

Es wird nicht notwendig sein, hier besonders auszuführen, wie ungleich die Anzeichen der verschiedenartigen Vorgänge, die im Laufe der Zeiten das Antlitz der Erde gewandelt und geformt haben, über verschiedene Erdräume verteilt sind, und wie sie damit auch zu verschiedener Betrachtungsweise und zu verschiedenem Denkverfahren anregen. Gar leicht veranlaßt die durch den Lebensumfang den Einzelnen erzwungene Einschränkung des Tätigkeitsgebietes zur Verallgemeinerung des von ihm Wahrgenommenen und zur einseitigen Beurteilung der Gesamtvorgänge in der Erdgeschichte. Aber es ist vor allem die Aufgabe des akademischen Lehrers seinen Schülern das von ihnen erwählte Fach innerhalb der Grenzen des Erfassbaren auf möglichst breiter Grundlage und möglichst gleichmäßig in allen Sonderzweigen darzulegen; dabei soll er ihnen den Weg offen halten zur Aufnahme der oft weit auseinandergehenden Meinungen und zur Bekanntschaft mit vielerlei Gesichtspunkten, nach denen der Tatbestand von verschiedenen Forschern gedeutet wird, damit sie mit selbständigem und beweglichem Urteile den Fragen begegnen können, die von der Natur in unerschöpflicher Vielgestalt dargeboten werden. Mit dieser Aufgabe verbindet sich die prüfende Durchdringung eines umfangreichen und vielersplitterten Schrifttumes. Aus dem Streben nach einem Ausgleiche zwischen den einander widersprechenden Meinungen erstet ein neues, in sich geschlossenes Bild. Was ich in den folgenden Aufsätzen vorlege, ist das Erträgnis eines vieljährigen akademischen Wirkens. Die Erfahrungen aus allen in Betracht kommenden Wissenszweigen sollen sich darin möglichst widerspruchslos zusammenfinden; Kleinstes und Einmaliges soll darin ebenso unterzubringen sein, wie die den Gesamtplan der Erde umfassende Übersicht.

Die Großsynthesen, deren Ergebnisse als Grundlehren über das Großgeschehen der Erde den geologischen Anschauungskreis der Gegenwart vorwiegend beherrschen, haben ihr aufbauendes Gedankengut, wie man wohl sagen darf, im wesentlichen einigen bevor-

zugten Sonderzweigen der Wissenschaft entnommen und verwerten davon oft nur das Allgemeinste in den größten Umrissen. Aber schon der Zusatz eines einzelnen bisher nicht vertreteten Wirkungsstoffes kann in der Gedankenwerkstätte einen Niederschlag ganz anderer Art ergeben, und in der Geologie steht kein, anscheinend noch so vereinzelter, Vorgang völlig außer Bezug zum Gesamtgeschehen.

In früheren und auch in den noch herrschenden Theorien der Tektogenese findet man das metamorphe Grundgebirge ungebührlich vernachlässigt. Es verlangt die eingehendste Berücksichtigung, nicht nur wegen seiner über etwa ein Fünftel alles Festlandes ausgedehnten Verbreitung, sondern vor allem als Anzeiger der Vorgänge der Tiefen, als das ursprünglich Bewegte und als der eigentliche Träger der an der Oberfläche auffälliger hervortretenden Bewegungen, wie sie von der über dem tieferem Schollenschube gleitenden Hülle des Deckgebirges übernommen werden; das gilt auch dort, wo das Deckgebirge zu den auffälligsten Gestaltungen der Erdoberfläche, zu den Faltegebirgen zusammengerafft ist, so daß sie als die eigentliche Grundform aller Bewegungen der Erdhaut angesehen worden sind.

Das tiefere Grundgebirge liefert außerdem die Anzeichen über die Zustände unter der äußeren Erdhaut; ein hier wahrnehmbares lebhafteres Stoffgedränge scheint in seinem Werdegange losgelöst und außer Bezug zu den die äußere Erdgestalt schaffenden Vorgängen.

In der neueren Zeit sucht die so gewaltig fortschreitende Durchforschung des Grundgebirges immer engeren Anschluß an die allgemeineren Theorien der Tektogenese. Auf manches, von dem Vielem und Vortrefflichem, das hierüber insbesondere in Skandinavien, in Grönland und in Nordamerika geleistet worden ist, wird in den nachfolgenden Aufsätzen bei verschiedener Gelegenheit zurückzukommen sein. Noch bewegen sich im allgemeinen die Gedankengänge in diesen Arbeiten in den Bahnen der herrschenden Theorien der Tektogenese und suchen die wesentlichen Grundlagen dieser Theorien nach der Tiefe hin auszubauen und zu ergänzen. Mir aber scheint es, daß gerade durch das Grundgebirge die Wege aus den gewohnteren Gedankenkreisen hinüberleiten zu offeneren Ausblicken, von wo aus Orogenese, Geosynklinalen und Tiefen als voneinander gelöst erscheinen.

In dem Mineralbestande und in dem Gefüge der metamorphen Gesteine ist das Ineinandergreifen der als Wärme aus der Tiefe strahlenden und der als Umformung in der Oberflächennähe wirk-

samen Energien abgebildet. Damit gewinnen die petrographischen Einzelstudien und eine daraus erstehende, geklärte und gefestigte Theorie der Metamorphose überragende Bedeutung, nicht nur für die Auffassung tektonischer Vorgänge in Einzelfällen, sondern auch für die Theorie der Tektogenese in ihrem weitestem Umfange.

Zunächst sollen durch einige vorausgenommene Sätze die allgemeinen Umrisse des aufzubauenden Systems angezeigt werden. Das in den einzelnen Aufsätzen Behandelte rückt dann von selbst an die im Gesamtplane ihm zukommende Stelle. Altes und Neues und Wiederauflebendes ist darin enthalten. Durch die ständige Berufung auf das in einzelnen Beispielen Beobachtete verbleibt die Untersuchung auf dem Wege der Induktion, die ja auch zu den Ergebnissen geführt hat.

Von Forschern, denen ich besondere Anregung verdanke und von denen manche wenigstens eine Strecke weit die gleichen Wege gehen, nenne ich vorläufig die folgenden: ARGAND, BAILY, BACKLUND, W. H. BUCHER, CORNELIUS, DALY, W. M. GOLDSCHMIDT, HARKER, SCHEUMANN, WEGMANN.

Viele andere werden später noch zu nennen sein.

Manches und Wesentliches aus den nachfolgenden Leitsätzen habe ich schon bei anderen Gelegenheiten ausgesprochen¹⁾. Hier wird es im geschlossenen Zusammenhange wiederholt.

Die am stärksten auf der Erdoberfläche hervortretenden Zonen, die sog. Orogengürtel, sind nicht aus Geosynklinalen hervorgegangen und sind keine von Alters festgelegten Schwächezonen; sie sind auch keine Zonen eigener Kraft und auch nicht zweiseitig symmetrisch gebaut, und das Bild der einseitigen Anlage, wie es E. SUESS vor langer Zeit entworfen hat, wird durch neu erkannte Züge noch klarer ausgedrückt und ergänzt. Zu der Unterscheidung des voll überwältigten Vorlandes von dem innerhalb des gleichen Gebirgskörpers zumeist nachträglich rückgefalteten Rücklandes kommt die in der Verteilung der Metamorphose im Gebirge, ausgedrückte Dreiteilung der Orogene in die lastende, die belastete und die unbelastete Zone. Was als sedimentärer Trog oder „Geosynklinale“ als Uranlage der Orogene betrachtet wird, ist — wenn vorhanden — als eine wandernde Vortiefe zu deuten, die erst durch die Gebirgsbewegung selbst geschaffen worden ist.

¹⁾ S. den Schriftennachweis.

Am vollkommensten sind die Eigenschaften des Orogens in den „Kontinentalrandgebirgen“ ausgeprägt. Wo sie an ein fremdes Vorland angeschlossen sind, weisen Paläographie und Tektonik auf ein Wandern über große Entfernungen. Als solche Kontinentalrandgebirge aus älterer Zeit, an denen zwei Großschollen miteinander verschweißt worden sind, haben die Kaledoniden und die Varisziden, und mit diesen auch die Appalachen südlich von New York zu gelten. Die Abwanderung der Kruste nach verschiedenen Richtungen enthüllt sich in dem tieferen Grundgebirge.

Nicht durchgreifende Starrheit der Kontinentalschollen, sondern die Verteilung ungleichartiger Widerstände ist es, die im wesentlichen die Gegensätze und das Herausheben von Faltenzonen bewirkt. Verhältnismäßig geringe Ungleichförmigkeiten vermögen in den gleitenden Kontinentalschollen, in den z. T. sehr mächtigen Kontinentalinnengebirgen und in weithin ausstrahlenden Kluftsystemen ein großzügiges Bewegungsbild hervorzubringen, wie es in dem Bau von Asien nach der Darstellung von ARGAND dargeboten wird.

Die Erscheinungen, die als orogenetische und epirogenetische Phasen, als Diastrophismen und als Zeiten der Evolutionen und Revolutionen gedeutet werden, entsprechen wohl im Grunde erdumfassenden unrythmischen Vorgängen. Sie werden aber nicht durch einen von innen heraus wirkenden Antrieb und Spannungswechsel veranlaßt. Es läßt sich nachweisen, daß sich Verschiebungen der Wasserhülle darin widerspiegeln. Sie sind wahrscheinlich hervorgerufen durch das ungleichmäßige Wandern der Kontinentalschollen in Verbindung mit dem Wandern der Pole. Im letzten Grund beruhen sie wahrscheinlich auf kosmischen oder planetarischen Einwirkungen.

Auch das tieftektonische Strukturbild im metamorphen Bereiche fügt sich im einzelnen, wie in der größten und allgemeinsten Anlage, den von WEGENER vertretenen Vorstellungen. Mit der Umdeutung des metamorphen Gefüges verschwindet nicht nur die aktive Rolle des Magmas, es scheiden auch die sog. syntektonischen Intrusionen aus den Orogenen. Die Schiefer und Gneise, die als bei der Faltung mitgeführtes und fluidal erstarrtes Magma gedeutet worden sind, werden nun als im erstarrten Zustande mitgeführte, synkinematisch verformte und umgewandelte Gesteinskörper erkannt. Das gilt ebenso für die höheren wie für die tieferen metamorphen Bereiche, ebenso für die Epi-, wie für die Meso- und Katazone.

Die Magmen sammeln sich nicht in der Tiefe der „Geosynklinalen“ oder Orogene. Sie werden zum Auftriebe oder Durchbruche in der

Nähe des Randes der treibenden oder lastenden Scholle veranlaßt. Die subkrustalle Herkunft solcher den Orogenen nahe angeschlossener, aber nicht in der Achse des Orogens aufsteigender Magmen wird durch ihren syntektisch-pazifischen Chemismus angezeigt.

In der die Unterkruste zunächst unterlagernden Fläche wird man Intrusionstektonik anzunehmen haben. Sie ist zugleich das Gebiet der „periplutonischen Regionalmetamorphose“, die in dem ersten der nachfolgenden Aufsätze der „enrogenen Regionalmetamorphose“ gegenübergestellt wird. Eine dritte Art der Metamorphose, die vielfältigste von allen, entsteht durch mancherlei Bewegungen und Verformungen im Inneren der kristallinischen Schollen. Sie wird vorläufig als „hypokinematische Regionalmetamorphose“ unterschieden.

Ein wesentlicher Bestandteil dieses großtektogenetischen Entwurfes ist die Annahme, daß aus fluidal-magmatischer Erstarrung entstandene kristalline Schiefer und ebenso Stoffzufuhr magmatischer Herkunft in solchen Schiefnern nur eine geringe Rolle spielen und daß jede Metamorphose durch Diffusion der Stoffe im festem Gestein, zumeist während einer Durchbewegung oder daran unmittelbar anschließend vor sich geht. Kata- und Mesometamorphose gehört stets in die Unterlage und in eine gewisse Tiefe Epimetamorphose in die größere Nähe der Oberfläche; sie bilden aber keine regelrechte Stufenfolge und sind nicht notwendig miteinander verbunden. Als Auswirkungen verschiedener tektogenetischer Vorgänge können sie regional geschieden und unabhängig voneinander auftreten.

Mit den hierher gehörigen Vorgängen im Untergrunde befaßt sich der erste der nachfolgenden Aufsätze. Der zweite zeigt an dem Beispiele von Mitteleuropa, daß regional petrographische und paläogeographische Beziehungen im Unterbau nur durch die Annahme von großen Schollenverschiebungen in älterer Zeit verständlich werden. Erwägungen über die hypokinematische Metamorphose werden damit verbunden. Im dritten Aufsätze erläutert ein Vergleich zwischen den Kaledoniden, Varisziden und Alpen die durch örtliche Umstände gegebenen Besonderheiten jedes einzelnen dieser Orogenese innerhalb des ihnen gemeinsamen Grundplanes; dabei zeigt sich was sie als Kontinentalrandgebirge gekennzeichnet und wie sie mit den Ästen jenseits des Ozeans, in Grönland und in Nordamerika, zu verbinden sind. Dann wird versucht die Frage nach den Beziehungen zwischen Magma und Tektonik mit Hilfe verschiedenartiger Belege klarzustellen. Den

letzten Aufsätzen ist die möglichst beziehungsreiche Erörterung der jüngeren Gebirgsbauten, ihres Zusammenschlusses zu den Bewegungsbildern der Kontinente und dem des Gesamtplanes der Erde vorbehalten.

Dem Aufbau der Theorien kann nur das greifbar Wahrgenommene zur verlässlichen Grundlage dienen. Die daneben hergehende mathematisch-physikalische Theorienbildung kann den Tatbestand nicht beeinflussen, sie hat sich ihm anzupassen und vermag nur das Verständnis der erschauten Vorgänge zu vervollständigen und zu vertiefen.

Den Auseinandersetzungen mit anderen Lehren und Ansichten wird ein gewisser Raum zu gewähren sein. Eine Untersuchung, woran es gelegen sein mag, und durch welcherlei Mängel in den jeweiligen Voraussetzungen es vielleicht verständlich wird, daß über einen großen Gegenstand so entgegengesetzte Meinungen entstehen und Verbreitung gewinnen können, wird fördernd, ja man kann fast sagen, notwendig sein für die Festigung des Urteils und für das unbeschwerte Gedeihen der Wissenschaft. Andererseits hoffe ich, daß der zu erwartende Widerspruch gegen die Umstellung des von den meisten als gesichert Anerkannten auch offen ausgesprochen wird, damit ein klärender Meinungs-austausch eingeleitet werden kann.

I. Periplutonische und enorogene Regionalmetamorphose in ihrer tektogenetischen Bedeutung

Inhalt

	Seite
I. Allgemeine Grundsätze zur Regionalmetamorphose und Tektonogenese	3
Periplutonische und enorogene Regionalmetamorphose	3
Faziesbestimmend: Diffusion bei verschiedenem Grade der Erwärmung . .	6
Diffusion als selbständiger Vorgang in den verschiedenen Stufen der Metamorphose.	6
Keine syntektonischen Intrusionen und keine „geosynklinale“ Metamorphose	8
Nebeneinander der Arten der Regionalmetamorphose, ihre Zuordnung zu den regionaltektogenetischen Vorgängen	9
Schema der dynamischen Dreigliederung und der Magmenverteilung im Orogen	10
II. Posttektonische Kristallisation durch Diffusion im Gestein und nicht durch magmatische Zufuhr oder synkinematische Erstarrung	12
In verschiedenen Umwandlungsstufen	12
Alpine Beispiele:	
Mobilisation der Alkalien	15
Pegmatite im Tiroliden Grundgebirge	16
Albitisation:	
In den Alpen.	17
In den schottischen Kaledoniden	18
Als selbständiger Vorgang.	19
Gefüllte Feldspäte	19
Porphyroblasten der Tonerdemineralien und von Biotit	22
Weiteres zur Frage der Abscheidung der Quarz-Feldspatadern	25
III. Besondere Beispiele aus dem Katabereiche. Granulite	27
Pyropserpentine und Eklogite	31
Mobilisation an Paraschiefern des Katabereiches, Katamylonite	34
Beziehungen zur Intrusionstektonik, erste Kristallisation und „granitische“ Phase	35
IV. Migmatite und Intrusionstektonik	40
Die Grenze von Ober- und Unterbau als Grundlage der tektogenetischen Hypothesen.	40
Fortschritte der Geologie u. Palaeontologie. Heft 42 (Suess)	
	1

	Seite
V. Periplutonische und enorogene Regionalmetamorphose in ihrer tektonogenetischen Abhängigkeit.	43
Neukristallisation und Umwandlungsstufe unabhängig vom bestehenden Gefüge	43
Zweierlei Erwärmungsvorgänge und zweierlei Regionalmetamorphose.	44
VI. Bildungsbedingungen der enorogenen Regionalmetamorphose	45
Unter der Deckenlast mit Deformation und nicht durch Versenkung in die „Geosynklinale“	45
Einordnung in den Deckenbau	45
Die Erwärmung überdauert die Durchbewegung, daher posttektonische Kristallisation	47
Reste protogener Katastrukturen im alpinem Grundgebirge	49
VII. Bildungsbereich der periplutonischen Regionalmetamorphose	53
Allgemeine Merkmale, Verband mit der Intrusionstektonik	53
Außerorogenetische Richtungen der Intrusionstektonik	54
Periplutonische Regionalmetamorphose nicht gleichbedeutend mit abyssischer Metamorphose.	55
VIII. Magma und Orogenese	57
Verschiedene Stellung der Gneisgewölbe, keine „geosynklinale“ Lakkolithe .	57
Pazifisches Magma unter der erzeugenden Scholle, Kammvulkane der jungen Kettengebirge, Syntektisches Magma durch Stoffaustausch in der Infrakruste	60
Postorogene Alkalimagmen als Differentiate aus dem Urmagma	62
Ähnliche Schlußfolgerungen abgeleitet aus einer anderen Gruppe von Beobachtungen. Großer Kreislauf der Stoffe	65
IX. Strukturen im ältesten Grundgebirge und ihr Bezug zu den Fragen der Aktualität	71
Beispiel aus Südafrika	71
Keine universelle Faltung im Präkambrium	74
X. In den beiden Arten der Regionalmetamorphose wirken gesondert die irdischen und die außerirdischen Umgestaltungs-kräfte der Erdkruste.	76
Schriftennachweis	82

Der hier folgende erste Beitrag zu dem Entwurfe eines Systems der gesamten Tektogenese nimmt den Ausgang von den metamorphen Gesteinen in ihren regional tektonischen Beziehungen. Worauf hier vor allem das Augenmerk gerichtet wird, sind nicht die viel besprochenen Umprägungen der Gesteine als Wirkung von örtlich wechselnden physikalischen Zuständen, sondern ihre in Gebieten mit bestimmtem tektonischem Gepräge herrschenden Eigentümlichkeiten, durch die ihnen eine Rolle als Abbild und Zeugnis einer regional zu unterscheidenden, ungleichartigen tektonischen Inanspruchnahme von größeren Teilen der Erdkruste zukommt.

In einem ersten Abschnitte dieses ersten Aufsatzes werden in kurzem Umriss einige der Hauptgedanken vorausgenommen. Die

nachfolgenden Abschnitte erläutern das Wesentliche über die Einzelheiten und die Überlegungen, aus denen diese Gedanken gewonnen worden sind. Bestimmte Anschauungen über die Wechselwirkung zwischen Metamorphose und Tektonik und über die dabei dem Magma und dem Wandern der Stoffe zufallende Rolle werden vorerst noch berichtigt, z. T. mit Berufung auf die in neuerer Zeit insbesondere durch BACKLUND, CORNELIUS, DRESCHER, KIESLINGER, KRANCK, ESKOLA, NIGGLI, SCHEUMANN, WEGMANN u. a. angebahnte Klärung bestimmter Begriffe. Erst die Bezugnahme auf den besser verstandenen Bau der Orogene und auf die Verteilung der Magmen im großen führt zu den bedeutungsvolleren Ergebnissen.

I. Allgemeine Grundsätze zur Regionalmetamorphose und Tektogenese

Periplutonische und enorogene Regionalmetamorphose

Nach den zweierlei Grundvorgängen, denen die Umprägungen der Gesteine zu kristallinen Schiefen zugeordnet erscheinen, die Erwärmung und die Bewegung, hat man zweierlei Arten der Metamorphose, die thermische und die kinetische (SEDERHOLM) unterschieden. Was hier in den Begriffen einer „periplutonischen“ und einer „enorogenen“ Regionalmetamorphose hervorgehoben wird, ist in einem gewissen weiteren Sinne dieser älteren Unterscheidung zugeordnet; hier ist aber vor allem das Hauptgewicht auf das Wort regional zu legen. Es soll damit ausgedrückt werden, daß zweierlei Grundtypen der Metamorphose in ihrer regionalen Verbreitung in einem Abhängigkeitsverhältnisse zu bestimmten tektonischen Grundvorgängen stehen.

Um den Anteil der zweierlei physikalischen Vorgänge, der Erwärmung und der Bewegung, an dem Zustandekommen der kristallinen Fazies eines metamorphen Gesteins hervorzuheben, dient unverändert die erwähnte ältere Unterscheidung; wobei allerdings besser der Ausdruck „deformative“ für kinetische oder kinematische Metamorphose zu gebrauchen sein wird; denn es gilt sowohl für das Handstück wie für größere zusammenhängende Gesteinsmassen im Gebirge, daß die metamorphe Fazies nicht durch die Bewegung und nicht durch das Wandern an sich bewirkt wird, sondern durch die gewaltsame Umformung der Gesteine im Gefolge örtlicher oder regionaler tektonischer Vorgänge. Andererseits ist wahrzunehmen, daß jede Art der Metamorphose auch eine Erwärmung

der Gesteinsmasse voraussetzt, und daher im strengsten Sinne auch als eine thermale aufzufassen wäre. Außerdem zeigt sich auch thermische Metamorphose wohl stets verbunden mit einer geringeren oder stärkeren Durchbewegung. Die Begriffe periplutonische und enorogene Regionalmetamorphose beinhalten überragende Summenwirkungen in mächtigen Gebirgsmassen und in großen Verhältnissen, unbeschadet zahlreicher örtlicher Abwandlungen, die darin enthalten sein können, und örtlicher oder allgemeiner Veränderungen, die vielleicht nachträglich dazugekommen sind.

Ich durfte wohl erwarten, daß das, was die beiden hier gegen-
einandergestellten Begriffe ausdrücken wollen, von nicht wenigen
Fachgenossen schon in ähnlichem Sinne gedacht worden ist. Während der Abfassung des Manuskriptes finde ich bei KRANCK (1935, S. 42) den Ausdruck „Plutometamorphismus“ in gelegentlicher Verwendung, um die Verbindung von Regional- und Kontaktmetamorphose in tiefen Lagen zu bezeichnen. Der Ausdruck periplutonische Regionalmetamorphose will außerdem noch besagen, daß die kennzeichnende Katametamorphose weit abrücken kann von den Umrissen einzelner Batholithen und daß sie außerhalb der orogenetischen Zonen regional die größeren Flächen einnimmt. Deshalb wird er für diese Darlegungen beibehalten.

Auch wenn man die Begriffe der thermischen und der deformativen Metamorphose rein physikalisch betrachtet und losgelöst von irgendwelchen regional-tektonischen Beziehungen, wie sie in der großzügigen Zuordnung zu der periplutonischen und der enorogenen Regionalmetamorphose enthalten sind, so verbleibt ihnen doch ein anderer Sinn und ein anderer Umfang als den Begriffen, die man früher als statische (JUDD) oder Belastungsmetamorphose (MILCH) und als dynamische (LOSSEN, ROSENBUSCH) Metamorphose einander gegenübergestellt hat. Zur ersten von diesen zählte man alle holokristallinen Schiefer ohne Anzeichen einer Kataklase und insbesondere die blastokinetisch in der Mesostufe, also — nach gegenwärtiger Auffassung — durch Streß gebildeten Gneise.

Auch die Bezeichnungen Epi-, Meso- und Katametamorphose nehmen Bezug auf dieses Verhältnis. Als regelrecht übereinander geordnete Stufenfolge können sie schon seit längerer Zeit nicht mehr gelten. Dagegen werden sie zweierlei nach ihrer Dynamik und nicht nach ihrer Tiefenlage unterschiedenen tektonischen Grundvorgängen zugeordnet.

Was als enorogene Regionalmetamorphose unterschieden wird, ist in der vollkommenen Ausbildung an die belastete Zone oder die Zone des metamorphen Falten- und Deckenbaues in der dynamischen Dreiheit der Orogene regional gebunden. Wie anderwärts dargelegt worden ist (1931, 1934), wird diese Zone selbst, von der lastenden Zone oder der erzeugenden Scholle überschoben und hat die unbelastete Zone oder die Zone der nicht metamorphen Falten und Decken vor sich hergestoßen. Die kennzeichnende Metamorphose in der belasteten Zone wird nicht durch das Einsinken der Schichtmassen in die Tiefen einer Geosynklinale bewirkt; das lehren schon die nicht wenigen Beispiele von tausend bis mehreren tausenden Metern angehäuften Schichtmassen, die trotz tiefer Versenkung in einer Saumtiefe keine Metamorphose erlitten haben, sofern sie in der äußeren unbelasteten Zone verblieben sind. Hier sei nur daran erinnert, daß weder die Sedimente im Appalachtrog, deren Mächtigkeit für das Paläozoikum allein von SCHUCHERT mit 38000' angegeben wird, noch die der Rocky Mountains mit einer Mächtigkeit von 45000' nach MANSFIELD, eine nennenswerte Metamorphose erlitten haben.

Allenthalben bezeugen die regional-tektonischen Zusammenhänge, daß für diese Art der regionalen Metamorphose die Umformung durch überfahrende Gesteinsmassen unerlässlich ist; sie erzeugt nicht nur die in jedem Schlicke wahrnehmbaren tektonischen Prägungen des Kleingefüges; die Verdickung der Kruste bewirkt auch zugleich den zur Einleitung der Umkristallisation notwendigen Wärmestau. Niemals — und darauf ist schon wiederholt hingewiesen worden — entsteht Meso- oder Epimetamorphose in Katagesteinen nur durch Aufsteigen in geringere Tiefe und durch Abkühlung allein ohne Durchbewegung.

Für die periplutonische Metamorphose ist im Vergleich zur enorogenen eine größere Ausbreitung anzunehmen, da sie sich vermutlich überall dort einstellt, wo die Suprakruste und ihre magmatische Unterlage einander berühren. Wenn von einer Ubiquität des Grundgebirges gesprochen werden kann, so wird man dabei in erster Linie an die periplutonische oder Katametamorphose zu denken haben, während die enorogene Regionalmetamorphose an bestimmter umgrenzte Bewegungszonen gebunden bleibt. Deformativ Metamorphose im weiteren Sinne braucht nicht immer orogen im eigentlichen Sinne, nicht immer ein Glied eines Faltengebirges zu sein. Auch größere Krustenteile, auch an der Unter-

fläche von gleitenden Kontinentalschollen, können im Sinne einer deformativen Regionalmetamorphose verschiefert werden. Große Teile des tieferen, verschieferten Grundgebirges scheinen aus einer derartig deformativ überarbeiteten regional periplutonischen Uranlage hervorgegangen zu sein. Es ist eine tiefkinematische Regionalmetamorphose, durch die zumeist ein großer Teil der Mesoschiefer rückschreitend aus Katagesteinen geformt worden ist (F. E. SUESS 1925).

Faziesbestimmend: Diffusion bei verschiedenem Grade der Erwärmung

Im letzten Grunde wird die ein Gebiet beherrschende kristallinische Fazies bestimmt durch die Temperatur, bei der unter besonderen Umständen eine Mobilisation wirksam werden und als Diffusion zur Umbildung des Mineralbestandes führen kann. Bei der periplutonischen Regionalmetamorphose erscheint die magmatische Wärmezufuhr als die eigentliche formgebende Kraft; das lehrt ebenso der zur Katastufe gehörige Mineralbestand wie die Struktur der Gesteine, d. i. die spannungslose Abbildungskristallisation (SANDER) und der Verband mit granitischen Plutoniten in den hierher gehörigen Gebieten der Intrusionstektonik. Wenn die Gesteine dabei ausgiebig verlagert worden sind, so ist dies sichtlich nicht durch Schub von außen her geschehen, sondern gleichsam vom innen heraus in unruhiger fließender Bewegung bei gleichzeitiger spannungsloser Umkristallisation, nur in besonders bemerkenswerten Fällen mit parakristalliner Anpassung an gleichzeitige rupturelle Verschiebungen.

Diffusion als selbständiger Vorgang in den verschiedenen Stufen der Metamorphose

Die enorogene Regionalmetamorphose ist, wie erwähnt, gekennzeichnet durch die Mineralgesellschaften der Epi- und Mesostufe, die bei höherer Temperatur nicht bestandfähig ist. Die Eröffnung der Bewegungsbahnen bei der Umformung der Gesteinsmassen und die Gegenwart von Wasser als Lösungsmittel befördert die Mobilisation oder Diffusion der Stoffe nach Art eines Katalysators (SCHEUMANN) und ermöglicht die Kristallisation bei der diesem Mineralbestande zukommenden niedrigeren Temperatur. Aber auch hier erscheint die Diffusion als ein selbständiger

Vorgang neben der rupturellen Deformation. Die Kristallisation des Einzelkristalles und damit auch jede eigentliche Metamorphose kann nur unabhängig von der Ruptur vor sich gehen und kann sich im Strukturbilde nicht anders als posttektonisch darstellen. Eine postkristallinische Deformation, die selbst nicht von Neukristallisation begleitet oder gefolgt wird, kann nicht als Metamorphose gelten. Aber Deformation und Kristallisation greifen ineinander und lösen einander ab, und dadurch entstehen die so überaus mannigfaltigen Bewegungsbilder, mit Kristalloblasten oder häufig rupturell deformierten protogenen Bestandteilen in dem mehr oder weniger geregelten Grundgewebe und vielerlei anderen Gefügemerkmalen, aus denen die Polymetamorphose vieler Gesteine in den Räumen der enrogenen Regionalmetamorphose ersichtlich wird.

Dies wird hier ausdrücklich hervorgehoben, da die so weit verbreitete posttektonische Kristallisation der Alkalimineralien, insbesondere von Muskowit und Albit, auf sehr verschiedene Weise gedeutet worden ist; einerseits wurde sie, und wird noch, auf Stoffzufuhr aus verborgenen magmatischen Herden zurückgeführt, andererseits galt insbesondere der posttektonische Muskowit in vielen Gneisen als ein Beleg für die fluidale Erstarrung syntektonisch in den werdenden Faltenbau eingedrungener Magmen.

Für die Beurteilung dieser Vorgänge ist es wichtig, daß jede der beiden Arten der Diffusion, die den Grundcharakter der hier unterschiedenen Typen der Regionalmetamorphose bestimmen, schon in den allerersten schwachen Ansätzen, mit denen sie ein Gestein zu ergreifen beginnen, ihre volle Eigenart zum Ausdrucke bringen und vollkommen selbständig einander gegenüber stehen, und daß sie dabei auch jedes vorhandene Gestein sedimentärer oder magmatischer Herkunft, tektonitisch oder nicht tektonitisch, nicht metamorph oder metamorph, in jeder Fazies und in jedem Grade einer früheren Metamorphose in der ihr entsprechenden Weise zu ergreifen und allmählich zu überwältigen imstande sind.

Das Heranrücken einer periplutonischen Regionalmetamorphose kann schon früh, in den ersten Stufen durch das Auftauchen von Biotitporphyroblasten im unverformten Gestein angezeigt werden. Andererseits können auch die auffälligsten Merkmale der enrogenen Metamorphose, Deformationsverglimmerung und Albitisierung, als die ersten und einzigen Anzeichen einer Umwandlung in sonst unveränderten sedimentären oder magma-

tischen Gesteinen auftreten oder als letzte Nachläufer sich deutlich abheben von einer vielleicht vom Katazustande herzuleitenden und mehrfach abgewandelten metamorphen Geschichte. Durch die gesteigerte und andauernde Sammelkristallisation kann ein Gestein allmählich und durchgreifend umgebaut werden bis zum völligen Verschwinden des ursprünglichen Mineralbestandes und der ursprünglichen Strukturen. Es geschieht dies, indem nur die Ergebnisse des Vorganges sich häufen, ohne daß er dabei in seinem Wesen einen Wandel erfährt. Unverkennbar geschieht die beginnende Sammelkristallisation und das Wachstum der ersten, locker verstreuten Porphyroblasten im festen Gestein und folgerichtig hat das gleiche auch für den weiter um sich greifenden Vorgang bis zum gänzlichen Umbau des Mineralbestandes zu gelten. Daraus ergibt sich ferner, daß in der Kristallisationsschieferung der betreffenden Gesteine kein erstarrtes Fließgefüge enthalten ist. Solche Überlegungen schließen sich ergänzend an diejenigen, mit denen insbesondere auf die Rolle der verformten Gesteinskörper im Deckenbau Bezug genommen worden ist und die zur eindeutigen Erkenntnis geführt haben, daß Gesteine von der Art der alpinen Zentralgneise, des Bittescher Gneises im Moravikum und der Roten Gneise des Erzgebirges nicht syntektonisch in den Faltenbau eingedrungen, sondern im starren Zustande umgeformt worden sind (F. E. SUESS 1934).

Keine syntektonische Intrusion und keine „geosynklinale“ Metamorphose

Wohl schwindet die Zahl der Anhänger der syntektonischen oder synkinematischen Intrusionen und es lockert sich die Festigkeit ihres Standpunktes mit der zunehmenden Würdigung der Rolle der Sammelkristallisation und der Diffusion bei der Gefügebildung der kristallinen Schiefergesteine und mit der Erkenntnis der Abhängigkeit des scheinbaren Fließgefüges von der Verformung im Deckenschube; aber der folgerichtigen Weiterführung dieser Erkenntnisse stellen sich noch gewisse Gedanken entgegen, die, obwohl sie eigentlich dem überwundenem Vorstellungskreise angehören, doch noch in den weit verbreiteten Theorien der Orogenese als grundlegend festgehalten werden.

Ein erstes, Wesentliches ist, daß mit der aus dem Verständnis der Metamorphose zu schöpfenden Erkenntnis der passiven Um-

formung der Gneisgewölbe im Kerne der belasteten Zone auch die in die Tiefe der angenommenen Geosynklinale eindringenden Magmen wegfallen; und damit auch die durch Granite hervorgerufene geosynklinale Metamorphose, die als reine Wärmewirkung den fertigen Faltenbau durchdringen soll. Ebenso wie die zur Geosynklinale umgedeutete Saumtiefe ist auch die Metamorphose unter der belasteten Zone eine Wirkung des Schollenschubes, der das eigentliche Wesen der Orogenese darstellt.

Nebeneinander der Arten der Regionalmetamorphose, ihre Zuordnung zu den regionaltektogenetischen Vorgängen

Was hier über das Fehlen einer geosynklimalen Metamorphose und den aus der geosynklimalen Tiefe quellenden Intrusionen gesagt worden ist, wird übereinstimmend ergänzt durch die aus der besseren Einsicht in den inneren Bau großer Orogene, wie der Alpen, der Appalachen, der Variziden, der Anden beider Amerika gewonnenen Erkenntnis, daß geosynklinale Einsenkung nicht als Uranlage der Gebirgsbildung vorangeht, wie dies die Theorie von HAUG und die ihr angeschlossenen späteren Theorien voraussetzen, sondern, daß die „Saumtiefe“ erst während und durch den orogenetischen Vorgang, d. i. während der Auffaltung gebildet und mit dem Deckenschube verlagert wird. Die Orogengürtel der Erde sind nicht aus einem von Alters her in der Erdkruste angelegtem Rinnensysteme hervorgegangen. Die großzügig einseitig symmetrische Anlage der großen Orogene, ebenso der Kontinentalrandgebirge wie vieler schräge steigender Schollen im Inneren der Kontinente, kann nur durch einen gestaltenden Bewegungsantrieb der äußeren Oberkruste geschaffen worden sein, der die erzeugende Scholle heranträgt und die Tiefen überwältigt und sich besser mit der Vorstellung der gleitenden Kontinentalschollen oder der Epeirophorese vereinigen läßt, als mit der Annahme einer aus der Tiefe wirkenden Kontraktion des Erdinnern.

Daß enorogene und periplutonische Regionalmetamorphose nicht untereinander zu stellen sind, sondern als Begleiter großzügig voneinander gesonderter Vorgänge in der Erdkruste nebeneinander auftreten, ergibt sich allein schon daraus, daß Gebiete der thermischen Regionalmetamorphose in vielen Teilen der Erde mit nicht deformiertem und nicht metamorphem Oberbau tektogenetisch verbunden sind.

Schema der dynamischen Dreigliederung und Magmenverteilung im Orogen

Der beigegebene Gebirgsdurchschnitt erläutert den Zusammenschluß der aneinanderbewegten Bestandteile des Baues zur geschlossenen dynamischen Einheit, d. i. zum Orogen, durch den Vorschub der Kruste von einer Seite her. Er lehnt sich wohl in den Hauptzügen an die bekannten Querschnitte durch die Alpen; entspricht aber dennoch im ganzen nur einem gedachten Sonderfall. Ungleiche Raumfülle, Vervielfältigung oder auch das Ausscheiden einzelner Bestandteile können das Umrißbild für andere Fälle weitgehend verändern. Aus den vergleichenden Hinweisen ist aber doch zu ersehen, daß der Hauptzug, d. i. die durch das kontinentale Gleiten geschaffene, dreiteilig dynamische Anlage — in eine lastende, belastete und unbelastete Zone — durchgehend erhalten bleibt. Eine entscheidende Rolle für die Beurteilung des Ganzen spielt das Hinzutreten der Magmen der Tiefe und der Oberfläche von einer Seite her und das ursprüngliche Nebeneinander der Gebiete mit deformativer und mit thermischer Regionalmetamorphose.

- K** = Kristallinischer Sockel (Unterbau) des Vorlandes, — entsprechend Fennoskandia für die Kaledoniden, Moldanubikum und Moravikum für die Alpen, Laurentia für die Appalachen u. a.
- R** = Sedimentäre Decke (Oberbau) des Vorlandes.
- R_I** = Ungefaltete Vorlanddecke.
- R_{II}** = Zone des nicht metamorphen Falten- und Deckenbaues (unbelastete Zone), — entsprechend Rheinisches Schiefergebirge und thüringische Zone in den Varisziden, älteres Altpaläozoikum in Wales und SW-England für die Kaledoniden, nicht metamorphes Paläozoikum der sog. appalachischen Geosynklinale.
- M** = Zone des metamorphen Falten- und Deckenbaues (überfahrene Zone), — entsprechend den Penninischen Decken in den Alpen, der Schieferhülle über den Batholithen in den moravischen Fenstern, den Gneisen und kristallinen Schiefen des Erzgebirges, dem Dalradian in den Schottischen Kaledoniden. = Allgemeiner Bereich der enrogenen Regionalmetamorphose.

In dem dargestellten Durchschnitte enthält diese Zone noch:

- G** = Zu Gneisgewölben umgeformte Batholithen im Untergrunde des überfahrenen Vorlandes, — entsprechend den Gneiskuppeln der moravischen Fenster; und in größeren Abmessungen und weniger durchgreifender Umformung: die helvetischen Massive der Westalpen und die Kerngebirge der Karpathen; — mit durchgreifender Vergneisung und Aufnahme in den Deckenbau: Bittescher Gneis, Kepernikgneis und Tessagneise im moravo-silesischem Gebirge, die Decken des roten Gneises im Erzgebirge.

Die Schieferhülle (M) in dem dargestellten Profile entspricht einer älteren überwältigten Vortiefe, der auch hier die mesoverschieberten Granite des älteren pazifischen Magmas angehören, die von der erzeugenden Scholle herkommen und mit dem andauernden Vorschube überwältigt und vergneist worden sind. Ihnen entsprechen die alpinen Zentralgneise (Z) mit ihrer Schieferhülle.

In den Appalachen ist die mit den Sedimenten erfüllte Vortiefe während der verschiedenen Zeiten der Orogenese, der Transgressionen und Regressionen von höheren Decken nicht überfahren worden und daher, trotz ihrer Mächtigkeit, frei von der Metamorphose und in der unbelasteten Zone verblieben.

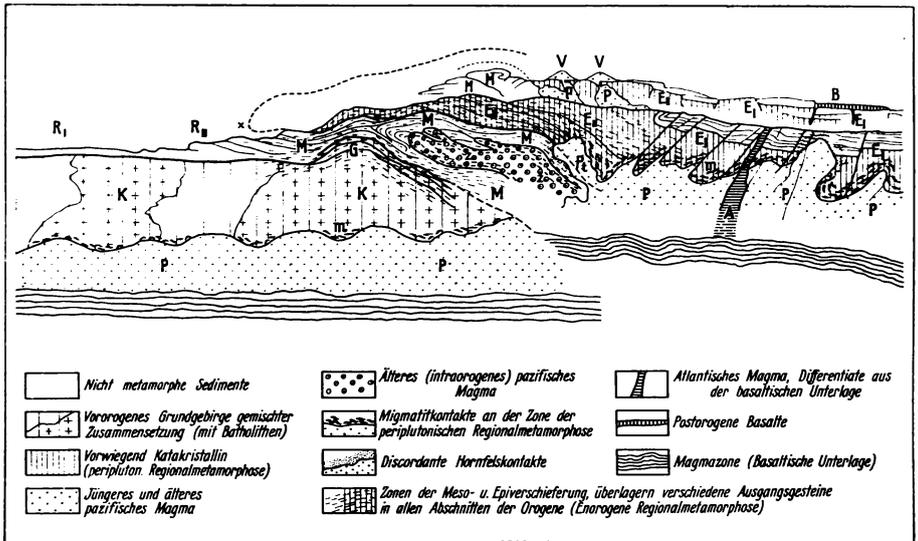


Fig. 1. Schematisches Sammelprofil durch ein Orogen.

E = Lastende Zone, überschobene Zone (erzeugende Scholle), mit kristallinen Grundschollen, kann ausgedehntes ursprüngliches Kristallin des Gebietes der periplutonischen Regionalmetamorphose, mit Intrusionstektonik und Migmatitkontakten in der Tiefe, enthalten (E₁). Große Teile sind oft mit rückschreitender Metamorphose zur Meso- und Epistufe durchbewegt. Entsprechend den moldanubischen Gebieten mit den rheinischen Horsten im Rücken der variszischen Falten, dem Moinian in den Schottischen Kaledoniden (ohne eigentliche Intrusionstektonik), — in teilweise stärker retrograd verarbeiteterem Zustande den Austriden Grundschollen der Ostalpen, der Münchberger Gneismasse, dem Zwischengebirge über dem erzgebirgischen Deckenbau und einem Teil des Kristallins der appalachischen Küstenzone (E₁).

Enthält Para- und Orthogneise und auch Batholithen mannigfaltiger Herkunft.

Hierher gehört auch der hypothetische Untergrund des hochgestauten und zumeist rückgefalteten Rücklandes jüngerer Gebirgsbauten, wie der südalpiner Dinariden, der Brasilianden mit der Puna von Atakama und der Rocky Mountains in ihren größten Erstreckungen.

- × = Einstige Reichweite der erzeugenden Scholle über der verschieferten Zone.
- P = Pazifische Batholithe in der Unterlage der erzeugenden Scholle und den anschließenden Kontinentalgebieten; Migmatite im Tiefenkontakt und diskordantem Hornfelskontakt in den in das nicht metamorphe Deckgebirge aufsteigenden Ausläufern; — entsprechend den moldanubischen Graniten mit örtlichem diskordantem Kontakt am Barrandien und den Graniten des Adamello in den Südalpen am Mesozoikum der Bergamasker Alpen. = Eigentlicher Bereich der periplutonischen Regionalmetamorphose.
- P¹ = Posttektonisch die Wurzelzone querende Vorgriffe, entsprechend den Graniten des Erzgebirges und den Graniten von Bergell an der Tessiner Wurzelzone.
- V = Dazugehörige Kammvulkane mit pazifischem Magma in den jüngeren Bauten nahe am Rande der erzeugenden Scholle, wie die Vulkanreihen der südamerikanischen Anden, die Großkegel der Anden Nordamerikas, die Vulkane der iranischen Ketten, des Sundabogens u. a.
- A = Atlantische Differentiate aus basaltischem Magma an postorogenen Bruchspalten, entsprechend Buffaure, Predazzo, steierische Vulkane.
- B = Postorogene Spaltenergüsse aus undifferenziertem basaltischem Magma, entsprechend patagonische Basalte, Basalte von Oregon.

II. Posttektonische Kristallisation durch Diffusion im Gestein und nicht durch magmatische Zufuhr oder syntektonische Erstarrung

In verschiedenen Umwandlungsstufen

Wie es zu verstehen ist, daß in den meisten metamorphen Gesteinen, und besonders in solchen der Mesostufe, die Umformung von der Kristallisation in einem Teilbestande oder im ganzen überholt erscheint, ist eine Frage von weittragender Bedeutung für das Verständnis der geologischen Vorgänge größten Stiles. Ob und in welchem Umfange die posttektonische Kristallisation, sei es vom Porphyroblasten oder im gesamten Grundgewebe, einen von der Umformung der Zeit nach abzutrennenden oder einen mit ihr ursächlich und zeitlich nahe verbundenen Vorgang darstellt, oder ob sie in Orthogesteinen als Kristallisation in einem aus zähem Flusse erstarrendem Magma aufzufassen ist, darüber sind heute noch recht verschiedene Meinungen zu vernehmen. Hier zeigt sich

besonders klar, wie innig das Verständnis der Großtektonik mit dem der Vorgänge im Kleingefüge verbunden ist. Die jeweilige Folge oder das Ineinandergreifen von Kristallisation und Deformation sind in vielen Studien als die Bildner der kennzeichnendsten Gefügemerkmale hervorgehoben worden. Mit der Bezugnahme auf die tektonische Umgestaltung der ganzen Gebirgskörper erhebt sich die Aufklärung dieser Vorgänge zu einem Kernproblem der Petrotektonik überhaupt.

Die hier anknüpfenden Fragen sind seit mehr als dreißig Jahren so häufig und so ausgiebig durchgesprochen worden, daß es kaum nötig erscheint die Schriftenbelege dafür im besonderen anzuführen. Aus der Fülle der einander durchkreuzenden Sonderfragen soll hier nur einiges Grundsätzliches hervorgehoben werden, um es für die allgemeineren Fragen der Großtektonik zu verwerten. Trotz ihrer Vielgestalt lassen sich die Erscheinungen auf eine verhältnismäßig einfache Grundformel zurückführen.

Die Auswahl einiger naheliegender Beispiele, die der Zufall in Mitteleuropa vereinigt hat, wird bereits zeigen können, wie innig insbesondere die Deutung der idiomorphen Kristallisation im Grundgewebe oder an den Kristalloblasten in verschiedenen Stufen der metamorphen Fazies verknüpft ist mit der Auffassung großtektonischer Vorgänge und damit auch die herrschenden Theorien über die Gestaltungsvorgänge auf der Erde maßgebend beeinflusst.

Im Mesobereiche haftet daran die Vorstellung von dem syntektonischen Einschub des synkinematisch als Gneis, erstarrten Granitmagmas in den werdenden Faltenbau. So galten noch für viele Forscher bis in die jüngste Zeit die Roten Gneise des Erzgebirges und die Zentralgneise der Alpen mit ihrem verschieferten Mantel als unter Druck und bei zähem Flusse erstarrtes Magma. Auch die Auffassung der Trondhjemite Norwegens als synorogenetisch intrusiertes Magma gehört hierher. Im ersteren Falle verbindet sich damit die Vorstellung der geosynklinalen Anlage der Gebirge, in deren Untergrund bei der Orogenese das granitische Magma eingepreßt wird; im zweiten Falle ergibt sich daraus, durch ähnliche Gedankenverbindung ein anderes Bild. Es ist das der großzügigen Faltungsgräben als Grundform der skandinavischen Orogenese nach V. GOLDSCHMIDT (1921).

Im Katabereiche gilt noch für viele Forscher die gebänderte Textur der Granulite in Sachsen und anderwärts als erstarrtes

Fluidialgefüge in einem granitischen Magma, und auf einer verwandten Deutung der Strukturen beruht auch die unter jüngeren Geologen (KÖBL, KÖHLER, WALDMANN) verbreitete Auffassung der Granulitgneise und anderer Orthogneise des Moldanubikums als Mischgneise aus Paragneisen und eingedrungenen granitischem Magma.

Im Mesobereiche ist die Vorstellung der synorogenetischen Intrusionen auch davon abhängig, ob die verschieferten Kontaktmäntel der Gneise nach den Gefügestudien als piëzokristallin erstarrt im Sinne von WEINSCHENK erkannt werden können. Ferner hängt an diesen Studien auch die Frage, ob das in kristallinen Schiefen so häufige feldspätige Geäder, oder die allgemeine Durchtränkung solcher Gesteine mit Muskowit oder Albit oder mit anderen Feldspäten, oder die Bildung von mancherlei sonstigen Porphyroblasten im Meso- und Epibereiche notwendig von verborgenen, spätrogenen und nachorogenen, tiefmagmatischen Nachschüben abzuleiten sind. Ob überhaupt die regionale Metamorphose, auf eine durchaus posttektonische Durchwärmung in der Tiefe der Geosynklinale zurückzuführen ist; ob sie, wie TERMIER meinte, so „wie ein Ölfleck“ nach allen Seiten gleichmäßig fortschreitend den fertigen Gebirgsbau durchdrungen hat. Aus der mechanisch unverletzten Kristallisation in hochgradig gestörten Schichten wollte er erkennen, daß es eine Dynamometamorphose überhaupt nicht gäbe¹⁾.

Bei ihrem Auftauchen bereits ist solchen Vorstellungen widersprochen worden (BECKE 1911, S. 245; F. E. SUESS 1909).

¹⁾ Als ein Beispiel dafür, wie derartige Vorstellungen immer wieder aufleben, kann hier die von BEDERKE (1935 a, b) kürzlich über das Kristallin des Altvatergebirges geäußerte Auffassung hervorgehoben werden.

Den Untergrund des silesischen Baues im Altvatergebirge bildet das Gewölbe des Kepernikgneises, der nach seiner Beschaffenheit und seiner tektonischen Stellung wiederholt mit den Zentralgneisen der Tauern verglichen worden ist. So wie dieser wird er von einer Schieferhülle von Glimmerschiefer mit Granat, Staurolith und Andalusit übermantelt. Prof. BEDERKE anerkennt nun auch (1935 b) die vortektonische Intrusion und syntektonische Metamorphose des Kepernikgneises, die auch schon aus allgemeinen Gründen zu erschließen und auch schon in der Gleichstellung seiner Gesteine mit dem zur Decke verwalztem Bittschischen Gneis (F. E. SUESS 1912) in den moravischen Fenstern im Süden enthalten war. Aber die idiomorphen Porphyroblasten von Biotit, Muskowit, Granat, Staurolith und Disthen im verfalteten Grundgewebe und seine örtliche Durchdringung mit basischem Plagioklas enthalten für ihn den Beleg für eine nachtektonische Stoffzufuhr aus einer in Tiefe verborgenen Intrusivmasse.

Für die Beurteilung der Erscheinungen ist in erster Linie die Beobachtung im Felde in enger Verbindung mit der im Mikroskope Richtung gebend. Ihr Auftreten in Gesteinskörpern von bestimmter Gestalt und Lage ist bereits imstande verlässliche und unzweideutige Auskunft zu geben über die Rolle der posttektonischen Kristallisation im Anschlusse an die gebirgsbildenden Vorgänge. Der Theorie kann in diesem Falle nur die Aufgabe zufallen, die Vorgänge chemisch und physikalisch zu erläutern.

Zum ersten, in das Gebiet der Beobachtung, gehört in diesem Falle vornehmlich das Studium der Porphyroblasten und der Gesteinsgefüge überhaupt in bezug auf ihre Einordnung in den Gebirgsbau. Zum zweiten, zur Theorie, gehört die Frage nach der Ursache der Temperaturerhöhung und der inneren Mobilisation, durch die eine posttektonische Kristalloblastese und die Bildung der Kristalloblasten bewirkt werden kann.

Alpine Beispiele (Mobilisation der Alkalien)

In vielen Gebirgen sind Gesteinskörper mit posttektonischer Mesometamorphose, die häufig als die verbreitete Form der eigentlichen Regionalmetamorphose angesehen wird, derart in den Gebirgsbau eingeordnet, daß eine Zufuhr von Stoffen aus der Tiefe oder eine Erstarrung der Massen aus zähem Flusse nicht angenommen werden kann. In den Alpen sind die Belege dafür nicht in den Zentralgneisen zu suchen, die, wie BECKE einmal bemerkt hat (1911), „die Alpenfaltung wesentlich unter Kristalloblastese mitgemacht haben“ und damit zu „stetigen Tektoniten“ (SANDER) geworden sind, sondern in dem älteren Kristallin, das durch die alpine Bewegung in den mannigfachsten Abwandlungen polymetamorph umgewandelt worden ist.

In der ganzen Erstreckung von Graubünden bis zur steierischen Ebene herrscht fast durchaus Deformationsverglimmerung als Wirkung der alpinen Verformung in den dazu geeigneten Gesteinen.

Daß die Unterscheidung von prä- und posttektonischer Kristallisation im Gefüge für die großtektonischen Beziehungen nur bedingten Wert beanspruchen kann, ergibt sich auch schon aus dem ungleichen Verhalten verschiedener Bestandteile, von denen einige, etwa die Turmaline, bei der Umformung zerbrochen worden sind, während andere, etwa die Glimmer oder die Hornblendes, ihr durch

Umkristallisation nachfolgen konnten. Nicht selten findet man Anzeichen dafür, daß die Kristallisation in benachbarten Lagen ungleich häufig unterbrochen und erneuert worden ist.

Nach den Angaben fast aller Beobachter ist in dem Kristallin der Tiroliden Decken Polymetamorphose sehr verbreitet. Wie man den Ausführungen von KIESLINGER (1927) entnehmen kann, besteht eine bis in die Zonen des sog. Hochkristallin im Süden ausgedehnte Hauptphase in einer mehr oder weniger durchgreifenden Abbildungskristallisation der Mesostufe. Mit den Gefügeeigenschaften solcher Gesteine wird zumeist der Begriff der Regionalmetamorphose verbunden.

Es ist Korralpenkristallisation nach KIESLINGER und ihr ist im Muralpengebiete die Gleinalpenkristallisation nach HERITSCH und ANGEL gleichzustellen. Sie soll durch Erwärmung von unten her im Gefolge einer Durchgasung und Injektion mit vornehmlicher Zufuhr von Alkalien, Kieselsäure und Bor bewirkt worden sein. Aber die Stoffabscheidungen in den Gesteinen, die dünngestreckten Lagen von Quarz-Feldspat oder die frischen, nur an den Rändern verschleiften Augen von Orthoklas sind nach KIESLINGER nicht durch Injektion „lit-par-lit“, sondern durch „tektonische Einschichtung“ entstanden. Was man hier gewahrt, wiederholt den für die Mesozone fast allgemein geltenden Vorgang. Die verschleifende Durchbewegung wird von der Kristallisation der Alkalien überdauert; während die Kristalloblasten von Granat und Disthen häufig zerdrückt, zermahlen und z. T. aufgelöst sind. Bemerkenswert ist das Fehlen von Turmalin im eingeschichteten Geäder. Andalusit ist, wie auch sonst in ähnlichen Gesteinen, an die Quarzlinsen gebunden.

Weitgehende posttektonische Mobilisation der Glimmer zeigt sich einerseits in den „Plattenschiefern“ mit Einordnung in das Parallelgefüge und andersgestaltig in den „struppigen Glimmerschiefern“ der Korralpe, in denen die unregelmäßig und quer eingestellten, z. T. mit Biotit verwachsenen Muskowite nach KIESLINGER eine „Entschieferung“ der Gesteine bewirken können.

Pegmatite im tiroliden Grundgebirge

Noch klarer und eindeutiger zeigt sich die posttektonische Mobilisation der Muskowitsubstanz in der Nachbarschaft der Linsen und Lagen von grobkörnigem Pegmatit, die allgemein verbreitet

im alpinen Hochkristallin und besonders zahlreich und mächtig in der Koralpe und im oststeierischen Gebirge anzutreffen sind. Der ungleiche Grad der Verarbeitung gestattet den Schluß, daß sie zu verschiedenen Zeiten, vor und nach der Hauptverschieferung, im Gebirge abgeschieden worden sind. Die Mehrzahl unter ihnen ist in hohem Grade mylonitisiert und auch diaphoritisiert. Sie werden dann als Pegmatitgneise bezeichnet. Die Säulchen von Turmalin sind zumeist zerbrochen und die Trümmer gegeneinander verschoben. Nur selten ermöglichte Stoffaufnahme aus dem Nachbargestein die Bildung von Granaten. Die Ränder solcher zerdrückter Pegmatitlinsen werden besonders im Koralpengebiete häufig von den technisch verwertbaren Muskowittafeln begleitet, die mehr als Handgröße erreichen können. Sie sind zumeist nur wenig tektonisch verbogen und können auch an Spalten angesiedelt sein, die das zertrümmerte Gestein quer durchsetzen; das gleiche sieht man ja auch an den Strahlsteingarben der Schiefer von Airolo an der Südseite des St. Gotthard.

In diesen Fällen ist sichtlich die posttektonische Ausscheidung der Mobilisation der Stoffe unmittelbar nachgefolgt. In größeren Abmessungen ist hier grundsätzlich das gleiche geschehen, wie bei der Kristallisation von idiomorphen Muskowitschuppen in parakristallin verformten Augengneisen. Die Größe der Glimmer tafeln entspricht der den großen Pegmatitlinsen entnehmbaren Stoffmenge und man darf schließen, daß in der ganzen Reihe von den ersten Ansätzen zur Deformationsverglimmerung bis zur Ausbildung der weit verbreiteten Glimmergneise die Glimmersubstanz aus der Gesteinsmasse selbst beige stellt und nicht von außen her geliefert worden ist.

Albitisation in den Alpen

Für die Beförderungsart des Natriums im Gebirge ist das gleiche aus der Verteilung der Albitknotengneise oder Albitporphyroblastenschiefer im Gebirge zu erschließen. Auch hier liefert die Mannigfaltigkeit der alpinen Gesteine die überzeugendsten Belege. Auch hier sieht man, daß die Albitisierung in keinem Bezuge steht zu den Umrissen der großen tektonischen Einheiten. Sie ergreift ebenso die penninische Schieferhülle der Tauern, wie die den Grisoniden zugeteilten Glimmerschiefer des Schneebergzuges, wie die vielleicht ebenfalls mittelostalpinen Gneise des Wechsels,

und in besonders großzügigem Ausmaße das oberostalpine Kristallin der Ötztaler Masse und von Oststeiermark mit der kärntnerischen Koralpe. HAMMER (1925, S. 150) weist ausdrücklich darauf hin, daß die Albitknoten im Hochkristallin der Ötztaler Masse nach der Art ihrer Verbreitung nicht von älteren oder jüngeren Graniten oder Orthogneisen abgeleitet werden können. Mit unregelmäßig, wolkigen Umrissen durchsetzen sie das Gebirge, bevorzugen aber dabei einzelne Gneis- und Glimmerschieferbänke. Auch in den großen Gebieten der Koralpe, der Stubalpe und der Gleinalpe fehlen granitische Massen, von denen die verbreiteten Albite abgeleitet werden könnten. KIESLINGER (1927) schätzt die Albitmenge in den Koralpengesteinen etwa gleich der Hälfte der Gesteinsmasse und, wie er hervorhebt, scheint es kaum denkbar, daß der Gebirgskörper auf das Doppelte seines Volumens emporgetrieben werden konnte, zumal älteres Kleingefüge von Albit umwachsen und dabei nicht verschoben oder verlagert worden ist. Auch hier fehlen gerade in dem Gebiete der allgemeiner verbreiteten Albitisation die zu erwartenden Granite in der Nachbarschaft und eine Stoffzufuhr könnte nur auf die entlegeneren Granite des Bachergebirges bezogen werden; aber diese haben selbst auch schon die alpine Umformung mitgemacht.

In den schottischen Kaledoniden

Als ein weiteres Beispiel von vielen, in dem Erscheinungen der gleichen Art zu einem ähnlichen Meinungsaustausche geführt haben, mag hier das Dalradian der schottischen Kaledoniden genannt sein. CLOUGH glaubte, daß die reichliche nachtektonische Impregnation mit Albit in den Schiefen des Cowallgebietes in Argyllshire von einem magmatischen Herde herzuleiten sei. Er betonte aber zugleich, daß in einer Aufschlußhöhe von 1000 Metern keine Anzeichen einer magmatischen Intrusion wahrzunehmen seien und daß die jüngeren Gerobalgranite in den Albitgneisen andere Kontakte mit Andalusit und eine Umbildung der Albitknoten bewirkt haben. BAILEY hat eine Stoffzufuhr von außen her auf Grund chemischer Vergleiche abgelehnt (1923) und teilt mit CUNNINGHAM-CRAIG die Meinung, daß hier nur eine Stoffwanderung innerhalb der Formationsgruppe stattgefunden habe; auch die Bildung von pegmatitartigem Geäder aus Albit und Quarz wird dem gleichen Vorgange zugeschrieben. MACCALLIEN (1930) schloß dagegen aus dem Vorkommen von Turmalin in Adern von Albit,

Chlorit und Quarz in den weit verbreiteten Albitschiefern der Kintyre-Halbinsel auf eine Zufuhr aus der Tiefe. Im Rahmen eines großzügigen Überblickes über die Gesamtheit der metamorphen Vorgänge erklärt HARKER (1932, S. 212) das albitführende Geäder und die Albitporphyroblasten im Cowalgebiete durch Zufuhr aus den Nachbargesteinen, dessen hoher Na-Gehalt von der Sedimentation aus Na-reichen Graniten herrühren soll. Er wendet sich überhaupt gegen die Ableitung fast jeglicher Feldspathisation aus magmatischen Quellen und will auch der Abwanderung von Albit aus den Trondhjemiten im Stavangergebiete Norwegens (GOLDSCHMIDT) nur eine geringe Rolle zuerkennen. Damit wird die von mir vor langer Zeit geäußerte und von BECKE (1911, S. 245) geteilte Auffassung auf breiterer Grundlage bestätigt.

Als selbständiger Vorgang

Ebenso wie als Nachläufer einer Hochmetamorphose kann Albitisation auch in wenig oder kaum metamorphen Gesteinen auftreten, wie in den eozänen Schiefern von Glarus verbunden mit Serizitbildung leichten Grades. Gerade aus der Kristallisation von Albit und auch von Glaukophan in foraminiferenführenden Kalken der Oberkreide, glaubte RAGUIN (1930, Taf. I) schließen zu können, daß dieser Vorgang an den Beginn der Metamorphose zu stellen sei. CORNELIUS (1921, S. 148) verweist dagegen mit Recht auf die häufige, sicherlich allerjüngste Abscheidung der Albite, wie sie aus den hochmetamorphen Tauerngesteinen bekannt ist, und verlegt sie in die letzte Phase, die nur mehr eine geringe Temperatur beansprucht. Man kann hinzufügen, daß sich die Albitisation nach der Gesamtheit der Erfahrungen als ein besonderer Vorgang darstellt, der unabhängig von jeder vorangegangenen Metamorphose, d. h. in jeder Art des metamorphen oder nicht metamorphen Zustandes in jedem Gesteine von entsprechendem Stoffgehalte und bei entsprechender mechanischer Beanspruchung in Erscheinung treten kann.

Und insofern ist auch TILLEYS (1924) Ausspruch berechtigt, daß die Albitisation kein Merkmal ist für die Stellung der Gesteine in der Stufenleiter („grade“) der Metamorphose.

Gefüllte Feldspäte

Nach ihrer allgemeinen zonaren Verbreitung sind hier noch die sog. „gefüllten Feldspäte“ anzuschließen; d. s. Plagioklase, und zwar fast ausschließlich Albite bis Oligoklasalbite, mit einer

Kernfüllung von sehr feinschuppigen bis feinstaubigen Zoisitmineralen und Muskowit. Nach ihrer Verbreitung in den Alpen und in tektonisch verwandten Gebirgen, wie z. B. auch in der moravischen Zone, gehören sie zum Wirkungsbereiche der enogenen Metamorphose im regionaltektonischen Sinne. Auch im Kataberieche der periplutonischen Metamorphose, wie etwa im Moldanubikum, können sie vereinzelt auftreten; dort sind sie aber als Begleiter von späteren, örtlichen destruktiven Vorgängen von der das Werden des eigentlichen Gebirgsgefüges begleitenden konstruktiven Katakristallisation abzusondern.

H. P. CORNELIUS, dem wir schon so mancherlei bedeutsame Aufklärungen über metamorphe Vorgänge in den Alpen verdanken, hat das Wesentliche auch über die umstrittene Bildungsweise der gefüllten Feldspate zusammenfassend dargelegt (1935). Daß es sich dabei nicht um einen der magmatischen Erstarrung anzuschließenden Vorgang, nach Art der Piezokristallisation im Sinne von WEINSCHEK handeln kann, noch auch um eine pneumatolithische Autometamorphose im erstarrenden Batholithen (CHRISTA, KÖLBL), sondern daß hier auch Diffusion das maßgebende ist, zeigt sich, wie auch CORNELIUS hervorhebt, schon daran, daß die gefüllten Feldspäte nicht nur in Erstarrungsgesteinen, sondern auch in Gesteinen sedimentärer Herkunft auftreten. Die Bildung durch den Zerfall von zonar gebauten Plagioklasen gibt sich dadurch kund, daß der Zoisitanteil an der Kernfüllung dort stärker hervortritt, wo nach der Natur des Gesteins ein anorthitreicher Kern in den Plagioklasen vorausgesetzt werden kann. Zugeführter Albit ohne Kernfüllung kann daneben auftreten. Eine Deformation des Gesteins an Ort und Stelle ist keine Vorbedingung für ihre Entstehung und gerade bei wohlerhaltener Erstarrungsstruktur sind die Kernfüllungen als Abbild des einstigen Zonenbaues am klarsten ausgeprägt (z. B. in den altbekannten Tonaliten des Rieser Ferner nach BECKE). Da die Füllminerale der Epistufe angehören, darf man schließen, daß das Gestein aus dem Bildungsbereiche der basischen Plagioklase in eine höhere Umwandlungsstufe verschoben worden ist. Mit CORNELIUS darf man annehmen, daß zwischen die erste Kristallisation der Plagioklase und ihre Umwandlung auch ein langer Zeitraum, ja selbst ein Aufenthalt in der Nähe der Oberfläche, eingeschaltet sein konnte. Die Brekzien über den Engadiner Graniten werden von CORNELIUS als Beleg dafür genannt. Auch dieser Vorgang bleibt unabhängig von der früheren Geschichte der

Gesteine und kann ebenso in stark durchbewegten wie in unberührten Strukturen auftreten.

Wenn sich die Voraussetzung bestätigt, daß der Füllglimmer Muskowit ist, so wird für sein Wachstum außer dem Wechsel der Tiefenstufe noch eine Zufuhr von K zu verlangen sein; so schließt CORNELIUS. Viele werden geneigt sein auch hier zunächst an die Fernwirkung einer Tiefenintrusion zu denken, die für so vielerlei metamorphe Vorgänge und Stoffwanderungen in den Zentralalpen, von der posttektonischen Kristallisation verschiedener Porphyroblasten bis zur Bildung von allerlei Erz- und Mineralgängen, verantwortlich gemacht wird. Unabhängig davon, ob die für die Glimmerbildung in den Plagioklasen notwendige Stoffmenge aus dem Nachbargesteine bezogen werden kann oder nicht, muß dem Vorgange, den CORNELIUS für wenigstens teilweise möglich hält, nämlich der Stoffzufuhr aus metamorphen Gesteinen der Unterlage, die größere Wahrscheinlichkeit eingeräumt werden. Dafür sprechen nicht nur die gleichen allgemeineren Gründe wie für die verwandten Vorgänge, sondern auch die große Verbreitung der gefüllten Feldspäte und ihre unregelmäßige Verteilung in den Gesteinslagen.

Zuletzt muß das Gestein aus kühleren in wärmere Zonen verschoben worden sein; nur dadurch konnten die das leicht bewegliche Kalium heranbringenden Wässer in der Tiefe oder im umgebenden Gestein in Bewegung gesetzt werden. In den bei der Umwandlung schrumpfenden Kern soll das Kalium eingedrungen sein. Es wäre wohl auch denkbar, daß die Kristallisation der Füllung mit einem Umbau der ganzen Stoffmasse der Plagioklase verbunden ist, so daß in den Zoisiten des Kernes ein Absatz aus dem Anorthitgehalt angesiedelt bleibt; die Albitsubstanz aber, entsprechend den neuen Stabilitätsverhältnissen für die in die älteren Umrisse einzubauende Pseudomorphose verwendet wird. Das erklärt die annähernd gleiche Zusammensetzung mit den manchmal in der Nachbarschaft abgeschiedenen einschlußfreien Porphyroblasten von Albit.

Im durchbewegten und im nicht durchbewegten Gestein sind die gefüllten Feldspäte ein Mitergebnis eines Wärmestromes. Aber dennoch gehören sie nicht zum äußeren Raume der periplutonischen Regionalmetamorphose. Nach ihrer regionalen Verbreitung sind sie der enrogenen, d. i. der durch den Wärmestau unter überschobenen Decken bewirkten Metamorphose angeschlossen, für die gerade das Fehlen gleichzeitiger Intrusionen kennzeichnend ist, und in der nur ältere Magmakörper passiv unter den gleichen

Umwandlungen wie ihre Hülle in den Gebirgsbau aufgenommen worden sind.

Das Auftreten der gefüllten Feldspäte ist innerhalb der größeren Einheiten der Kettengebirge zumeist ungleichmäßig und abhängig von den örtlichen, oft lagenweise wechselnden Bedingungen, die das Abfiltrieren aus der zirkulierenden Kaliumlösung ermöglichen. Auch darauf hat CORNELIUS hingewiesen. Es wird dabei vorausgesetzt, daß die Plagioklase in den betreffenden Lagen die Stabilitätsgrenze überschritten haben müssen. Vorbereitende Durchbewegung spielt auch dabei eine wesentliche Rolle. Die deformierten Kristallgitter sind jeder Umwandlung leichter zugänglich.

Solche Ungleichmäßigkeiten findet man auch nicht in den äußeren Bezirken der eigentlichen periplutonischen Metamorphose, in denen sie mit abklingender Katakristallisation, ohne Einschaltung von seichteren Stufen allmählich ausklingt, wie etwa in den ladogischen Glimmerschiefern oder in den Wackengneisen des Moldanubikums, wo auch die Gesteine von einer durch späteren Aufschub bewirkten makro- oder mikroplastischen Umformung verschont geblieben sind.

Porphyroblasten der Tonerdemineralien und von Biotit

Auch die Gestalten der Porphyroblasten von Mineralien mit den schwerer beweglichen Tonerdemolekülen weisen nach ihrer allgemeinen Verteilung in den Gesteinen und ihrem Verhältnisse zu den Nachbarn auf eine Entstehung durch Stoffaustausch im Gestein und nicht durch Zufuhr von außen her. Die Granaten bevorzugen die tonerdereichen Paraschiefer. Sie können ihre Grundgestalt durch Kristallisationskraft mehr oder weniger deutlich zum Ausdruck bringen oder sie können das durchlaufende Gefüge des Grundgewebes idioblastisch und mit siebartigem Gerüste durchwachsen haben. Hierin und in der allverbreiteten Erscheinung der wirbelartig verdrehten Einschlußzüge sind die Belege für die Sammelkristallisation während der Umformung enthalten. Häufig kann aus dem Schlibfbilde die unmittelbare Abstammung von Granat aus Chlorit abgelesen werden. In anderen Fällen entsteht der Granat aus Biotit, insbesondere wo im verschleiftem Gestein eine in der Mesostufe angeregte, lebhaftere Diffusion zugleich auch die kennzeichnende grobschuppige Kristallisation vieler Glimmerschiefer bewirkt hat.

In ähnlich wechselndem Verhältnisse stehen die Staurolithe zum Grundgewebe, das in manchen Fällen von ihnen umwachsen, in anderen beiseite geschoben wird. Oft genannt wird die Beschreibung von Gesteinen der Taimyrhalbinsel durch BACKLUND (1918). Die Staurolithe sind an den Umbiegungsstellen der Falten angesiedelt und damit wird ihr Wachstum der Umformung auch zeitlich zugeordnet. Im übrigen ist Staurolith an die eisenreichen Lagen gebunden.

Disthen hält sich durch seine stärkere Kristallisationskraft meist frei von Einschlüssen. In bezug auf die Verteilung in den Gesteinslagen verhält er sich nicht anders als die beiden anderen Tonerdesilikate.

Auch Porphyroblasten von Biotit können in jedes vorgebildete Gefüge bei entsprechend erhöhter Temperatur durch Sammelkristallisation eingefügt werden.

Weiteres über diese Vorgänge findet man klar zusammengefaßt in der durchaus sehr anschaulichen Erläuterung aller Arten der gesamten Gesteinsmetamorphose in dem Buche von HARKER (1932). Hier werden auch die internen Reaktionen, aus denen sich bei bestimmter Zusammensetzung der Mineralbestand der einzelnen Temperaturstufen ergibt, eingehend dargelegt. Die Beispiele werden vorwiegend dem schottischen Hochlande entnommen. Im Dalradian entspricht der ansteigenden Temperatur die Reihe der nach den Mineralien Chlorit, Biotit, Almandin, Staurolith, Disthen und Sillimanit benannten Zonen. Sie bleibt nur soweit regelmäßig, als dies der Stoffbestand der aufeinanderfolgenden Gesteinslagen gestattet. Bei steigender Temperatur verzehren die unregelmäßig wachsenden Biotite die verstreuten Schuppen von Chlorit und Muskowit. Sie fehlen in Zwischenlagen die ursprünglich arm an Muskowit gewesen sind oder in den seltenen Zwischenlagen von Chloritoidschiefer (Kinkardineshire). Bemerkenswert ist auch der wechselnde Eisengehalt der Biotite in den Umwandlungsstufen. Sie werden eisenreicher in den höheren Zonen (S. 217). Mangan-gehalt befördert den früheren Einsatz von Granat, der unter Umständen auch dem Biotit vorangehen kann.

Vieles Ergänzendes, mit mancherlei bemerkenswerten Sonderdeutungen ist über diese Vorgänge schon von verschiedenen Forschern geäußert worden. CORNELIUS (1921) hat auf Grund seiner reichen alpinen Erfahrungen nachdrücklich hervorgehoben, daß die zwei

Hauptgruppen der Merkmale metamorpher Gesteine, der spezifische Mineralbestand und die schieferigen Texturen als in weitgehendem Maße voneinander unabhängige Komplexe von Erscheinungen zu erkennen sind. Er verweist u. a. auf die reichliche Neubildung von Serizit in den grünen Plagioklasen der Albula- und Juliergranite und auf die uralitischen Hornblenden mit regellosem Haufwerk von stengeligem Zoisit und Albitpflaster in massigen Gabbropartien am Mt. Disgrazia im oberen Val Malenco. Hier, wie in vielen anderen ähnlichen Fällen, die man in den verschiedensten Gebieten antreffen kann, ist das Parallelgefüge nicht als Kristallisationschieferung, sondern als kristallin abgebildete mechanische (oder primäre) Schieferung aufzufassen.

Auch an der Fassung, mit der SCHWINNER (1924, 1926, 1928) einige wesentliche Züge solcher Vorgänge erläutert hat, soll hier nicht vorübergegangen werden. Wenn man die statisch darstellbare Regelung, die in der Umgestaltung der Bestandteile ausgedrückt ist, außer acht läßt, so erscheinen als Grundanlage des Gefüges Verschiebungen an Kluftsystemen in der Richtung der maximalen Scherspannungen, die sich stets orthogonal, symmetrisch zur Hauptspannung kreuzen. Das ist es, was in der Tektonik im großen und kleinen vor allem sichtbaren Ausdruck gewinnt. Faltung entsteht, wo die Schichten in lagenweise gegliederten Gesteinen übereinandergleiten können.

Nur eine der Gruppen der Scherflächen kommt zur Geltung. Durch die Verschiebung an solchen Flächen wird das kristallinische Gefüge vorbereitet und an ihnen werden durch fraktionierte Kristallisation (Diffusion und Sammelkristallisation) die Kristalle eingebaut.

Scherung und fraktionierte Kristallisation bleiben die petrogenetisch gestaltenden Hauptvorgänge durch die ganze Stufenreihe der kristallinischen Schiefer. Aber die Schärfe, mit der jeweils der eine Vorgang gegen den anderen zur Geltung kommt, wird abgewandelt. In dem Bereiche der periplutonischen Katametamorphose gewinnt die Kristallisation das Übergewicht und die mechanischen Strukturen werden durch die Abbildungskristallisation verschleiert. Es entsteht etwas anderes, wenn in Gebieten der Intrusionstektonik makroplastisches Fließen bei erhöhter Temperatur und Katakristallisation mit gleichzeitiger Umlagerung die Rolle der letzten gestaltenden Vorgänge übernehmen.

Weiteres zur Frage der Abscheidung der Quarz-Feldspat-Adern

Den aus der Struktur und aus dem Mineralbestande abgeleiteten Schlüssen, nach denen die Annahme einer magmatischen Zufuhr in Gneise und Schiefer aufzugeben ist, können noch andere unterstützende Erwägungen an die Seite gestellt werden. DRESCHER-KADEN (1936) hat diesbezügliches nach eigenem Gesichtspunkte behandelt. Bei ihm erscheint die Frage nach der Entstehung des Geäders durch Intrusion oder durch Diffusion aus den Nachbargesteinen als ein Glied in einer allgemeineren Auseinandersetzung über die Herkunft der Magmen auf der Erde aus aufgeschmolzenen älteren Magmatiten und Sedimenten. Auf die letzten Schlußfolgerungen soll hier zunächst nicht eingegangen werden. Seine Einwendungen gegen die Intrusion und Imbibation von außen her ergänzen übereinstimmend das hier Gesagte. Sie behandeln vor allem die Mechanik des Vorganges, die Frage nach der Raumfüllung, sei es durch unruhiges Geäder zwischen gefalteten und aufgeblättern, glimmerigen Lagen, sei es durch Einschichtung der Lagen „lit-par-lit“ zwischen ebenflächig gestreckten Streifen. Sie gelten in gleicher Weise für Schiefer aller Umwandlungsstufen; sei es, daß entsprechend einer allgemeineren Regel, das Geäder als ein Erzeugnis der gleichzeitigen allgemeinen Umwandlung nach seinem Mineralbestande der gleichen Stufe angehört wie das Wirtgestein, sei es, daß sie die Überleitung in eine andere Stufe anzeigen, wie das z. B. bei der Zufuhr von Albit häufig der Fall ist. Die Venite der Katareihe, mit Oligoklas bis basischem Plagioklas, werden allerdings nicht zur Entwicklung gelangen können, ohne daß die ganze Gesteinsmasse in der gleichen Richtung umgewandelt wird.

Der Vorgang der Injektion zugeführter Stoffe wäre mechanisch nicht zu erklären. Nur an Biegefalten könnte durch Aufblättern der für die Injektion notwendige offene Raum geschaffen werden. Auch die über mächtige Gesteinskörper oft gleichmäßig ausgedehnte „Blatt für Blatt“-Injektion setzt sich öffnende Räume im Gesteinsgefüge voraus. Es ist schwer vorzustellen, wie solche Räume in gleichmäßiger Verteilung in einem mächtigeren, ebenflächig gestrecktem Gesteinspakete entstehen sollten. Besonders unwahrscheinlich wird eine solche durchgreifende Auflockerung in größeren Rindentiefen, im Bereiche der Katakristallisation, und gerade hier glauben manche die typischen Vertreter der Injektionsgneise und

Mischgneise zu erkennen. Da hierher gehörige Gesteine in allen Stufen sehr verbreitet sind, müßte überdies eine Allgegenwart der sauren Intrusionsstoffe im ganzen Gestein während seiner mechanischen Umformung verlangt werden. Beachtenswert ist dabei, daß nach verbreiteter Erfahrung die Injektionen in konglomeratischen Zwischenlagen nicht auftreten, obwohl sie in den Räumen zwischen den Geröllen leicht Platz finden würden.

Die Schmitzen und Streifen von Quarz-Feldspat sind nach Gestalt und Gefüge dem allgemeinen Bewegungsbilde angepaßt; Übergänge verbinden sie mit den reinen Quarzlagen, die durch allseitiges Auskeilen und durch die Abschnürung von irgendwelchen Zufuhrwegen als Entmischungen aus dem Gestein gekennzeichnet sind. So wie der Quarz kann bei entsprechender Temperatur auch der Feldspat und eine Reihe anderer Minerale aus dem Gestein ausgeschwitzt werden. Als ein Gegenstück in der basischen Gesteinsreihe können die Adern in den Amphiboliten genannt werden; allenthalben — wie z. B. auch im Moldanubikum — treten sie viel spärlicher und in anderen Formen und in anderer chemischer Zusammensetzung auf, als in den blätterigen Gneisen des gleichen Gebirgskörpers.

Wie DRESCHER sagt, kann man ja die kristallinen Schiefergesteine als wechselnde Folgen flächenhaft ausgedehnter Reaktionsräume mit unterschiedlichen ptx-Bedingungen betrachten. Sie entwickeln sich aus der Anlage zu ungleicher mechanischer Beanspruchung in den einzelnen Schichten. Damit wechseln auch lagenweise die Konzentrationsbedingungen und ungleiche Mineralgesellschaften werden lagenweise abgeschieden. In gestreckte Teilräume sondern sich auch Quarz und Feldspat und es entsteht das, was als Injektion „lit-par-lit“ gedeutet wird.

Die angeblichen Injektionsadern werden damit zu „mechanischen Entmischungsprodukten“ im weiteren Sinne. Mit zunehmender Erwärmung und Beweglichkeit werden sie zu Veniten; insbesondere mit dem Einrücken der Gesteinsmasse in den periplutonischen Raum. Ob sie von den Arteriten und Migmatiten grundsätzlich zu unterscheiden und durch Übergänge mit ihnen verbunden sind, oder ob man beide als magmenfernere und magmennähere Abstufungen der allgemeineren periplutonisch angeregten Diffusionsvorgänge zu betrachten hat, das ist eine der bedeutsamsten unter den durch die neueren Arbeiten von WEGMANN und DRESCHER-KADEN angeregten Fragen.

III. Besondere Beispiele aus dem Katabereiche

Granulite

Auch in Schiefen des Katabereiches ist die allgemein verbreitete posttektonische Kristallisation bis in die jüngste Zeit als ein Beleg für schieferige Erstarrung aus einem Schmelzflusse aufgefaßt worden.

Als ein Muster für die Entwicklung der Gedankengänge in einem Gebiete mit Katakristallisation kann das Moldanubikum der böhmischen Masse und der oberrheinischen Horste genannt werden. Das Wesentliche ist in den hier auftauchenden Fragen und Gegenfragen zur Sprache gekommen. Und es mag an einem der kennzeichnensten Glieder des Gesteinsbestandes, an den Granuliten der böhmischen Masse und den ihnen anzuschließenden sächsischen Granuliten gezeigt werden, wie auch hier mit fortschreitender Untersuchung die unmittelbare magmatische Herkunft der Gesteine abgelehnt wird und die Metamorphose des starren Gesteinskörpers an ihre Stelle tritt. Es ist die Auffassung, die von mir vor vielen Jahren (1912, 1918) aus dem regionalen Verbands der Gesteinsmassen erschlossen und mit voller Bestimmtheit ausgesprochen worden ist (s. Intrusionstektonik 1926, S. 21).

Für CREDNER (1903 und 1907) war bekanntlich das sächsische Granulitgebirge ein Lakkolith aus granitischem Magma mit fluidal gestrecktem Erstarrungsgefüge und konkordant angeschmiegtm Dache. L. WALDMANN (1927) hat in eingehenden Gefügestudien an moldanubischen Gesteinen für das von granulitischem Hauptgestein in mannigfaltiger Gestaltung abgehobene feldspätige Geäder eine Zufuhr von außen her angenommen. Die Adern queren das Parallelgefüge geradlinig oder sie durchschwärmen das Gestein mit scharfen oder verschwommenen Rändern in jeder denkbaren verbogenen und verfalteten Weise; bald sind sie schmal und mit auskeilenden oder verfließenden Enden, gleichlaufend in das herrschende Parallelgefüge eingeschlichtet. Die Häufigkeit solchen Geäders und die Übergänge in das Hauptgestein haben ihn dazu geführt, die Granulite als Mischgesteine aus Paragneisen mit reichlicher magmatischer Zufuhr aus der Tiefe aufzufassen. Er nimmt sogar an, daß die Granaten der Granulite ihre Stelle in einem ursprünglichen Sedimentgneise bewahrt hätten, während das biotit- und plagioklasreiche Grundgewebe des Ausgangsgesteines vollkommen durch das zu-

geführte kalireiche Magma ersetzt worden wäre. Auch auf die biotitführenden Orthogneise, die sog. Gföhler Gneise sind solche Anschauungen übertragen worden. KÖLBL (1925) und z. T. auch KÖHLER (1925) haben ähnliche Anschauungen ausgesprochen. LIMBROCK (1923, 1925) wurde durch das vielgestaltige, aderartige, auch die Schichtfugen aufblätternde Eindringen des Granulites in die biotitreichen, oft auch hornfelsartigen Nachbargesteine und durch das Vorkommen von Einschlüssen im Granulit zu der Meinung geführt, daß hier ein Intrusivgestein in seinen ursprünglichen Verbandverhältnissen vorliege, das keine wesentliche postmagmatische Metamorphose erlitten habe.

Das früher über diesen Gegenstand Gesagte (F. E. SUESS 1926) soll hier durch noch einige weitere Erläuterungen ergänzt werden. So wie die Granulite in allen Merkmalen der Textur, des Mineralbestandes, der Lagerung als ein vollkommen gleichartiges Glied der moldanubischen Gesteinsgesellschaft zugeordnet sind, so kann auch kein Zweifel darüber bestehen, daß über sie der gleiche Strom der Ereignisse hingegangen ist, durch den das Moldanubikum sein gegenwärtiges Gepräge als kristallin-tektonische Einheit erworben hat. Die Granulite sind in allen wesentlichen Eigenschaften als kristallinische Schiefer der gleichen Stufe und Fazies wie die benachbarten Sedimentgneise zu betrachten. So wie in den Paraschiefern das ursprüngliche klastische Gefüge vollkommen verschwunden ist, muß auch die Erstarrungsstruktur der Orthogneise durch die Kristalloblastese aufgezehrt und ersetzt worden sein. So wie jene vielfältig gestaut, verfaltet und aufgerichtet worden sind, können auch diese ihre ursprüngliche Lagerungsform nicht unverändert bewahrt haben. Was in bezug auf die Geschichte der Metamorphose den Sedimentgneisen, Amphiboliten, Marmoren und anderen zu entnehmen ist, muß auch für die Granulite gelten.

Als wesentlich für die Gestaltung des Geäders und der sonstigen Formen des Verbandes der Granulite mit den Nachbargesteinen wie sie sich gegenwärtig darbieten, können zweierlei Vorgänge hervorgehoben werden. Sie begleiten und bewirken z. T. auch die kristalloblastische Erneuerung des Gefüges und des Mineralbestandes.

Das eine ist die durch den Wärmezustrom bewirkte Mobilisation und Migration der Stoffe auf dem Wege der Diffusion. Mobilisation und Neukristallisation ist ja die Grundbedingung jeder eigentlichen Metamorphose. Das zweite ist die Umgestaltung und Verzerrung der ursprünglichen Formen des Verbandes mit

den Nachbargesteinen durch die intrusionstektonische Verfaltung.

Das erste bewirkt die verschiedenen Formen der Sammelkristallisation und kann bis zur Ausbildung von lagerhaften Anreicherungen und von Veniten führen. Die Adern mit angeschlossenen Augen von Kalifeldspat oder Mondsteinen sind hierher zu rechnen. Es ist kein Grund dafür vorhanden, warum ein solches Gebilde von der allgemeinen Sammelkristallisation grundsätzlich abgeschieden werden soll. Die Adern enthalten insbesondere die Stoffe der Restkristallisation der Granulite und es ist nicht notwendig für sie eine fremde Zufuhr anzunehmen, für die auch schwer eine Quelle zu finden wäre. Aber auch früher vorhandene Adern mit reiner Erstarrungsstruktur können bei der Metamorphose zu Granulit umgebaut worden sein. Ebenso können ursprüngliche tuffoide Lagen unter gänzlicher Aufgabe ihrer ursprünglichen Strukturmerkmale in die Granulite oder Granulitgneise aufgenommen worden sein. Ein Tonerdeüberschuß von nicht allzu großer Höhe müßte noch nicht bestimmend sein für die Deutung solcher Gesteine; denn man findet ihn auch gelegentlich in Quarzporphyren oder Lipariten, die aus regionaltektonischen Gründen als die Ausgangsgesteine der Granulite gelten dürfen (Intrusionstektonik 1926, S. 18). Auch die Wasserarmut ist eine Eigenschaft der Ergußgesteine. Von ihr werden die „granulitoiden“ Merkmale der Metamorphose abzuleiten sein; das feine Korn und der Ersatz von Biotit durch Granat. Auch die Gesteine im Nahkontakt der effusiven Magmen werden entwässert; auch auf sie überträgt sich die granulitoide Metamorphose und schafft Gesteine mit den Charakteren der Hornfelsgranulite. Es wird kaum einen Vorgang geben, der das Auftreten von saurem wasserarmen Magma oder den späteren Entzug des Wassers in plutonischen Tiefen zu erklären vermöchte.

Das Wesentliche der hier und an anderer Stelle entwickelten Gedanken wird durch die vergleichenden Studien von H. SENG endgültig festgelegt (1931, 1934). Sie ergänzen die Gedankengänge, durch die an anderer Stelle die Deutung der Granulite als Katakristalline Ergußgesteine begründet werden sollte (1926, S. 18). An einer kaum übersehbaren Mannigfaltigkeit von Einzelheiten, an den vielerlei Anzeichen des inneren Umbaus, zeigt sich wieweit das Gefüge der Granulite unterschieden ist von irgendeiner Erstarrungsstruktur. Diesem Grundgedanken entspricht auch die Schlußfolgerung von SENG, daß die ständige Regeneration der

Mineralkörner bei den parakristallinen Bewegungsformen fluidale Gefügebilder ohne merkliche Kornzerrüttung erzeugt und daß sich noch mancher Tiefenkörper, der heute als fluidal bewegtes Erstarrungsgestein gilt, als parakristalliner Gneis herausstellen wird. Auch die Sonderuntersuchung des Gefüges (SENG 1931, S. 467) hat ergeben, daß die Granulite alle strukturellen Eigenschaften einer Durchbewegung in festem Zustande verdanken und daß die Deformation unter gleichzeitiger lebhafter Stoffwanderung erfolgt ist.

Im Kleingefüge erweist sich der Quarz als der eigentliche Träger der Bewegung, als der ständig nach den möglichen Hohlräumen strömende Lückenbüßer (SENG 1931, S. 485). Hand in Hand damit geht die „Regelung“ des Gefüges und die Formveränderung, insbesondere die Dickenabnahme der Körner in der senkrechten zur Streckung. Einem Vorgange, der als Spontankristallisation bezeichnet wird, und der durch das Zusammentreffen verschiedener wachstumsfördernder Umstände, wie Stoffwanderung, Temperaturerhöhung und Wechsel des Bewegungsplanes erzeugt werden mag, bewirkt Kornvergrößerung und die Bildung von Körneraggregaten. Sie werden vom Stoffumsatz und vom Abwandern der Biotite begleitet. Hierher gehört mancherlei Geäder, das als Injektion gedeutet und für die Annahme von Mischgesteinen verwertet worden ist. Daß die Umformung dabei eine Rolle spielt, zeigt die Beunruhigung des Gefüges dort, wo aus den Umrißbildern gleitende Bewegungen zu entnehmen sind. Selbst pegmatitartige Adern in einem Paragestein, dem cordieritführenden Hornfelsgranulit, werden von SENIG als Aggregate aufgefaßt, die „während des tektonischen Aktes neugebildet wurden“.

Auch beim Granulitgefüge kann man von einer Art interner Polymetamorphose sprechen; und so wie mancherlei Polymetamorphose im Mesobereiche hat auch sie die irrtümliche Annahme einer Stoffzufuhr veranlaßt; bei Verkennung des Umstandes, daß jede Metamorphose nichts anderes sein kann, als Mobilisation und Neukristallisation der Stoffe. Insofern sie Neukristallisation ist, muß sie immer posttektonisch erscheinen; Unterschiede ergeben sich, je nachdem, ob eine gleichzeitige Umformung der Gesteinskörper durch die Neukristallisation vollkommen eingeholt worden ist, oder ob rupturale Anteile unverheilt stehen geblieben sind. Eine rein rupturrell-tektonische Umformung, die einer Kristallisation nachfolgt und nicht von Kristallisation be-

gleitet ist, kann zwar bedeutungsvoll sein für das Verständnis der tektonischen Vorgänge; sie kann nicht als Metamorphose bezeichnet werden.

Pyropserpentine und Eklogite

Eine bemerkenswerte Rolle spielt in diesen Fragen die häufige Begleitung der Granulite in ihrem eigentlichen Heimatgebiete, im Moldanubikum, durch ultrabasische Stöcke von Gabbro, Eklogit und vor allem von pyropführendem Serpentin. Daß diese Gesteine keine Differentiate des granulitischen Magmas sind, ergibt sich aus den durchaus scharfen Grenzen zwischen beiden Gesteinen. Ich habe angenommen, daß die basischen Massen den Granulit durchbrochen haben oder aus der Tiefe mit empor gebracht worden sind. Hierzu kommen noch neuere Beobachtungen von KÖHLER und von SENG. In Granuliten bei Wanzenu im Waldviertel und bei Marbach-Granz an der Donau beobachtete KÖHLER (1928) zwischen Serpentin und Granulit einen Reaktionssaum von Biotitschiefer mit Antophyllit und schloß daraus auf eine mögliche Förderung der Massen aus der Tiefe. Ein „Hälleflintgranulit“ (mit Plagioklasen, Biotit und verschiedenen Granatgenerationen), den SENG in ähnlicher Stellung im sächsischen Gebiete gefunden hat, kann vielleicht auch in ähnlichem Sinne gedeutet werden.

Eklogite und Granulite gehören zusammen. BECKE hat bereits die Granulite als die sauren Vertreter der Eklogitfazies bezeichnet. Wir verdanken BACKLUND (1936) sehr gründliche Untersuchungen an Eklogiten in Teilen des den Kaledoniden zugewiesenen Grundgebirges von Westerbotten und dem angrenzenden Norwegen und von Ostgrönland. Er hat den lückenlosen Nachweis gebracht, daß auch diese Gesteine von Ergußgesteinen abstammen. Sie waren einstmals Basalte oder nach ihrem engeren Chemismus und nach ihrer Stellung im Gebirge den alpinen Ophiolithen vergleichbare Intrusivkörper. Auch KRANCK (1935) hat die Einzelheiten des Umwandlungsvorganges an den Vorkommen in den Migmatitgneisen von Liverpool Land, Ostgrönland eingehend geschildert und SAHLSTEIN (1935) lieferte die eingehendere mineralogisch-petrographische Beschreibung der Gesteine.

Die Umwandlung durchläuft verschiedene Phasen, in denen die Gesteine ausgewalzt, zerstückelt und zeitweise durchwärmt werden. Als bezeichnendes Mineral der Kristallisation bei gleichzeitiger Durchbewegung in dieser Stufe erscheint der Granat in verschiedenen

Gesteinen, wie z. B. auch in den Mesoglimmerschiefern. An ihm, als dem kinematisch widerstandsfähigstem Bestandteile, sind gewisse Umwandlungsvorgänge am deutlichsten verfolgbar. Erste diablatische Formen werden bei zunehmender Verarbeitung zerrieben; ihnen folgen weitere Granatgenerationen mit abnehmenden Einschlußmengen. Das Gestein durchläuft auch strahlsteinähnliche Ausbildungsformen und durch interne Reaktionen während der kinetischen Umformung werden die ursprünglichen sieben bis acht Bestandteile (Granat, Pyroxen, Hornblende, Plagioklas, Zoisit, Epidot, Titanit, Rutil, Erz) aufgezehrt und das Endergebnis ist ein dichtes, richtungslos körniges Gestein aus blaugrüner Hornblende mit Zeilen von einschlußfreiem Granat. Es ist zum größten Teil Pyrop mit einer gelegentlichen Komponente von Almandin.

Bei Höchsttemperaturen unter den gleichen Druckverhältnissen entstehen die echten, d. i. die reinen Pyroxeneklogite, wie im norwegischen Gebiete am Ostrande (ESKOLA). Aber es gibt Austauschreaktionen zwischen Hornblende und Pyroxen, die den Wechsel von Temperatur und Druck im Steigen und Sinken der Migmatitfront begleiten. Ein mehrfacher, wenigstens dreimaliger, solcher Wechsel ist nachweisbar. Echte Pyroxeneklogite bevorzugen die echten Migmatitgneise.

Bemerkenswert ist auch in den genannten Gebieten das Vorkommen der Eklogite im Verbands mit granulitartigen Gesteinen, in die sie in Form von Schuppen und Linsen eingelagert sind. Granat wird überhaupt in dieser kristallinen Fazies, wie in der ganzen Gneisfolge von Hurry Inlet auf Liverpool Land, zum kennzeichnenden Bestandteil in allen Gesteinen, die ihn nach ihrem Chemismus zu liefern imstande sind; so wie unter anderen Bewegungsbedingungen die Deformationsverglimmerung alle dazu geeigneten Gesteine ergreift. Vom regional-tektonischem Gesichtspunkte ist hier für das Auftreten der Eklogite die durch Granatgehalt gekennzeichnete kristallinische Fazies der gesamten Gebirgsmasse maßgebend und nicht die Abstammung der Gesteine, die davon ergriffen werden. Die Bezeichnung Granulit kann hier auch nur auf die kristallinische Fazies bezogen werden; denn nach KRANCK sind diese Gesteine nicht ursprüngliche Magmatite, wie die moldanubischen Granulite, sondern pegmatitisch durchäderte und migmatitisch umgewandelte Schiefer pelitischer und psamitischer Herkunft. Sie gleichen hierin den sog. Quarzgranuliten des Moinian in den schottischen Kaledoniden.

Mit ihrem Bezuge zur Migmatitfront und durch die Art der Tektonisierung, die auch hier fälschlich als Fließbewegung gedeutet worden ist, rücken auch diese Eklogitgebiete in den Bereich der periplutonischen Regionalmetamorphose und der Intrusionstektonik. Zahlreich sind die Vergleichsmöglichkeiten mit dem Moldanubikum. So wie dieses Gebiet nach seinen Verhältnissen zum Deckgebirge nicht in das Orogen gehört, wird sich auch die skandinavische Migmatitfront in ihren ersten Bildungsbedingungen unabhängig erweisen von einer geosynklinalen Uranlage; wenn sie auch im Werden auf die Bestandteile des Orogens übergreifen hat.

So wie aus dem Bezuge des Moldanubikums zu dem nicht metamorphen Deckgebirge geschlossen worden ist, daß Intrusionstektonik nicht zugleich auch Tiefentektonik bedeutet (Intrusionstektonik 1926, S. 6), so gelangt auch BACKLUND (1936, S. 59) zu der Erkenntnis, daß die Granite und Gneise im Bereiche der Migmatitbildung, und mit ihnen auch die eingeschlossenen Eklogite, keine Zeugen außerordentlich großer Tiefen sein können.

Der seinerzeit aus dem Chemismus, aus den Strukturen, aus den Lagerungsformen gezogene Schluß, daß die Granulite in der mannigfaltigen Reihe der moldanubischen Ausgangsgesteine den sauren Vulkaniten entsprechen, ist als gewichtiger Einwand die schwer zu deutende Vergesellschaftung der Granulite mit den Pyropserpentinien entgegengehalten worden. Da wegen der Art des Verbandes diese basischen Massen nicht als Differentiate des granulitischen Magmas angesehen werden können, wurde von mir als wahrscheinlich angenommen, daß sie basischen Intrusionen in den liparitischen oder rhyolithischen Lakkolithen entsprechen und mit diesen später verschleift und umgewandelt worden sind (Intrusionstektonik 1926, S. 23). Die Erkenntnisse an den skandinavischen und grönländischen Eklogiten bieten einen wertvollen Beleg für diese Annahme. Auch die Serpentine der Granulite verbinden sich gelegentlich mit Granatamphiboliten und eklogitartigen Gesteinen, und in Westnorwegen gesellen sich auch Serpentine zu den Eklogiten (ESKOLA, BACKLUND 1936, S. 58). Pyrop, das letzte Ergebnis der Umwandlung zum Eklogit, kennzeichnet auch meistens die Serpentine der Granulite, und BACKLUNDS Nachweis, daß die Eklogite Basalte gewesen sind, stützt die Annahme, daß auch die Pyropserpentine der Granulite mit den begleitenden Granatamphiboliten und eklogitartigen Gesteinen von basischen Ergüssen, vielleicht auch von Magmabasalten abstammen. Auch

das Vorkommen verschleifter Einschlüsse von Pyroxengranulit im Granulit, wie es SAHLSTEIN (1935, S. 8) vom Hurry Inlet beschreibt, wiederholt sich in moldanubischen Granuliten von Mähren, im Waldviertel und im Dunkelsteiner Walde in Niederösterreich.

Mit allen diesen Hinweisen wird ebenso für den Granulit, wie für die Eklogite die Vorstellung der ursprünglichen Kristallisation aus dem Magma und damit auch der syntektonischen Intrusionen endgültig widerlegt.

Mobilisation an Paraschiefern des Katabereiches, Katamylonite

Lebendiger noch und vielgestaltiger als in den Granuliten sind die Vorgänge der Stoffwanderung während der Metamorphose in der übrigen moldanubischen Gesteinsgesellschaft abbildlich festgehalten; dort steht der Mannigfaltigkeit fast aller denkbaren Stoffgemenge magmatischer und sedimentärer Herkunft, für das, was man der „syntektonischen Imbibation“ nach SENG anschließen kann, auch eine größere Mannigfaltigkeit an mobilisierbaren fluiden Stoffen, zur Verfügung. Bemerkenswertes darüber ist den Studien von WALDMANN (1928) im Waldviertel und von STARK (1928) im Böhmerwalde zu entnehmen. Sie gewähren Einblick in vielerlei Einzelheiten, die in ihrer Gesamtheit den wandlungsreichen Dauerprozess der moldanubischen Metamorphose umfassen. Hierher gehört außer der Abscheidung von Veniten neben den Arteriten die Bildung von Reaktionssäumen an den Berührungsflächen der Minerale durch Kristalloblastese ohne magmatischen Kontakt; an dem Kontakte der Bruchflächen auseinandergezerrter Amphibolitbänke mit kristalloblastisch umfließendem Marmor oder Kalksilikatfels ist dies mit überzeugendster Klarheit zu sehen (Suess 1909, STARK 1928, S. 11).

Es wird auch eine Altersfolge von den basischen, vorwiegend amphibolitischen zu den sauren und zunehmend aplitischen Gesteinen abgeleitet. Es scheint aber, daß in der Reihenfolge der einander durchdringenden und durchkreuzenden Gesteinskörper auch die ungleiche Bereitschaft verschiedener Stoffgruppen zur erneuerten Mobilisation während der Deformation zum Ausdruck kommt.

Bezeichnend sind in dieser Hinsicht auch die von WALDMANN (1927, S. 44) von mehreren Orten im Gföhler Gneis als „Katamylonite“ beschriebenen Einlagerungen. In diesen wurde der zertrümmerte und verarbeitete Mineralbestand der Katagneisgruppe

mit Feldspatäugen, gewälzten Granaten, zerstoßenem Biotit, angeblich korrodiertem Granat und Disthen u. a. durch die erneuerte Kristallisation eines ähnlichen Mineralbestandes mit Kalifeldspat, Sillimanit u. a. wieder verkittet.

Beziehungen zur Intrusionstektonik, erste Kristallisation und „granitische“ Phase

Ein Beispiel dieser Art ist in Fig. 2 wiedergegeben. Es stammt von Spitz an der Donau, aus dem Moldanubikum des niederösterreichischen Waldviertels. Das Stück ist eine Probe von einer in gleicher und ähnlicher Ausbildung über eine weite Strecke hin



Fig. 2. Zertrümmerte Aplitgänge mit Kontaktsaum, z. T. auch an den Bruchflächen, im Silikatmarmor, Moldanubikum, Spitz a. d. Donau, Niederösterreich.

$\frac{1}{2}$ nat. Größe. Fund und Phot. von Dr. A. SCHIENER.

wiederkehrenden Erscheinung, die besonders klar und überzeugend die Eigenheiten der periplutonischen Regionalmetamorphose und ihre Unabhängigkeit von der Orogenese erläutert. Eine aus der Gegend westlich Krems a. d. Donau über Drosendorf weit nach Mähren streichende Zone von Paragneisen mit Amphiboliten und häufigen Graphitlinsen enthält u. a. auch zahlreiche Lager und Linsen von z. T. graphitführendem Marmor und Silikatmarmor. In manche dieser Lagen sind reichlich Trümmer von Amphibolit und Aplit eingestreut. Oft sind sie zu weithin überblickbaren Reihen geordnet und dadurch deutlich als Teile von auseinandergezerrten Gesteinsbänken oder Gängen zu erkennen. Neben vielen Vorkommen mit mehr oder weniger zerdrückten und verschleiften Trümmern sind abgekantete Einschlüsse mit ebenen Bruchflächen besonders bemerkenswert; insbesondere, wenn, wie in dem abgebildeten

Stücke, ein Kontaktsaum, nicht nur die ursprünglichen Hauptberührungsflächen der Bruchstücke mit dem umschließendem Silikatmarmor, sondern auch die jüngeren Bruchflächen besiedelt hat. An dem Auseinanderrücken der Aplittrümmen erkennt man, daß die Marmorbank bei erhöhter Temperatur und gleichzeitiger Kristalloblastese gedehnt worden ist. KÖLBL hat 1925 gleichartige aber größere Ausbildungen aus diesem Gebiete abgebildet. Die schwerer löslichen Apliten mußten zerbrechen, da sie mit der plastischen Umformung des Marmors nicht Schritt halten konnten. Wenn auch der jüngere Kontaktsaum an den Bruchflächen weniger vollkommen entwickelt ist, so lehrt er doch, daß der Stoffaustausch im starren Gestein die Zertrümmerung noch überdauert hat und daß die thermische Metamorphose durch lange Zeit, vielleicht unter wiederholter Erneuerung wirksam gewesen ist¹⁾. (Vgl. die früher beschriebenen Amphibolite und Apliten im Marmor, F. E. SUESS 1909.)

Die Aplitbank zeigt allerdings eine innere Streckung, die älter ist als ihre Zerlegung in Bruchstücke; aber es ist kein Anzeichen dafür vorhanden, daß der Aplit vor oder nach dieser Zerlegung von einer durchgreifenden deformierenden oder enogenen Metamorphose ergriffen worden wäre. In das Innere eines Orogens, in die belastete Zone gehört kein lange fortlaufender Gesteinszug mit innerer Zertrümmerung und posttektonischer Katakristallisation ohne gleichzeitiger ins einzelne gehender molekularer und ruptueller Umformung; er wäre z. B. nicht denkbar im Pennin der Alpen.

Die Vorgänge im Kleinen und im Großen sind als ein Ganzes zu erfassen. Es ist der gleiche, einheitlich großzügige Formenguß, der die kantigen Silikatbruchstücke im kristalloblastischen Flusse der Marmore bestehen läßt und der die 20—25 km langen Inseln mit dem seicht gefalteten und gebrochenem Gebirgsbau des Barandien eintaucht in die Granite Mittelböhmens und damit auch

¹⁾ Das Mikroskop zeigt den Aplit etwas kataklastisch mit feinverzahnten und undulösen Quarzen, vorwiegend große, äußerst zart gestreifte Perthite, kleine Körner von Oligoklas und kleiner Orthoklas als Lückenfüllung. Die dunkeln Flecke im Aplit sind zwischen den Körnern gehäufte Pyrit.

Der Marmor enthält ziemlich zerrissene Körner von Diopsid, glatt rundliche oder gestreckte Körner von Skapolith, mit Feldern von äußerst feinen kohligen Einschlüssen und nicht wenige streifig gestreckte Schuppen von sehr blaß holzbraunem bis fast farblosem Biotit. Ferner einzelne rundliche gestreckte Quarzkörner und einzelne Plagioklase, Pyrit. — Der megaskopisch so auffallend dunkle Saum um die Apliten besteht zumeist aus an die Flächen knapp angelehnten Biotitstreifen und etwas Diopsid.

in den äußeren Bereich der rein thermischen, „periplutonischen“ Metamorphose, an der eine Deformation keinen unmittelbaren Anteil hat.

In Fig. 3 wird dem Beispiele der Umformung eines Aplites in Marmor, ein solches in einem Silikatgestein an die Seite gestellt. Es ist eine aus einer Reihe von lehrreichen Skizzen, die H. SCHUHMANN (1929) aus einem Steinbruche westlich von Plank im Kamptale, südliches Waldviertel, wiedergegeben hat. An dem verzerrten und zerrissenen Aplitgang im biotitreichen Schiefergneis ist auch hier

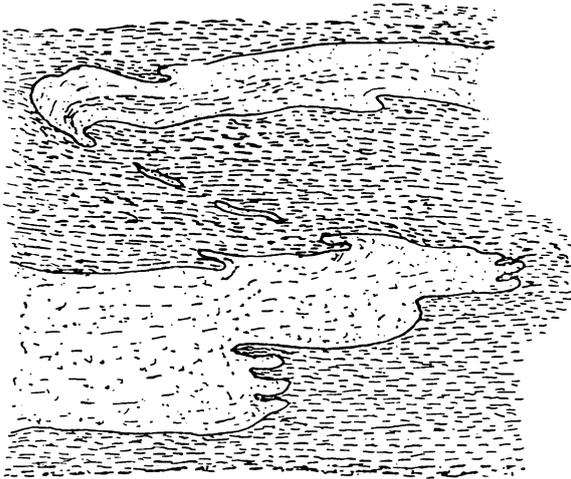


Fig. 3. Aplitband im moldanubischen Schiefergneis; mit der kristalloblastischen Umformung der Gesteinsmasse zusammengestaucht und gefaltet und an der Umbiegungsstelle gezerrt und zerrissen. Steinbruch bei Mitterberg, niederöstr. Waldviertel.

Nach H. SCHUHMANN.

die gewaltsame Umformung zu erkennen. Auch hier ist die Umformung durch die völlig geschlossene Kristallisation der umgebenden Schiefergneise überholt worden. Da aber der Lösungsgegensatz nicht so groß ist wie zwischen Aplit und Marmor treten an die Stelle der scharfen Kanten die schmiegsamen Umriss. Aber auch hier ist deutlich wahrzunehmen, daß die Umformung und Umkristallisation im starren Gestein geschehen ist.

Was hier über den regionalen Zusammenhang von zweierlei Umformung und zweierlei Metamorphose dargetan werden soll, entspringt aus den Vorstellungen über die Gesamttektonogenese. Es mag daher gestattet sein, von den an anderen Stellen über die Granit-

geschichte des Moldanubikums Gesagten einiges hier hervorhebend zu wiederholen. Es handelt sich dabei um Begriffsbildungen und Erkenntnisse, die ohne hypothetische Ausgestaltung unmittelbar aus dem Wahrzunehmenden gewonnen werden. Das Moldanubikum, und damit das Gebiet der Intrusionstektonik variszischen Alters, in seiner ganzen Ausdehnung von Mähren bis in das französische Zentralplateau und in die helverischen Massive der Schweizer Alpen, liegt außerhalb einer durch regional herrschenden Tangentialdruck geschaffenen orogenetischen Zone und hat nichts zu tun mit einer vorgebildeten Geosynklinale. Das ergibt sich ebenso aus der Anpassung der Strukturlinien an die Umriss der Batholithen und aus dem Fehlen irgendwelcher mit Beharrlichkeit durchlaufender Streßzonen, wie auch und vor allem daraus, daß die Nordwestgrenze des mittelböhmischen Granitstockes mit diskordanten Kontakten nicht metamorphes Paläozoikum berührt, das in vorgranitischer Zeit nur Faltungen und Überschiebungen von geringem Ausmaße erlitten hat, die in ihrer ganzen Art und Anlage von dem großen Stile der entschieden einseitig gerichteten Orogenese mit „Wandertektonik“ weit absteht. Durch lange Zeit muß die Erwärmung gewirkt haben, die in einer dem Barrandien und seiner Unterlage vergleichbaren Gesteinsreihe alles ältere Gefüge jeder Art zum Verschwinden gebracht und durch Kristalloblastese ersetzt hat.

Was als „granitische Phase“ (SENG) im Gefolge der Hauptmetamorphose unterschieden wird, kann nichts anderes bedeuten, als die Wirkung des Nahkontaktes der über dem Hauptbatholithen höher ansteigenden granitischen Äste auf die bereits unter dem allgemeinen Einflusse der nachdrängenden Tiefenmassen steil aufgebogenen und zugleich kristalloblastisch umgewandelten Gesteinsfolge. Andererseits werden die bei der Raumschaffung der Granite im kristalloblastischen Flusse umgeformten Gesteinsmassen von fluiden Stoffen von den Graniten her reichlich durchdrungen. Was durch die allgemeine Fernwirkung gebildet worden war, kann mit dem durch die Zufuhr eingeleitetem mannigfachem Wechselspiel der Stoffe wieder umgebaut werden. Zu einer zweiten Phase der Katakristallisation gehören z. B. die erwähnten Reaktionssäume an den Bruchflächen der zerstückelten und auseinandergezerrten Bänke von Amphibolit und von Aplit im Marmor oder Kalksilikatfels (s. S. 35). Zu der nah- oder spätgranitischen Einwirkung oder der „granitischen Phase“ gehört auch die örtliche Vergneisung der

Granulite im Nahbereich der Granite. In die ältere, man kann sagen: ferngranitische Phase, gehören dagegen die sog. Walzen und „pseudointrusiven“ Falten (SENG S. 404) und Quetschformen im Granulit. Zu den jüngeren Abscheidungen nach der Hauptkristallisation gehören die in vielen Gebieten häufigen Abscheidungen von Sillimanit an Schieferungs- und Gleitflächen. Cordierithornfelse entstehen im heißen Nahkontakt und häufiger in den trockenen diskordanten Durchbrüchen, als in den größeren Tiefen, in den migmatischen und perlgneisartigen Randzonen, die den Granit mit unbestimmbaren Grenzen umgeben.

Was der Unterscheidung einer granitischen Phase zugrunde liegt, sind im großen und ganzen die gleichen Erscheinungen, auf denen die Angabe vieler Forscher beruht, daß die Metamorphose des moldanubischen Grundgebirges in Böhmen, so wie im Schwarzwalde, vorgranitisch sei und daß der Granit keine Gneisbildung verursacht habe (SCHWENKEL 1912, SENG 1935). Aber zur Aufstellung des Begriffes der Intrusionstektonik haben nicht die Verhältnisse am Nahkontakte der Granite geführt, sondern die posttektonische Katakristallisation in einem von den Granitumrissen abhängigem Gebirgsbau.

Zwischen die Hauptmetamorphose des gesamten Moldanubikums und der gesteigerten Metamorphose, die häufig an den Graniträndern durch die reichlicheren Cordieritgneise und größeren Kinzigite ausgedrückt ist, war keine postkristalline Bewegung im Moldanubikum eingeschaltet. Schon zur Zeit der ersten Kristallisation waren die Gesteine in ihre endgültige Form gegossen worden und mit dieser älteren Formgebung waren die Gesteinskörper mit ihren Umrissen und ihrem vorherrschendem Parallelgefüge bereits den Granitmassen angeschmiegt worden. Auch hierin erweisen sich die Nahkontakte der Granite als einem Schlußabschnitte des durch lange Zeiten andauernden Vorganges zugehörig.

Was in bezug auf die Metamorphose der Orthogneise den so kennzeichnenden kristalloblastischen Strukturen zu entnehmen war, vereinigt sich gut mit dem, was den Lagerungsformen und Verbänden der Gesteine und ihren Abwandlungen im großen und im kleinen zu entnehmen ist; daß nämlich lagerhafte, syntektonische Intrusionen mit den Strukturen der kristallinen Schiefergesteine in den moldanubischen Gneisen und Schiefem nicht enthalten sind. Die Kristallisation ist in den starren Gesteinen durch Wärmezufuhr von außen her eingeleitet

worden, während sich die aus plutonischen Tiefen aufsteigenden Magmen zwischen den abgedrängten, suprakrustalen und hypabyssischen Lagermassen Platz geschaffen haben. Trotz der Ausdehnung über einen Zeitraum von mehreren Formationen bleibt die tektonische und metamorphe Gestaltung der moldanubischen Gebiete im Raume der Intrusionstektonik im Süden des variszischen Orogens ein einheitlicher in sich geschlossener Vorgang, der dynamisch wohl zu trennen ist von der durch tangentialen Schub bewirkten Orogenese im Stile der Wandertektonik.

Mit den unscharfen Perlgneiskontakten nähert man sich bereits dem Bereiche der großzügigeren Stoffbewegungen, die als Migmatitis und Arteritis in Erscheinung treten und die vor allem durch die erfolgreiche Forschertätigkeit von I. SEDERHOLM in ihrer wunderbaren Vielgestalt bekannt geworden sind.

IV. Migmatite und Intrusionstektonik, periplutonische Regionalmetamorphose

Die Grenze von Ober- und Unterbau als Grundlage der tektogenetischen Hypothesen

Ein kürzlich erschienener Bericht über die Gesamterscheinung der Migmatite von C. E. WEGMANN (1935) ist besonders wertvoll und lehrreich, da er eine reiche Erfahrung aus den kennzeichnenden Gebieten mit wetiblickender gedanklicher Durchdringung des Gegenstandes verbindet.

Wie er darlegt, hat an diesen höchst gesteigerten Durchdringungsvorgängen neben der Imprägnation und Inbibition von Schmelzen und Lösungen auch Stoffwanderung und Stoffaustausch durch Diffusion den größten Anteil; wobei der Platz für die vordringenden und erobernden Stoffe nicht durch Einpressen der Lösungen oder Schmelzen, sondern gleichsam Schritt für Schritt, sei es durch Weglösen von Stoffen, durch Auflockerung oder auch durch Diffusion an einem Intergranularfilm unterstützt durch wirksamere Kristallisationskraft geschaffen werden kann. Die allgemeineren physikalischen Bedingungen, das Konzentrationsgefälle, vielleicht auch das elektrische Gefälle, leiten den Ionendurchgang und die Art der Berührungsflächen bewirkt das gelegentliche Festsetzen der Stoffe.

Aus den Zonen der Migmatitis und Anatexis leitet ein allmählicher Übergang mit abklingender Mobilisation der Stoffe in das

Gebiet der regionalen Katametamorphose, die eben durch diese Stellung die Bezeichnung der periplutonischen Regionalmetamorphose verdient.

In der allgemeinen Erkenntnis, daß metamorphes und nicht-metamorphes Gebirge auf der Erde großzügig voneinander gesondert auftreten, ist auch schon die Trennung des kristallinen Unterbaues von dem Oberbau gegeben, wie sie von WEGMANN durchgeführt wird. In eine Übergangszone zwischen beiden verlegt er die Regionalmetamorphose.

Die Zonen, in denen supra- und infrakrustale Bestandmassen ineinander verschwimmen, werden nicht überall in gleicher Tiefe angetroffen; aber von hier aus vollzieht sich bereits die großzügige Gliederung in zweierlei nach Tektonik und Metamorphose voneinander zu unterscheidende Erdräume; die eine, die räumlich viel ausgedehntere Gruppe verbindet eine vorwiegend thermische Metamorphose mit den Charakteren der Intrusionstektonik, in der anderen herrscht die kinetische oder deformativ Metamorphose als Ausdruck der beherrschenden wahrhaft orogentischen Wandertektonik. Die beiderlei Gebiete bleiben auch bis zu dem völligen Ausklingen der Metamorphose in den nicht metamorphen Bau klar voneinander geschieden. Die Grenze zwischen Oberbau und Unterbau im Sinne von WEGMANN fällt nicht mit der zwischen Supra- und Infrakruste zusammen; ein Teil der Suprakruste ist stets in metamorphem Zustande in den Unterbau aufgenommen worden.

Der unter dieser Grenze gelegene Unterbau wird aufzusuchen sein, damit die großzügigere Tektogenese vom tiefsten Grunde aus erfaßt werde. Aber in die beiden Hauptgruppen der Regionalmetamorphose ist noch eine kaum übersehbare Fülle von besonderen Einzelvorgängen eingegliedert; sie bewirken die Vielgestalt der Grundgebirgsgebiete überhaupt und die besonderen Eigentümlichkeiten, durch die sich die einzelnen großen Grundgebirgsgebiete mehr oder weniger kennzeichnend voneinander unterscheiden.

Es kann z. B. geschehen, daß mit dem Einsatze neuerlicher tektokinetischer Bewegungen die „Aktivierung“ im Sinne von WEGMANN den erstarrten alten Sockel, d. i. den früher geschaffenen Unterbau, ergreift und durch Mylonitisation und Migmatisierung Teile des bestehenden, nicht metamorphen Oberbaues für einen umgeschaffenen Unterbau erobert. Es kann geschehen, daß der Unterbau mit oder ohne tangentialen Antrieb in die Antiklinalen

des Oberbaues aufsteigt und mit seiner Migmatitfront diapirartig in den Oberbau vordringt (WEGMANN 1930). Dazu kommen noch die vielerlei Einflüsse, von denen die Mächtigkeit und Gestalt einer „Übergangszone“ abhängt, die von WEGMANN einer Zone der Regionalmetamorphose gleichgestellt wird. Unterschiedlich abgewandelt zeigt sich ein kinetisch metamorphes Gebiet, je nach dem Grade der Beschleunigung und dem Ausmaße des Tiefenschurfes einer Tangentialverkürzung mit allen Übergängen von der Mylonitisation bis zum makroplastischem Zustande, der sich in stetigen Faltenbögen abbildet. Zu den Vorgängen, die das Gesamtbild vervielfältigen, die z. T. schon in der Art des Verbandes zwischen Oberbau und Unterbau, in den Formen der Aktivierung oder einer Tektogenese und des Vorgreifens der Migmatitfront durch den erstarrten Sockel und in den nicht metamorphen Oberbau gelegen sein können, kommen noch andere, die es bewirken, daß der Unterbau, wo er weiträumig zutage tritt, die am buntesten gemischten Strukturen und den wunderbarsten Reichtum an Mineralgesellschaften der Beobachtung darbietet. Auch die letzten Erstarrungsphasen sind hier angeschlossen und als die letzten Differentiate sind die, nach ihren jeweiligen Sonderschicksalen stofflich aufs mannigfaltigste abgewandelten Erstarrungskörper nebeneinander gelagert.

Nicht nur mit Bezugnahme auf die Ungleichartigkeit der Teile innerhalb eines Gebietes kann man von einer besonderen Vielgestalt des tiefen Grundgebirges sprechen; sie zeigt sich auch in den Eigenarten, man kann fast sagen: in der Einmaligkeit einzelner großer Hauptgebiete. Schon in den kristallinischen Achsen einzelner Faltengebirge, wie der Kaledoniden, der Alpen und der Varisziden, entstehen aus der Art der beteiligten Gesteine, aus der Breite und Tiefe der Gesamtanlage, aus der Art und Stärke des Bewegungsantriebes recht verschiedene Bauwerke (F. E. SUESS 1933).

In dieser Mannigfaltigkeit des tiefen Grundgebirges mag es zum guten Teile begründet sein, daß die Versuche, die Gesamtheit der Vorgänge einheitlich zu überschauen, nach so sehr verschiedenen Richtungen auseinanderstreben. Die Auffassung des Einzelnen wird durch das beherrscht, was er in einzelnen Gebieten erfahren hat und was er, als Einzelner, dem unerschöpflichen Schrifttume entnehmen konnte.

V. Periplutonische und enogene Regionalmetamorphose in ihrer tektonogenetischen Abhängigkeit

Neukristallisation und Umwandlungsstufe unabhängig vom bestehenden Gefüge

In bezug auf die Metamorphose sei für diese Betrachtung das Folgende nochmals hervorgehoben: Jede Metamorphose ist im Grunde Neukristallisation und beruht damit auf molekularer Mobilisation; als solche stellt sie einen neben der Deformation selbständig verlaufenden Vorgang dar; wenn sie auch durch die Deformation angeregt worden sein mag. Mit welchem Grade der Deutlichkeit sie sich neben der Deformation behauptet, ist eine Frage der Dimension, in ihren Verhältnissen zu den sie allenfalls überlagernden rupturellen Umformungen, zur Sammelkristallisation aus den diffundierenden Stoffen in der von BECKE gekennzeichneten Kristalloblastese mit mehr oder weniger scharf abgehobenen Porphyroblasten. Die kristalloblastischen Strukturen können älteres rupturuelles Gefüge, je nach den örtlichen Umständen, vollkommen überwältigt oder nur bis auf ungelöste protogene Bruchstücke — z. B. Turmalintrümmer in manchen Mesogneisen — aufgezehrt haben; sie können auch selbst von postkristalliner Zerstückelung ergriffen worden sein. Ich verweise insbesondere auf die Darstellungen von ESKOLA (1932, 1934) und von HARKER (1932); dort werden die beherrschenden Grundvorgänge der Metamorphose als Diffusion und Differentiation strenger definiert und in ihren vielfältig abgewandelten Wirkungsweisen geschildert.

Der Grundvorgang der Diffusion kann in der Form und Wirkungsweise jeder der sog. Tiefenstufen oder Umwandlungsstufen ebenso in nicht tektonisches, wie in wenig oder stark tektonisiertes und metamorphosiertes Gebirge eingreifen. So können Albitporphyroblasten ebenso in Biotitgneisen, wie in Tonschiefern als Neubildungen auftreten (s. oben S. 9) und wenig verformte Gerölle eruptiver oder sedimentärer Herkunft in einer Grundmasse mit dem Mineralbestande der Katazone bezeugen, daß auch hier dem Stoffumsatze bei Wärmezufuhr keine wesentliche Umformung der Gesteinsmassen vorangegangen ist, wie z. B. in den ladogischen Konglomeraten bei Tamerfors in Finnland (SEDERHOLM, Part II, 1923, S. 68). Selbst so zarte Texturen wie die der glazialen Bänder-tone sind, trotz der tiefgreifenden Katakristallisation mit Porphyro-

blasten von Staurolith, Andalusit und Cordierit an den Rändern der dunklen Warvenstreifen im Vorkambrium Finnlands erhalten geblieben (ESKOLA 1932b).

SEDERHOLM hat u. a. auch die wiederholte und weitausgreifende Aufschmelzung von Gesteinen sedimentärer und eruptiver Herkunft in der Nachbarschaft der großen Granitstöcke Südwest-Finnlands in allen Einzelheiten anschaulich geschildert und dabei ausdrücklich hervorgehoben, daß diese „Ultrametamorphose“ vor allem ein chemischer Vorgang ist und daß Dynamometamorphose daran nur geringen Anteil hat (1923, S. 149).

Zweierlei Erwärmungsvorgänge und zweierlei Regionalmetamorphose

Die Temperaturerhöhung als Grundvoraussetzung für eine neu einsetzende Sammelkristallisation durch Diffusion in einem Gebirgskörper kann auf zweierlei Weise veranlaßt werden; entweder von oben her, durch den Rückstau des Wärmeabflusses zur Oberfläche im Gefolge einer Dickenzunahme der überlagernden Massen, oder von unten her, durch das Aufsteigen großer, Wärme bringender, Magmakörper aus der Tiefe. Beide Vorgänge können insofern miteinander verbunden sein, als die Platznahme großer Batholithen eine gewisse Raumfülle und Mächtigkeit des intrudierten Gebirgskörpers voraussetzt und ein ausgiebigeres Ansteigen des Magmas erst einer entsprechenden Dickenzunahme der Kruste nachfolgen kann.

Wenn sie auch nebeneinander und gelegentlich auch miteinander verbunden auftreten können, so erweisen sich doch die beiderlei Vorgänge in ihrem Wesen und in ihrer ersten Anlage voneinander unabhängig und als Begleiter von zweierlei großtektonischen Vorgängen. Das Verhältnis ist vergleichbar dem zwischen fluvialer und glazialer Erosion, die im Wesen verschiedene Vorgänge bleiben, wenn sie auch in der Natur oft schwer trennbar ineinandergreifen. An sie schließen sich auch die zweierlei Grundfazies der Gesteinsmetamorphose, die seit langem als gegensätzlich voneinander unterschieden werden und von denen die eine dem Bereiche der vorwiegenden Gesteinsumformung oder des Streß, die zweite dem vorwiegenden Wirkungsbereiche der erhöhten Temperatur zugewiesen wird. Hier wird nun fernerhin der Nachweis gebracht, daß die zweierlei physikalischen Grundformen der Meta-

morphose mit zweierlei Grundformen der Tektogenese regional verbunden sind; was sie in dieser Hinsicht bedeuten, ist bereits durch die Gegeneinanderstellung der deformativen Regionalmetamorphose und der thermischen Regionalmetamorphose ausgedrückt worden.

VI. Bildungsbedingungen der enrogenen Regionalmetamorphose

Unter der Deckenlast mit Deformation und nicht durch Versenkung in die „Geosynklinale“

Ausgiebige und verhältnismäßig rasche Verdickung der Erdkruste geschieht in gewissen Zonen durch weit ausgreifenden Deckenschub. Das Ansteigen der Geoisothermen unter der Decke ist auch hier die unerläßliche Vorbedingung der Mobilisation der Stoffe und der Metamorphose. Aber nach allgemeiner Erfahrung wird die Mobilisation der Stoffe durch die mit dem Aufschube verbundene durchgreifende Umformung der Gesteine lebhaft angeregt und kann noch bei verhältnismäßig niedrigeren Temperaturen wirksam werden. Die Eröffnung von Zirkulationsbahnen befördert das Wandern der Lösungen, mit der Verlagerung von Druck und Lösungspunkten bieten sich auch neue Absatzmöglichkeiten in toten Räumen. In bezug auf die chemische Reaktionsfähigkeit verhält sich das verformte Gestein zum nicht verformten, wie die umgerührte Lösung zur stehenden. Die Vorgänge sind den Wirkungen des sog. Streß, einschließlich des kennzeichnenden Mineralbestandes zuzuordnen.

Einordnung in den Deckenbau

Mit den Gesteinen der sog. Epi- und Mesostufe nach dem Systeme von BECKE und GRUBENMANN beherrscht diese Art der Metamorphose vor allem die Zone des metamorphen Falten- oder Deckenbaues; d. i. die „belastete“ oder überfahrene Zone in der dynamischen Dreiheit der voll entwickelten Orogene ist (s. S. 10). Hier wird die „Mobilisation“ noch wesentlich unterstützt durch die Gegenwart von Wasser in der Nähe der Oberfläche und durch die Anregung des Stoffaustausches in dem Netz von neu eröffneten Zirkulationsbahnen, das den verformten Gesteinskörper oft in der ganzen

Stufenreihe von den großen Schubflächen bis zur feinsten Auflockerung des Kristallgefüges durchsetzt. Aus den Mineralbildungen schließt NIGGLI, daß die alpine Dislokationsmetamorphose größtenteils bei Temperaturen um 200°, und vielleicht sogar darunter, stattgefunden hat; nur an besonders günstigen Stellen hätte sie 300° und vielleicht 500° erreicht. (Die Gesteinsmetamorphose, I, 1924, S. 205.) Beispiele dafür, daß Feldspäte bei sehr niedriger Temperatur abgesetzt werden können, hat DALY zusammengestellt (1917).

Hier sei nochmals darauf hingewiesen, daß die nach ihrer Verbreitung den Streiß zugeschriebenen Mineralien, wie Staurolith, Muskovit und Disthen, mit Vorliebe nicht an den Druckstellen, sondern in den toten Räumen der Druckfalten oder postkristallin als Porphyroblasten im Gesteinsgefüge angesiedelt sind. Das Wesen der Sammelkristallisation bleibt bewahrt, wenn der Kristall, z. B. Granat, das Grundgewebe umwächst, und ebenso wenn er, wie häufig der Disthen, mit der wirksamen Kristallisationskraft der spaltbaren Minerale die fremden Stoffe ausscheidet. Die ungleiche Stabilität und Löslichkeit führt zu einer Differentiationsfolge, in der im allgemeinen die Tonerdminerale einer früheren und die Alkaliminerale einer späteren Generation angehören. Auf die postkristallin im Grundgewebe und an Querklüften und Gleitflächen angesiedelten Muskovite und auf die das ältere Gefüge umschließenden Albite ist oben hingewiesen worden. Dabei ist die Mobilisation des Kaliglimmers, die „Deformationsverglimmerung“ oder „Muskowititis“, deutlicher an die Bildung von neuen Gleitbahnen gebunden. Bei der Albitisation scheint das nicht der Fall zu sein; trotzdem sie im Gefüge als das Ergebnis einer reinen Diffusion zu erkennen ist, bleibt sie doch, wie die regionale Erfahrung lehrt, im großen ganzen kennzeichnend für das tektonisch überfahrene Gebirge.

Diese Bewegungen der Alkalien bleiben endogen im Sinne von ESKOLA für größere tektonische Einheiten; sicherlich auch für solche, die dem Umfange alpiner Deckengruppen gleichkommen. Sie können ebenso im unverletztem Gebirge auftreten, wie auch als Schlußphase irgendeiner allgemeineren Metamorphose. Hierher gehören z. B. die Muskovitporphyroblasten in den Roten Gneisen des Erzgebirges, im Bitteschen Gneis und in den skandinavischen Trondhjemiten. Bezeichnend ist es auch, wie in den Ostalpen die Albitisation der abwechselnden und häufig polymetamorph durcheinandergreifenden

Kristallisationen in den tiroliden Grundschollen, wo sie auftritt, zumeist als besonderer Vorgang in einer Schlußphase angeschlossen ist.

Die Erwärmung überdauert die Durchbewegung, daher posttektonische Kristallisation

Mit der Einordnung der Hauptzone der Umformung als belastete Zone in die dynamische Dreigliederung des Orogens ergibt sich auch, daß die Verschleifung unter der Deckenlast und der Anstieg der Temperatur Teilglieder des gleichen Vorganges sind. Je nach dem Grade der Beschleunigung, mit der sich der Vorgang vollzieht, und je nach dem Überwiegen des einen oder des anderen der beiden Faktoren ergeben sich recht verschiedene Abstufungen und Abarten der für diese Zone kennzeichnenden Epi- und Mesokristallisationen. Obwohl die beiden Vorgänge, Erwärmung und Durchbewegung, dem gleichem tektonischem Großgeschehen zugeordnet sind, halten sie in ihrem zeitlichen Verlaufe miteinander nicht gleichen Schritt. Es sei hier nur darauf hingewiesen, daß die Erwärmung einem allmählich ansteigendem und abklingendem Zustande, die Verformung aber einem mehr oder weniger episodisch zergliedertem und der Zeit nach enger umgrenzten Vorgang darstellt. Mit dem Stillstande der Bewegung erfolgt nicht zugleich das Rüksinken der hochgewölbten Geoisothermen. Die zurückgehaltene Wärme ermöglicht das posttektonische Fortwirken der Diffusion und damit auch die in regional metamorphen Gesteinen so allgemein verbreitete posttektonische Kristallisation. Von ihr hat schon BECKE erklärt, daß sie nicht einem im allgemeinen tektonischen Sinne von der Deformation abzutrennenden Vorgang zugehört; wenn sie auch eine unterscheidbare Phase darstellt, so bleibt sie doch notwendig mit der unmittelbar vorangegangenen Deformation verbunden (s. auch Intrusionstektonik 1926, S. 14).

Insofern die Albitisation und die Verglimmerung und diesen nachfolgend auch die Bildung von Biotit und anderen Mineralien im Tauernfenster und an seinen Rändern quer über die verschiedenen Decken und unabhängig von deren Grenzen nach oben hin allmählich abklingen, kann man für die von unten her durchgreifende Metamorphose den Vergleich TERMIERS mit dem durchsaugendem Ölfleck verwenden. Dennoch ist diese Art der Mineralisation tektonisch

bedingt und an das überfahrene und verschleifte Gebirge gebunden und das Bild eines allmählichen Ausklanges nach oben erhält sich auch in den unter der Überdeckung zur Schwelle aufgebogenen Isothermen.

Noch innerhalb der Zone des metamorphen Faltenbaues, im Stau des Wärmestromes unter der erzeugenden Scholle während der Orogenese, kann die Metamorphose bis zu dem ungleich einsetzendem Erscheinen der Porphyroblasten von Biotit und Granat, vielleicht auch von Stauroolith und Disthen gesteigert werden. Sie können natürlich in vorgebildete schiefrige Strukturen eindringen und sie nach verschiedenen Richtungen durchwachsen. Als ein kennzeichnendes Sonderglied dieser Entwicklungsstufe wird BECKES Floititfazies mit Biotit im Mineralbestande der Grünschiefer aus dem Pennin des ostalpinen Tauernfensters zu betrachten sein (BECKE 1913, S. 29). Auch die von CORNELIUS als Chrysobiotit unterschiedene Abart gehört hierher.

Weder in den Alpen, noch im Erzgebirge und auch nicht im moravisch-silesischen Bau war die Metamorphose gesteigert bis zum Auftreten von Sillimanit; wohl aber im Dalradian der schottischen Kaledoniden. Nach der Zonenfolge würde er in einen höheren Temperaturbereich gehören als der Disthen, aus dem er häufig — nicht immer — hervorgeht. Aber das Bildungsverhältnis zwischen den beiden Mineralien ist noch nicht aufgeklärt (s. HARKER 1932, S. 227). Doch ist wohl auch zu beachten, daß der Sillimanit durch sein häufiges — wenn auch nicht ausschließliches — Vorkommen auf Gleitflächen als Streßmineral gekennzeichnet erscheint; vielleicht in noch strengem Sinne als die Minerale, die wegen ihres regelmäßigen Auftretens in der durch Streßwirkung im großen geprägten Zone hierhergestellt werden, und bei denen aber, im Gegensatz zum Sillimanit, eine besonders bevorzugte Ansiedelung an Gleitflächen und überhaupt an stärker beanspruchten Stellen im Kleingefüge nicht wahrzunehmen ist (s. oben S. 23). Es wäre ein Streßmineral, das aus dem sonstigen eigentlichem Streßbereiche herausfällt und die örtliche Streßwirkung bis in die Katazonen begleiten kann.

Daß in den Plagioklasen der kristallinen Schiefer an Stelle der in Erstarrungsgesteinen herrschenden normalen Zonenstruktur ganz allgemein die inverse wahrgenommen wird, erklärt sich, wie auch HARKER hervorhebt, durch den unterschiedlichen Kristallisationsvorgang, der in Erstarrungsgesteinen bei sinkender, in kristal-

linischen Schiefnern bei steigender Temperatur vor sich geht. Im ersten Falle wird der schwerer bewegliche basische Anteil zuerst, im zweiten Falle wird er zuletzt abgeschieden. Es wird dabei auch zu beachten sein, daß überhaupt an der Mobilisation während der Metamorphose im allgemeinen nur relativ saure Plagioklasssubstanz teilnimmt.

Es scheint mir aber unentschieden, ob die Metamorphose durch den Stau des Wärmestromes unter der erzeugenden Scholle in der Zone des metamorphen Faltenbaues bis zum Einsatz der Migmatitis gesteigert werden kann. Für die Alpen kämen hierfür nur die eigentlichen penninischen Deckengruppen in Betracht. Das Kristallin der ostalpinen Decken, der Grisoniden und der Tiroliden ist zur Gänze voralpin angelegt und in verschiedenem Grade und zumeist wohl auch in wiederholten Zeitabschnitten alpin überarbeitet worden.

Reste protogener Katastrukturen im alpinen Grundgebirge

Trotz der über alle Deckengruppen unregelmäßig übergreifenden Albitisation und der sonstigen allgemeinen Überarbeitung (s. oben S. 16) sind doch daneben die Überreste der älteren Katastrukturen von der Art der Intrusionstektonik erhalten geblieben. Hierher gehören z. B. die von HAMMER (1926, 1929) beschriebenen Amphibolit- und Gneisgebiete aus den mittleren Ötztaler Alpen, zwischen

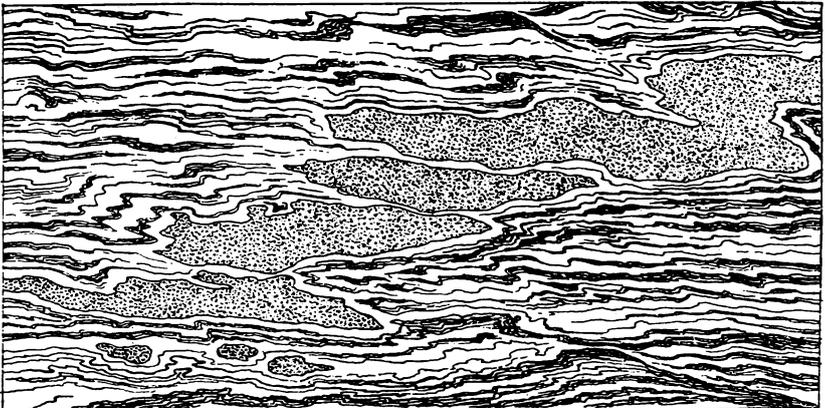


Fig. 4. Schollen dichten dunklen Amphibolites im gebänderten Amphibolit (Reste älterer Katastrukturen mesokinematisch verarbeitet) Loibiskogel, mittlere Ötztaler Alpen (Grundgebirge der tiroliden Decken) nach W. HAMMER.

dem Sulztale und dem Engadiner Fenster. In den postkristallinen Umwandlungsreihen von gefalteten Bänderamphiboliten zu massigen Amphiboliten, Eklogiten bis zu den gabbroiden Ausgangsgesteinen mit protogenen Resten von Peridot zeigen unruhig fließende Durch-

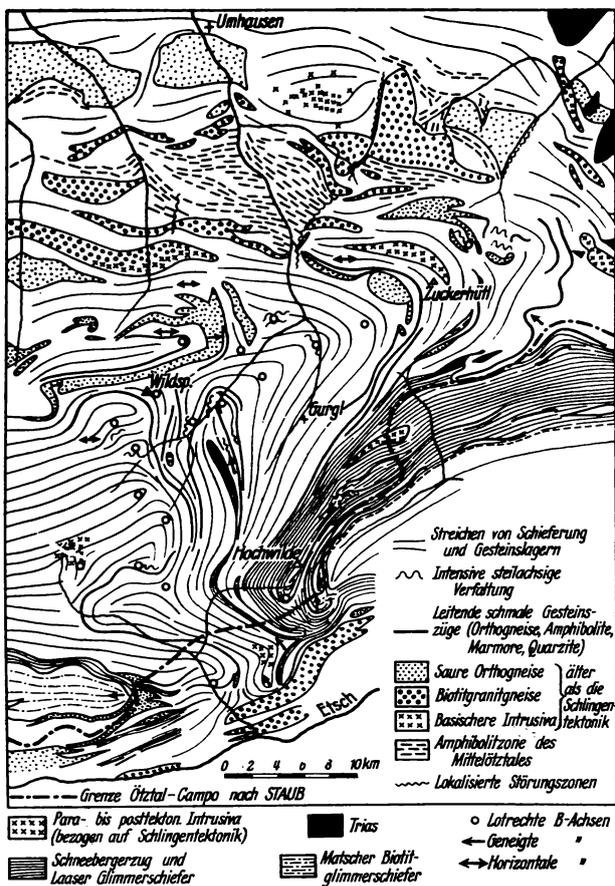


Fig. 5. Tektonische Übersicht des südöstlichen Ötztales und Stubai-
Alpen (Schlingentektonik vorherrschend) nach O. SCHMIEDEGG.

bewegung gleich der in der Katazone mit Intrusionstektonik (Fig. 4). Auch die von Graf SCHMIEDEGG (1933, 1936) als „steilachsige Schlingentektonik“ beschriebenen Strukturen werden hierher zu rechnen sein (Fig. 5).

Der Verfasser stellt in Aussicht, daß er den Bezug der steilachsigen Schlingentektonik zur Intrusionstektonik bei einer anderen

Gelegenheit erörtern werde. Einiges Allgemeineres kann jedoch hier gesagt werden; das ermöglicht die im Gegenständlichen so klare Darstellung. Die geschilderten Gebiete im westlichen Südtirol zwischen dem Ultental und dem Tonalepaß und in Osttirol, in der sog. Deferegger Schlinge zwischen dem Tonalit des Rieser Ferner und dem Toblacher Pfannhorn, sowie auch die Gebiete der Schlingentektonik in den Öztaler Alpen und in anderen Teilen der Ostalpen gehören zum Grundgebirge des oberostalpinen oder tiroliden Deckenstockwerkes; und somit zu dem Kristallin voralpiner Entstehung, das durch den Aufschub über das Pennin gelagert worden ist. Trotz der tiefgreifenden späteren Einflüsse sind hier kennzeichnende Merkmale einer ersten und ältesten Grundanlage erhalten geblieben. Das konnte nur in der „lastenden Scholle“, in den oberen herangetragenen Bestandmassen des Gebirges geschehen. Der Schlingenbau wird von SCHMIEDEGG als vorkristallin erkannt (S. 147). Eine wohlerhaltene Katakristallisation, die nach dem äußeren Bilde als nachtektonisch aufgefaßt werden kann, ist auch kennzeichnend für eine ursprüngliche, noch unverletzte periplutonische Metamorphose, die der Intrusionstektonik angeschlossen ist.

Das ganze ältere Gefüge ist nach Graf SCHMIEDEGGS Angabe mit dem alpinem Bau in NS-Richtung mehr oder weniger zusammengepreßt worden. Das Altkristallin soll dabei einen ursprünglichen Gewölbebau eingebüßt haben. Dagegen treten isokline Schuppen stärker hervor. Überlagernde Phyllite sind bei der Bewegung mitgenommen worden.

Auch wenn man es unversucht läßt, den ganzen Gebirgskörper in verfrachtete Decken zu gliedern, ergibt sich das großzügige Bild eines älteren überwältigten Schlingenbaues, der dem katakristallinen Bereiche der periplutonischen Metamorphose entstammt. Die kennzeichnende Unruhe, der schlingenförmige Verlauf der häufig steilgestellten Faltenzüge kann kennbar erhalten bleiben, auch wenn die eingeschalteten, vielleicht mit dem Bau genetisch zu verbindenden, granitischen Massen bereits zu Augengneisen verschleift sind.

Es ist zu bezweifeln, daß ein steiler Schlingenbau durch ein Nacheinander, durch eine Verbindung und eine Folge von Gesamtschüben aus verschiedenen Richtungen geschaffen werden könnte. Eine Pressung von außen her, wie sie den gestreckten Faltenbau der Orogene erzeugt, kann nicht irgendwelche Teile im Inneren eines mächtigen Paketes zum örtlichen Abbiegen und Ausweichen veran-

lassen. Dafür fehlen die mechanischen Voraussetzungen. Bei jedem tektonischen Anschub entsteht nach allgemeiner Erfahrung eine mit der Angriffsfläche gleichlaufende Parallelschichtung oder Faltung in umformbaren Gesteinspaketen. Ein steil gestelltes Parallelgefüge müßte zunächst an den Rändern zerpreßt werden, bevor die Umformung auf die inneren Teile des beanspruchten Gebirgskörpers übergreift. Es handelt sich hier ohne Zweifel um einen von der allgemeineren tangentialen Faltung grundsätzlich verschiedenen Vorgang; wie ja auch die sog. ptygmatische Faltung nicht durch eine Verengung des Raumes von außen her, sondern durch fließendes Ausweichen der Teile im Inneren des Gebirges geschaffen wird. Auch in der Schlingentektonik können nur von Innen her die ganze Masse ergreifende Formveränderungen, wie in der Intrusionstektonik, abgebildet sein.

Von größter Bedeutung für das Verständnis dieser Vorgänge ist die klare Unterscheidung der im Gesteinsgefüge übereinandergelegten Gesteinsgesellschaften verschiedener Stufen, wie sie sich im Mikroskope in dem Übergreifen von Neukristallisationen zugleich mit der Umstellung des Großgefüges erkennen läßt. Damit wird der Anschluß einer erkennbaren älteren Katakristallisation an die erste makroplastische Gestaltung des Baues und damit an die ursprüngliche periplutonische Regionalmetamorphose zu finden sein. Was hier über dem Orogen zutage tritt, ist als ein Randteil der unter der äußeren Zone regional ausgedehnten Unterlage aufzufassen. So weit er mit dem Vorrücken in die lastende Zone des Orogens selbst zerschuppt und zergliedert wird, kann er der durch die inneren rupturellen Verschiebungen angeregten bei niedrigeren Temperaturgraden ablaufenden Diffusion der Meso- und Epistufe ausgesetzt sein und damit streckenweise, in verschiedenen Graden von der enogenen Metamorphose ergriffen und von ihr auch völlig überwältigt werden (vgl. Profil Fig. 1, S. 11).

Es ist kaum denkbar, daß ein der steilen Tektonik mit Schlingensbau vergleichbares Großgefüge auf irgendeine Weise in einem nicht metamorphem sedimentärem Gebirge entstehen könnte.

Im übrigen genüge der Hinweis auf das Kristallin der Silvretta, wo die voralpinen Strukturen insbesondere durch die Geologen der Schule REINHARTS in Basel, BEARTH, SPAENHAUER, STRECKEISEN, WENK erkannt und mit vorbildlicher Klarheit beschrieben worden sind. Auch dort herrscht steilachsige Tektonik und Schlingensbau mit eingeschalteten älteren Intrusionen. Die transportierte Masse

trägt über Verrukano kaum oder nicht verändertes Mesozoikum und die alpine Überarbeitung ist auf Scherflächen und Ruschelzonen beschränkt.

Im Gegensatz zum Westen ist das voralpine Kristallin der tiroliden Decken schon an den Rändern des Tauernfensters am Brenner und dann insbesondere noch weiter im Osten, in den steirischen Bergen bis zur Koralpe und bis zum Bacher in weit höherem Grade alpin überarbeitet worden. Darauf weisen schon die reichlichen zerdrückten Pegmatite, sowie die große Verbreitung der Albitisierung und der tiefgreifenden Deformationsverglimmerung (s. S. 15). Die Großtektonik läßt dies auch erwarten; denn auf diesem Kristallin liegt nicht unverändertes Mesozoikum; dagegen ist es von den paläozoischen Decken der Gebiete von Graz und Turrach überfahren worden.

Trotz der auf der petrographischen Fazies beruhenden Ähnlichkeit kann doch die Gesteinsgesellschaft des Grundgebirges der tiroliden Decken nicht der des Moldanubikums der böhmischen Masse gleichgestellt werden und das zentralalpine Grundgebirge ist vollkommen von dem des variszischen Baues abzutrennen (F. E. SUESS 1931). Aus den Vorkommen, wie die angegebenen, darf nicht auf einen Übergang der Mesometamorphose zur Migmatitis in der Tiefe des Orogens oder in der Geosynklinale geschlossen werden. Was sich hier zeigt, sind die noch deutlich erkennbaren Überreste der Strukturen des voralpinen Kristallins, eines außerorogenen Grundgebirges, dem nach seiner Verbreitung die eigentliche Ubiquität im Untergrunde zukommt.

VII. Bildungsbereich der periplutonischen Regionalmetamorphose

Allgemeine Merkmale. Verband mit Intrusionstektonik

Bei einem guten Teile der Gebiete mit reiner und typischer Katakristallisation läßt sich erkennen, daß sie die Wärmezufuhr von unten her bei verhältnismäßig geringer Bedeckung empfangen haben. Die Größe und Vielgestalt der hierher gehörigen Gebiete, die zumeist noch verhältnismäßig wenig durchforscht sind, verbietet es noch allgemeinere Urteile auszusprechen. Über die in Betracht kommende Art der Diffusion, die begleitenden Venite und den Übergang zur Migmatitis ist oben bereits einiges gesagt worden.

In der weiteren, einer unmittelbaren magmatischen Zufuhr und einer Auflösung entzogenen Umgebung des Magmaherdes herrscht eine regional ausgedehnte „spannungslose Abbildungskristallisation“ (SANDER) mit dem Mineralbestande der Katazone. Es wird sich oft in den Gesteinen nicht feststellen lassen, ob das ursprüngliche, in die gegenwärtige Struktur übernommene Parallelgefüge sedimentärer oder tektonitischer Art gewesen ist.

Die klare und reine Katakristallisation ohne Anzeichen einer durch wechselnde Spannungen bewirkten Polymetamorphose ist schwer vorstellbar ohne die allgemeineren Charaktere der Intrusionstektonik. Sie erscheint in Gebieten, in denen zugleich auch schon die große Ausdehnung der granitischen Körper auf die Wärmezufuhr vom Magma her hinweist. Gegen die Tiefe zu ist der Abschluß eines solchen Gebietes, dessen Kristallisation allein auf Temperaturerhöhung beruht und das, so wie das Moldanubikum, frei geblieben ist von irgendeiner späteren tektonischen Veränderung, nicht anders denkbar, als durch eine Zone der Migmatitis und Anatexis am Rande der tiefer liegenden Wärmebringer. Diese Überlegung wird nicht beeinflußt durch die verbreiteten Granite mit nicht migmatitischem, scharfrandigem Hornfelskontakt im metamorphen Gebirge. Als die höher ansteigenden Nachschübe werden sie der Beobachtung leichter zugänglich; durch sehr lange Zeiträume können sie die Sippenmerkmale der ersten intrusionstektonisch wirksamen Magmakörper bewahrt haben (s. oben S. 38).

Außerorogenetische Richtungen der Intrusionstektonik

Indem die Batholithen, hier, im Gebiete der Intrusionstektonik nach oben hin Raum gewinnen, müssen die suprakrustalen Gesteinsgruppen seitlich ausweichen; das zeigt sich in dem Bestreben, das Streichen der Gesteinszüge den Umrissen der Batholithen großzügig anzupassen.

Die Zone der Intrusionstektonik ist nicht dem „Unterbau“ im Sinne von WEGMANN (1935, S. 334) gleichzustellen. Zum Begriffe des Unterbaues gehört ein größerer Inhalt. Wie WEGMANN selbst hervorhebt, enthält er Teile verschiedenartiger tektonischer Prägung von ungleichem Alter; dies vereinigt sich nicht mit dem strengen Begriffe der reinen und im wesentlichen unverletzten Intrusionstektonik.

Einflüsse verschiedener Art beteiligen sich an der, auch von WEGMANN hervorgehobenen, Abnahme der gerichteten Bauelemente

in der Richtung auf den Unterbau (1935, S. 449); demgemäß ist auch WEGMANN zuzustimmen, wenn er meint, daß bauliche Unauflösbarkeit nicht als charakteristisch für den Unterbau hinstellen sei. Auch in bezug auf die Gebiete der Intrusionstektonik im besonderen habe ich selbst darauf hingewiesen, daß älteres Streichen in ihrem Raume noch mehr oder weniger deutlich erhalten geblieben sein kann. Zu den Merkmalen des Moldanubikums gehört allerdings das Fehlen einer durchgehenden und scharf betonten Streichungsrichtung, wie sie für die durch tangentialen Schub geschaffene Wandertektonik kennzeichnend sind, und es gehört zum Wesen der Intrusionstektonik überhaupt, daß der durch die Umkristallisation bewirkte makroskopische Fluß der Gesteine das ältere Bauwerk zu zerstören und durch ein anderes, das sich den durch die Platznahme der Batholithe geänderten Raumverhältnissen anpaßt, zu ersetzen bestrebt ist. Zahlreiche im einzelnen viel gewundene Bänder von zumeist graphitführendem Marmor vereinigen sich für den Blick über das Ganze zu einem breitem und vielfach unterbrochenem Zuge der aus der Gegend von Deutsch-Brod über Drosendorf bis Krems und Pöchlarn an der Donau auf eine Strecke von mehr als 150 km verfolgbar bleibt. Auch er begleitet im großen ganzen die unregelmäßige Grenze des im Westen benachbarten Granitstockes und erweist sich damit auch abhängig von der Intrusion. An den Beispielen von Spitz und von Ungarschitz ist oben gezeigt worden, daß diese Züge vormetamorph nicht orogen gefaltet gewesen sind (siehe S. 35). Ähnlich verhalten sich die Migmatite des Pellingebietes in Finnland zu einem älterem seichtem Faltenbau (siehe unten S. 44).

Periplutonische Regionalmetamorphose nicht gleichbedeutend mit abyssischer Metamorphose

Für das Verständnis der großtektonischen Beziehung zwischen der periplutonischen und der enorogenen Regionalmetamorphose ist die Frage nach ihrer Tiefenlage von grundlegender Bedeutung. Die beiden sind in der Erdkruste nicht untereinander, sondern nebeneinander gestellt. Dies wird klar werden, wenn einiges Bezeichnendes hier nochmals hervorgehoben und vom regionalem Gesichtspunkte betrachtet wird.

WEGMANN sagt ausdrücklich, daß der Unterbau nach seiner Auffassung verschieden hoch und bis in sedimentäres Gebirge aufsteigen kann. Er versteht darunter allerdings nicht nur Grund-

gebirge vom Charakter der Intrusionstektonik. Nur durch strenge Scheidung der beiderlei metamorphen Gebiete im Unterbau läßt sich ihr Nebeneinander erkennen. Neuerdings will ich darauf hinweisen, daß die moldanubischen Granite in einer langen Kontaktzone den ganz seichten, nicht metamorphen Bau des Barrandien berühren. Die wenig weit getriebenen Falten und nach verschiedenen Richtungen gewendeten Überschiebungen können keiner orogenen Anlage zugeordnet werden. Die moldanubischen Granite zeigen sich dadurch offenkundig als außerorogen. Nach den neueren Untersuchungen von EBERT (1935) berühren die Lausitzer Granite mit ihrem Außenrande das nicht metamorphe Paläozoikum mit einem Saume von Cordierithornfels; an der Innenseite, gegen SW, aber ist die Kontaktwirkung bis zur Bildung von Veniten, Migmatiten und Hybridgesteinen gesteigert. Auch hier kann von einer besonderen Tiefenlage nicht die Rede sein. Auch die größeren posttektonischen Granitstöcke des Adamello und von Bergell in den Alpen sind nicht in die Achse des viele Kilometer hoch getürmten Orogens, sondern in den verhältnismäßig seichten Faltenbau der Dinariden eingedrungen, und wenn auch im Bergeller Massiv noch Anklänge an Migmatitis angegeben werden, so ist doch wahrzunehmen, daß sie keineswegs aus der orogenetischen Tiefe mit der zu den höchsten Graden gesteigerten Metamorphose herkommen, sondern daß ihr eigentliches Ursprungsgebiet im Süden der steilen Wurzeln und in dem seichten Falten der Dinariden gelegen ist, von wo aus sie posttektonisch und unabhängig von der eigentlichen Orogenese nach Norden vorgedrungen sind.

Über die durch SEDERHOLM berühmt gewordenen Migmatitgebiete westlich von Helsingfors ist noch weitere genauere Auskunft von WEGMANN zu erwarten. Da aber in den Wirtgesteinen der Migmatite, wie SEDERHOLM ausdrücklich betonte, frühere Dynamometamorphose fehlt und darin auch unveränderte Vulkanite enthalten sind, können auch diese Gebiete nicht einem orogenem Tiefbau zugehören und ein vorhandener Faltenbau konnte nicht weiter getrieben worden sein, als etwa der des Barrandien oder der Dinariden in den Südalpen.

Übereinstimmend mit der Wahrnehmung an örtlichen Kontakten, daß die migmatitbildenden Vorgänge durch Batholithen von entsprechendem Umfange bis in den seichten nicht metamorphen Gebirgsbau emporgetragen werden können, weist auch die regionale Verbreitung der großen Magmakörper außerhalb der Orogene

darauf hin, daß Intrusionstektonik und die ihr angeschlossene periplutonische Regionalmetamorphose nicht entsteht durch Untertauchen eines Krustenstreifens in eine orogenetische Geosynklinale, sondern gleichsam durch unregelmäßiges flächenweises Anätzen der Suprakruste im regionalen Kontakte mit der unterlagernden Magmafläche.

VIII. Magma und Orogenese

Verschiedene Stellung der Gneisgewölbe, keine „geosynklinalen“ Lakkolithen

Die Vorstellung von den in die Phasen der Gebirgsbildung eingegliederten Eruptionen beruht weniger auf den die jüngeren Gebirgsketten begleitenden Vulkanen als auf den tieferen, metamorphen Faltengebirgen zugeordneten Gneiskernen nach Art der alpinen Zentralgneise. Aber sie verliert ihre wesentlichste Stütze schon durch die von A. HEIM vertretene Erkenntnis, daß die Konkordanz über dem Dache solcher Gneisgewölbe nicht durch syntektonische Intrusion, sondern als „verlagerte Konkordanz“ durch Deckenschub geschaffen worden ist. Daran nimmt auch die Erkenntnis bedeutsamen Anteil, daß das anscheinende Fließgefüge

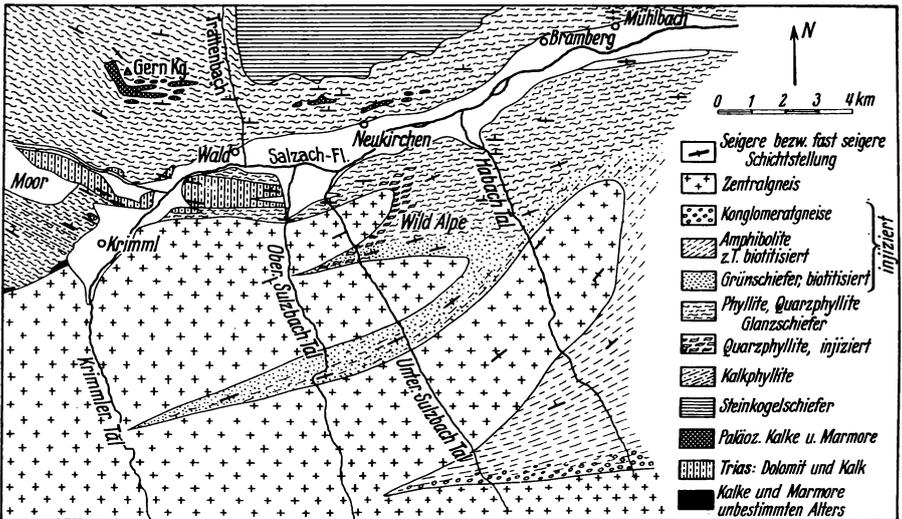


Fig. 6. Skizze des Nordostendes des Groß-Venedigermassives (mit den gegen die Schieferhülle mit Intrusivkontakt austreichenden Gneiszungen) nach L. KÖLBL.

durch Umformung im erstarrten Gesteine entstanden ist. Ferner ist die passive Aufnahme der bereits erstarrten Gneisgewölbe auch noch daraus zu erschließen, daß sie in verschiedenen Orogenen dem Gesamtbau in verschiedener Weise zugeordnet und nach ihrer tektonischen Rolle einander nicht gleichzustellen sind (S. 11, Fig. 1).

Die Zentralgneise der Alpen sind, wie KÖLBL (1932) gezeigt hat, im nördlichen Venedigerabschnitte mit lappenförmig vorgreifenden Umrissen in den werdenden penninischen Faltenbau eingedrungen. In einer späteren Phase sind sie von den Decken überschritten und verschiefert worden. Nach ihrer Gauverwandtschaft dürften sie demselben großen Hauptherde entstammen, wie die postalpinen Tonalite des Adamello und die Bergeller Granite an der Tessiner Wurzelzone. Im Sinne der hier vertretenen Anschauung wären sie als Vorgriffe aus den Magmaherden unter der erzeugenden Scholle in einem früheren Abschnitte des alpinen Deckenschubes zu betrachten. Sicherlich waren sie mit ihrer Entstehung ein dem alpinen Orogene zugeordnetes, durch seine Dynamik miterzeugtes und später umgeformtes Glied¹⁾ (Fig. 6).

Das ist z. B. nicht der Fall bei den Gneiskernen der moravischen Aufwölbungen, des Thayafensters und des Schwarzawafensters; obwohl sie eine ganz ähnliche Stellung im Gebirgsbau einzunehmen scheinen wie diese, und wie sie durch konkordante Verschieferung mit einer Schieferhülle von gleicher metamorpher Fazies verbunden sind. Aber sie gehören nicht zu der Magmensippe in der erzeugenden Scholle, sondern zu der des Vorlandes. Es sind nicht die moldanubischen Granite, sondern die Abkömmlinge von Gesteinen, wie sie weiter im Osten, in der Brünner Intrusivmasse, außerhalb der Reichweite der erzeugenden Scholle, ihre Erstarrungsstruktur unverändert bewahrt haben. Nach ihrer tektonischen Stellung vertragen sie einen Vergleich mit den helvetischen Massiven der Westalpen. Aber bei geringerem Umfange sind sie in den Bau tiefer eingetaucht und daher zu vollkommeneren Gewölben verschleift worden (vgl. Fig. 1 S. 11).

Wenn auch die Gneise des Erzgebirges, entsprechend der im weiter ausgreifendem und mehrfach wiederholtem Deckenschub

¹⁾ Aber nicht syntektonisch im Sinne einer Umformung und Verschieferung während der Intrusion im nicht völlig erstarrtem Zustande.

geschaffenen Anlage, größere Mannigfaltigkeit darbieten und in vielfältigerer Wechsellagerung miteinander verknüpft sind, so kann man doch sagen, daß nach ihrer Stellung im Gesamtorogen die Roten Gneise des Erzgebirges den mesoverschieften Decken über den moravischen Batholithen verglichen werden können. Die Roten Gneise sind als Magmatite älter als der variszische Bau, sie sind so wie die Ränder der moravischen Batholithen und so wie die höhere Decke des Bittescher Gneises passiv mitbewegt worden. SCHEUMANN hat dies durch neue Nachweise belegt (1932). Als erkennbare Reste eines Kontakthofes an den zu Muskovitgneis verarbeiteten Graniten waren von mir die Grauwackenhornfelse an der Riesenburg bei Osseg und der sog. Metzsdorfer Glimmertrap betrachtet worden (Intrusionstektonik 1927, S. 26). Sie sind den Resten eines Kontakthofes zu vergleichen, die PRECLIK vom Rande des Thayabatholithen bei Nieder-Fladnitz beschrieben hat (1924, S. 182). Außerdem lehren auch die vereinzelt Lagen von Geröllgneis, daß hier ein dem Moldanubikum fremdes Gebirge in die Gneisgewölbe aufgenommen worden ist; denn im Moldanubikum ist, wie gesagt, alles klastische Gefüge durch die Umkristallisation aufgezehrt worden. Dazu kommen noch die bereits oben erwähnten paläogeographischen Gegensätze zwischen dem erzgebirgischem Gebiete und dem des Moldanubikums, auf die insbesondere A. WURM aufmerksam gemacht hat (1935). In diesem Zusammenhange verdient auch SCHEUMANN'S Angabe besondere Beachtung, daß in den Konglomeraten des thüringischen Ordovik die gneisigen Formen der Erstarrungsgesteine noch vollkommen fehlen (1932, S. 419).

Ein weiteres Eingehen auf die Unterschiede und Verwandtschaften der Strukturen könnte eine ausführliche Sonderarbeit beschäftigen.

Die Grundvorstellung über die Entstehung des metamorphen Gefüges durch Diffusion innerhalb des Gesteinskörpers wird maßgebend für die Auffassung des ganzen orogenetischen Geschehens. Die Zentralgneise der Alpen und ähnliche in der annähernden Achse des Gebirges gelegene Batholithen, wie die der moravischen Fenster und manche erzgebirgische Gneise, sind nicht syntektonisch aus der Tiefe einer Geosynklinale aufgequollen; sie sind in bereits erstarrtem Zustande überwältigt und als Glied der belasteten Zone in den werdenden Gebirgsbau aufgenommen worden. Die großen Verschiebungen bleiben das Primäre in der Tektogenese. Magmaaustritt kann dazukommen;

aber er gehört nicht zu dem eigentlichen Wesen des Vorganges. Er kann intratektonisch oder posttektonisch sein; ist aber nicht syntektonisch im eigentlichen Sinne eingedrungen und nicht synkinematisch erstarrt.

Da unter der aufgeschobenen Decke die Folge der Isothermen nach oben rückt, werden auch die innersten und tiefsten Teile in einer überschobenen Zone, gegebenenfalls auch in einer überwältigten Vortiefe, am stärksten erwärmt. Das Hinzutreten einer besonderen Quelle für Wärme- und Stoffzufuhr wird nach dem erkannten Grundsatz der Diffusion entbehrlich für die Erklärung des Gesteinsgefüges und der häufigen Steigerung der Metamorphose gegen das Innere der Deckengewölbe. Überdies sind, wie gesagt, auch Beispiele bekannt, in denen die Verteilung der metamorphen Fazies die Annahme einer zentralen Wärmequelle als Erreger der Metamorphose nicht zuläßt; bei denen die stärker durchbewegten höheren Decken eine „höher gradige“ Metamorphose mit größerem Korn und mit dem Mineralbestande einer „tieferen Umwandlungsstufe“ erworben haben. Als wunderbar klares und großartiges Beispiel können hier die grobschuppigen Granatglimmerschiefer des Moldanubikums über dem Bittescher Gneis und über den seidenglänzenden Phylliten und den kaum metamorphen Kalken der Kwetniza-Serie im moravischen Thayafenster genannt werden (F. E. SUSS 1912).

Pazifisches Magma unter der erzeugenden Scholle, Kammvulkane der jungen Kettengebirge

Der unverkennbare Zusammenhang zwischen Magma und Gebirgsbildung ist in anderem als dem üblichen Sinne zu erklären. Die Aufschlüsse in den älteren tiefer abgetragenen Orogenen weisen den Weg. Wenn, wie oben gesagt worden ist, die Intrusionen auch nicht in der eigentlichen Faltenzone, nicht in der die Sedimente sammelnden Vortiefe oder „Geosynklinale“, heimisch sind, so wird doch der Anstieg der Magmen durch den orogenetischen Hochstau mächtig angeregt. Hier an der Kante der lastenden Scholle und in einem anschließenden Streifen mit Zertrümmerung und Rückstau bricht das Magma hervor; den plutonischen Querdurchbrüchen an der steilen Wurzel in der Tiefe entsprechen nach ihrer Lage die den Kämmen junger Kettengebirge zusammenhängend oder unterbrochen, knapper oder unbestimmter angeschlossenen Zonen der oberflächlichen Durchbrüche (s. Fig. 1 S. 11).

Von dem, was an anderer Stelle (Geol. Rundschau, 1927, S. 167) angezeigt worden ist, soll in diesem Zusammenhange nur einiges über die Magmen als Begleiter von jüngeren Orogenen hervorgehoben werden. Der Vergleich lehrt, daß diesen die Magmen in der gleichen Stellung zugeordnet sind, wie in den bis auf den kristallinen Untergrund entblößten Bauten der Varisziden, Kaledoniden und Appalachen (s. auch Vergleichende Orogenstudien 1934). In den Anden der beiden Amerika, ebenso wie im iranischen, im burmanisch-malayischen Bogen, und in den asiatischen Inselkränzen quillt das Magma nicht aus der sog. Geosynklinale oder aus der belasteten Zone mit metamorphen Deckenbau hervor, sondern an der Grenze gegen die geschlossene Kontinentalmasse, deren hochgestauter und — wie z. B. in den südalpinen Dinariden — z. T. auch rückgefalteter Randsaum zur erzeugenden Scholle geworden ist. So liegt in den südamerikanischen Anden der Reichtum an tertiären und jüngeren Eruptionen nicht innerhalb der hochgefalteten Hauptanden mit der mächtigen mesozoischen Schichtfolge, sondern knapp an deren Ostrande und in den östlich angeschlossenen Brasilianen mit den besonders in der Puna von Atakama hochgestauten Bruchschollen, die das spärlichere Mesozoikum tragen (GERTH 1936). Die Anordnung im großen wiederholt sich in den Anden Nordamerikas. In beiden Gebirgen häufen sich in der weniger gestörten Schichtfolge des östlichen Geländes, d. i. im Raume der erzeugenden Scholle, auch die hypabyssischen Intrusionen mit den Musterbeispielen der Lakkolithen; ihnen folgen in beiden Gebirgen als letztes und als Abschluß die reichlichen posttektonischen Durchbrüche des undifferenzierten, basaltischen Magmas aus dem tieferen Untergrunde (s. Fig. 1, S. 11).

An der Konkavseite und im Inneren der großen Faltenbögen Japans, der Philippinen und des Sundaarchipels ist unter den reichlich aufbrechenden jungen Eruptionen auch bereits der kennzeichnende Dachteil einer Zone der Intrusionstektonik mit postmesozoischen, z. T. sogar jungtertiären Graniten bloßgelegt. Hier bietet sich ein erster Anlaß zur Berührung mit dem Werke von W. H. BUCHER „The Deformation of the Earth's Crust“ (1933). In den folgenden Aufsätzen wird noch wiederholt darauf zurückzukommen sein. Das Werk ist vor allem ausgezeichnet durch die gründliche Verarbeitung eines sehr umfassenden Stoffgebietes und durch die am Tatsächlichem, in reiner Induktion und — so weit als möglich — ohne theoretisierende Voreingenommenheit abgeleiteten Schlußfolgerungen. Diese werden, wenn sie allgemeinere

Geltung beanspruchen, als „Naturgesetzmäßigkeiten“ (Laws) und, wenn sie weniger gesichert erscheinen, als „Meinungen“ (Opinions) in knappen und bestimmten Sätzen festgelegt, an einer Reihe von Beispielen erläutert und zur Nachprüfung an dem von anderwärts beigebrachtem Wissensstoffe dargeboten.

Zu einer der hier ausgesprochenen nahezu gleichzustellenden Erkenntnis ist auch BUCHER gelangt und hat sie in den folgenden Sätzen (S. 273) zusammengefaßt:

„Law 30. As far back as the nature of the existing geological record permits us to judge, the larger bodies of acid intrusives have approached close to the earth's surface along belts of orogenic folding.

Law 31. In all strongly asymmetrical orogenic belts they lie eccentrically on that side from which the folding pressure acted.

Law 32. By far most acid intrusives cut across the structures produced by the folding pressure in such a way as to indicate that they arrived after the folding but so shortly after that they must bear a genetic relation to the orogenic phase.“

Law 32 entspricht der Vorstellung der postorogenen Quergriffe, die durch die Orogenese angeregt von der erzeugenden Scholle her in den Faltenbau vordringen.

Dazu mag hier noch ausdrücklich hervorgehoben werden, daß in dem hier aufzubauendem hypothetischem Bilde der Aufbruch der Magmen allerdings durch die Orogenese angeregt wird, die sauren Magmen aber nicht im Orogen selbst, sondern unter der angeschlossenen erzeugenden Scholle heimisch sind.

Postorogene Alkalimagmen als Differentiate aus dem Urmagma

Die Granite in Gebieten der Intrusionstektonik, das sind die unter der Suprakruste außerorogen regional ausgedehnten Batholithen, gehören allenthalben zur kalkalkalischen oder pazifischen Sippe. Da, wie die regionalen Vergleiche lehren, die Kammvulkane der Kettengebirge dem Randsaume der von der magmatischen Infrakruste getragenen Kontinentalscholle entquellen, ist es leicht verständlich, daß auch sie mit wenigen, durch besondere Umstände bedingten Ausnahmen, der gleichen großen Magmensippe zugehören.

Im Vergleich zu der weiten Verbreitung der pazifischen Gesteine in den Gebirgsketten und in der Suprakruste ist die der Alkaligesteine verhältnismäßig beschränkt. Wie bekannt, liegen sie vorwiegend außerhalb der Orogene und, wo ihre plutonische Ausbildung bloßgelegt ist, füllen sie Gräben in Bruchfeldern. Eines der großartigsten Gebiete dieser Art ist durch seine vollendete Erfor-

schung auch das lehrreichste geworden. Das Alter der gesamten Intrusionen im berühmten Oslograben wird durch neuere Fossilfunde in das Perm heraufgerückt und damit völlig losgelöst von jedem Bezuge zur kaledonischen Orogenese (HOLTEDAHL 1935). Auf die verschiedenen Formen des Ausweichens, durch die der Raum für die Abspaltungen aus dem tieferen Herde geschaffen wird, hat auch HOLTEDAHL hingewiesen. Ob das Magma sinkende Becken füllt, ob es durch „Cauldron subsidence“ (BAILEY) mit einem an Bogenbrüchen sinkenden Blocke den Platz tauscht, ob es in der Mitte des Grabens die Nachbarschollen hochstaut, vielleicht auch örtlich einen Saum von Xenolithen aufgenommen hat, das Beachtenswerte bleiben dabei die scharfen, — nicht verschwommenen und nicht migmatitischen Ränder. Von diesen Magmen darf man annehmen, daß sie durch Abspaltung aus unvermischem Urmagma hervorgegangen sind; sie konnten in einen sich öffnenden Raum eindringen. Die regional ausgedehnten Vertreter der kalkalkalischen Reihe sind an der Unterlage der Suprakruste durch lange Zeit festgehalten worden. Die Faltenschlingen der Intrusionstektonik sind ein Ergebnis des Wechselspieles der Kräfte an der Berührungsfläche zwischen Supra- und Infrakruste. Das wiederholte Nachdrängen der Magmen, das fließende Ausweichen der auflagernden Massen war von gegenseitigem Durchdringen, teilweiser Aufschmelzung vom Migmatitis und diffusum Stoffaustausch begleitet. Aus der Suprakruste werden im Laufe der langen Zeiträume durch Diffusion in die magmatische Unterlage Stoffgruppen übertragen, die schon den atmosphärischen Kreislauf mitgemacht und dabei einen Teil der Alkalien eingebüßt haben. Mit der Stoffzufuhr aus dem in den Sedimenten neben Kalk angereichertem Lösungsrückstand von Si und Al wird der chemische Charakter der Magmen nach der kalkalkalischen Richtung verschoben. Aus der Art des tektonischen Verbandes können die chemischen und damit auch die petrographischen Unterschiede zwischen den beiden Hauptsippen der Magmen und ihre ungleiche regionale Verbreitung verständlich werden. Nach einem allgemeineren Überblick scheinen sich nur die ausgedehnten Flächen pazifischer Batholithen mit einem dazugehörigem Hofe von thermisch (periplutonisch) regionaler Katametamorphose zu umgeben. Da, wie gesagt, die Vulkanite der Kettengebirge, insbesondere der Kontinentalrandgebirge der Unterlage der erzeugenden Scholle entstammen, in der die Intrusionstektonik herrscht, erklärt es sich, daß auch sie der pazifischen, d. i. der syntektischen, Sippe

zugehören (F. E. SUSS 1927, S. 153). Die regionaltektonischen Gegensätze und Zusammenhänge leiten zu dieser Vorstellung.

Die dieser großtektonischen Theorie anzugliedernde Auffassung des Verhältnisses der zweierlei Magmasippen zueinander und zum Orogen findet eine wertvolle Stütze in der bedeutungsvollen Darstellung, die BACKLUND (1932) von dem Vorgange der Intrusion tief liegender alkalischer Körper gegeben hat. Sie schöpft aus der Bekanntschaft mit den wichtigsten der besonders in Betracht kommenden Gebiete. Es wird hervorgehoben, daß die Alkalimagmen stets posttektonisch in erstarrtes Gebirge, meist mit steilwandigen Grenzen, ohne nennenswerte Assimilation und ohne Anzeichen von Stopping oder Platztausch aufgestiegen sind. Der zumeist glatt kreisrunde oder elliptische Umriß, wie er am Pilandsberg in Transvaal, an den Körpern im Sekununiand, auf der Kolahalbinsel, auf Grönland, im Gebiete von Umptsk und Urt in Rußland und anderwärts wahrzunehmen ist, dann die zumeist ringförmig von äußeren sauren zu inneren basischeren Lagen fortschreitende Differentiationsfolge mit Cone in Cone oder zwiebelschaligen Strukturen deuten auf einen im ganzen ruhig und ohne Störung von außen her verlaufenden, in seinen chemischen Belangen allerdings recht verwickelten, Vorgang der fraktionierten Kristallisation. Nach der Annahme von HOLMES wird der steil aufragende Raum für den Magmakörper von diesem selbst geschaffen; eine andauernde Konvektionszirkulation verschafft ihm den Wärmeüberschuß zum Aufschmelzen seiner Ränder. Es läßt sich wohl denken, daß die Lavasäule von einer Spalte ihren Ausgang genommen hat. In der Tiefe der Spalte kann eine Gangfüllung zurückgeblieben sein, ähnlich wie das von den manchmal gegen die Tiefe zu gestreckten und manchmal zu Reihen geordneten alkalischen Kimberlitschlotten angenommen wird. Der Auftrieb mag in der Hauptstrecke der Spalte erstorben und nur an einer Stelle wirksam geblieben sein, so wie man auch an zutage aufreißenden Vulkanspalten wahrnimmt, daß sich der Lavaaustritt über einer Stelle sammelt und nur dort durch längere Zeit festgehalten wird.

Im Inneren des Körpers widerspiegelt die häufig sehr große Mannigfaltigkeit der Gesteinstypen die Empfindlichkeiten, mit denen der Vorgang der Differentiation auf äußere Einflüsse reagiert. Wiederholte Nachschübe spielen dabei eine große Rolle. Die nach den Erfahrungen in den argentinischen Anden und anderwärts unterschiedene Reihenfolge von Andesiten und Graniten zu immer

mehr alkalischen Gesteinen bis zu den zuletzt folgenden Plateaubasalten ist eine der Grundlagen für die Annahme, daß postorogen das ursprüngliche Magma seinen Weg durch die zerborstene syntektische Scholle gefunden hat.

Wenn BACKLUND die Granite der Orogenese, die Basalte der Epirogenese und die alkalischen Intrusionen einer „Epirodiatrese“ zuteilt, so wird damit im Grunde nur die gleiche Wahrnehmung verschieden gedeutet. Der wesentliche Unterschied besteht darin, daß hier die Intrusionen und Eruptionen pazifischer Magmen wohl als Begleiter der Orogenese angegliedert, damit aber nicht auch in das Orogen selbst gestellt werden.

Ähnliche Schlußfolgerungen abgeleitet aus einer anderen Gruppe von Beobachtungen. Großer Kreislauf der Stoffe

Die Aufnahme von suprakrustalen Stoffen in die pazifischen Magmen ist hier aus der großtektonischen Verteilung der Magmen im Zusammenhange mit ihrer stofflichen Zusammensetzung erschlossen worden. Sie ergibt sich vor allem aus der Art des Verbandes der pazifischen Plutone mit ihrem Dache im unscharfen Migmatitkontakt im Bereiche der außerorogenen Intrusionstektonik mit anschließender periplutonischer Metamorphose, im Gegensatze zu den zusammenhängenderen tektonischen Linien, den bestimmteren Grenzen und schärferen Kontakten, der Magmakammern mit atlantischer Füllung; diese stehen in keiner stofflichen Beziehung zu dem benachbarten Gebirge und haben zumeist eine reine Differenzierung nach der Schwere aus dem unvermishtem Urmagma durchgemacht. An solche allgemeine Schlußfolgerungen fügen sich mit guter Übereinstimmung die Ergebnisse neuerer Studien über den engeren Verband zwischen dem Tiefenmagma und seinem Dache. Auf Arbeiten von ESKOLA (1932), WEGMANN (1935) und DRESCHER-KADEN (1936) soll hier nur in Kürze hingewiesen werden.

Wenn auch hier auf die von den genannten Forschern aufgeworfene Frage der Entstehung der Magmen überhaupt aus der wiederaufgeschmolzenen Hülle zunächst nicht eingegangen wird, so können doch ihre Angaben über den innigeren Stoffaustausch und die Aufnahme der Stoffe aus dem Nebengestein zur Stütze der Anschauung über die Entstehung der pazifischen Magmen hier verwertet werden. Auf die von WEGMANN hervorgehobenen Anzeichen von Stoffaustausch durch Diffusion in Migmatitbereiche ist bereits oben hingewiesen worden.

ESKOLAS Anschauungen über die Tektonik der Tiefen sind allerdings recht verschieden von denen, die hier vertreten werden. Aber zu ihren wesentlichen Voraussetzungen gehört ebenfalls der Übertritt von Stoffen der äußeren Kruste in das granitische Magma. Nach ESKOLA sollen zweierlei Vorgänge daran beteiligt sein: Einerseits die differentielle Anatexis aus jeder Art suprakrustaler Gesteine, die eine granitische Komponente enthalten. Sie wird durch den Wassergehalt in Sedimenten und verwitterten Vulkaniten gefördert. Der verflüssigte Teil gleicht in seiner Zusammensetzung der letzten Erstarrung granitischer Ausgangsgesteine mit dem dazugehörigen „Granitsaft“ oder „Ichor“. Solches palingenes Magma soll nach ESKOLA vor allem beim Niederfallen von Krustenteilen in große Tiefen mit hoher Temperatur entstehen. So sollen z. B. die weit verbreiteten Hangö-Granite von Südfinnland durch teilweises Aufschmelzen aus leptitischen Gesteinen entstanden sein. Darüber hinaus drängen die mobilisierten Stoffe nach oben; Nebulite und Migmatite schließen sich an. Wie man hinzufügen kann, leiten sie hinüber in die Umwandlungsstufen, die hier der periplutonischen Regionalmetamorphose zugerechnet werden.

Andererseits entstände auch granitisches Magma durch Differenzierung in tiefen Zonen der Lithosphäre während der Orogenese und durch Auspressen aus Porenlösungen im kristallisierendem Sima, d. i. in einem basischem Magma nach Art der Plateaubasalte. Basalte beginnen bei 1300° , Granite bei 600° zu kristallisieren. Nach der normalen geothermischen Tiefenstufe würde die Dicke der Kruste, in der Kristalle und Magma von beiden enthalten sein können, 23 km betragen. Eine Übergangszone in eine gabbroide oder, wie ESKOLA annimmt, eklogitische Unterlage wird ausgewalzt und aus ihr entweichen die sauren Restlösungen, wie das Wasser aus einem zusammengedrücktem Schwamme. Im weiteren Aufstiege, wenn in kühleren Strecken einzelne Bestandstoffe abgeschieden, andere aus einer kristallinen Nachbarschaft aufgenommen werden, nähert sich die Zusammensetzung der Lösungen immer mehr der des granitischen Magmas.

Die zweierlei Vorgänge, die von ESKOLA als graniterzeugend dargestellt werden, das Wiederaufschmelzen von in die Tiefe gefalteten Krustenteilen, und das Auspressen von vorhandenen Porenlösungen aus der basischen Unterlage, werden nach seiner Ansicht nur wirksam durch den die Gebirgsbildung begleitenden gewaltigen Bewegungsantrieb. Die Entstehung der Granite wird zu einem

Teilgeschehen der eigentlichen Orogenese. Der Einsatz einer tangential wirkenden Kraft wäre die erste Vorbedingung für das Abscheiden und Aufquellen der zunächst unter der Erdoberfläche fast allverbreiteten und über die anderen Stoffgemenge weitaus vorherrschenden silikatreichen Schmelzen.

Daß so durchaus gegenteilige Auffassungen über das Wechselspiel von Magma und Orogenese, wie die von ESKOLA und die hier vertretene, heute noch möglich sind, beruht in einem ersten wesentlichen Grunde auf der Uneinigkeit in der Deutung des Wechselbezuges zwischen Kristallisation und Deformation; aus ihr ergibt sich die unterschiedliche Auffassung und Abgrenzung des Begriffes der Orogenese. Die Dislokationsformen der Intrusionstektonik mit der posttektonischen Kristallisation im Bereiche der periplutonischen Metamorphose werden von ESKOLA auch den orogenetischen Vorgängen zugeteilt. Hier wird aber die Intrusionstektonik nach den oben dargelegten Grundsätzen nicht als die regelrechte Unterlage der orogenetischen Tektonik angesehen, in der ein herrschender Tangentialdruck als letzter gestaltender Faktor dem Gebirgskörper die gleichmäßiger fortstreichenden „Leitlinien“ im Verbande mit der syntektonischen Meso- und Epikristallisation der enorogenen Regionalmetamorphose aufgeprägt hat.

Wenn auch der Aufstieg des Magmas und sein örtlicher Durchbruch zur Oberfläche im nächsten Anschlusse an die Orgene durch den orogenetischen Tangentialschub selbst angeregt wird, so bleibt er doch nur eine Neben- und Teilwirkung des eigentlichen gebirgsbildenden Vorganges; das ist schon daraus zu ersehen, daß in sehr mächtigen Gebirgen, wie z. B. im Himalaya und in den Alpen, die Durchbrüche in den letzten bedeutendsten Phasen fehlen oder nur örtlich beschränkt sein können. Es wird vorausgesetzt, daß eine ausgedehnte granitische Tiefenzone schon vor der Orogenese vorhanden war und daß der Abhub der erzeugenden Scholle bei ihrem Vorrücken über das eigentliche Orogen, d. i. über die belastete Zone mit der vorherrschenden enorogenen Metamorphose den Aufstieg und Durchbruch aus der vorhandenen Magmaschicht ermöglicht hat. Der Aufstieg überdauert die tangential Bewegung; daher erscheinen die Durchbrüche postorogen und nahe an der Grenze zwischen der lastenden und belasteten Zone oder zwischen der erzeugenden Scholle und dem eigentlichen Orogen. Auch die Hangögranite Südfinnlands werden von ESKOLA in eine späte, der Hauptorogenese angeschlossene Phase, der sveco-fennidischen Orogenese

eingereicht. WEGMANN'S Angabe über die diapire Form der Granitdurchbrüche in diesem Gebiete weist darauf hin, daß hier intrusions-tektonische Gestaltung in den orogenen Bau einzugreifen beginnt. Sie kann ihn im weiteren Fortschritte ebenso überwältigen und verdrängen, wie irgendeine weniger gestörte und verhältnismäßig wenig mächtige sedimentäre Decke.

In späteren Aufsätzen dieser Reihe wird dies an Beispielen ausführlicher zu belegen sein.

Hier kommt es nur darauf an, daß die chemischen Charaktere der weit verbreiteten an die periplutonische Regionalmetamorphose angeschlossenen Granite auch nach ESKOLA durch Aufnahme von Stoffen aus dem Mantel mit teilweise sedimentärem und daher alkaliärmerem Inhalte erklärt werden können.

Noch enger verbindet sich mit den angeführten Schlüssen über die Herkunft der pazifischen Magmen, was der Darstellung von WEGMANN zu entnehmen ist. Seine Auffassung beruht auf den oben erwähnten Studien über die Migmatite und berührt sich auch nahe mit der von ESKOLA. Die Vorstellung eines Stoffaustausches zwischen der Kruste und der Unterlage wird von WEGMANN zu der noch umfassenderen Vorstellung des großen Kreislaufes der Stoffe ausgedehnt; zum Unterschiede von dem kleinen Kreislauf, der in der Nähe der Erdoberfläche abläuft und bei dem der Gesteinszerfall unmittelbar in die Sedimente der Oberfläche niedergleitet. Im großen Kreislauf gelangen die Stoffe durch den Migmatitbereich in die granitische Zone der äußeren Salkruste, und zwar nach WEGMANN'S Anschauung ohne magmatischen Zwischenzustand und ohne eigentliche magmatische Erstarrung. Die Leitgedanken entspringen aus der wahrzunehmenden Mannigfaltigkeit der Übergänge zwischen dem Gefüge der älteren Gesteine und den voll ausgebildeten Graniten. Den überzeugendsten Beleg dafür bieten die sog. „Nebulite“ SEDERHOLMS, die häufig zwischen die Migmatite und die voll ausgebildeten Granite eingeschaltet sind. Sie zeigen, wie die Strukturlinien und die Trümmergrenzen von umschlossenen Ausgangsgesteinen immer mehr verschwimmen und verblassen und durch die um sich greifende Granitisierung allmählich aufgezehrt wurden, ohne daß sie aufgeschmolzen oder durch magmatischen Fluß mitgenommen und verlagert worden wären. Hierher gehören die von WEGMANN (1936, S. 313) erwähnten kennbaren Spuren von Kreuzschichtung in den Migmatiten.

Auch in diesem Zusammenhange gelten die aufwärts drängenden Alkalilösungen als wirksame Begleiter der allgemeineren Umgestaltung durch den Wärmestrom. Sie müssen einem alkalireicherem Untergrunde entstammen. Auch hier wird an eine doppelte Möglichkeit der Zufuhr gedacht. Sie lehnt sich nahe an die von ESKOLA angenommene Zweiteilung des Vorganges (S. 341). Zunächst — und wohl vorausgehend — geschieht eine Anreicherung von Alkaliverbindungen im Schmelzflusse durch Kristallisationsdifferenziation; dann wird der Auftrieb aus dem Unterbau durch irgendeinen Vorgang veranlaßt. Dabei wird auch wieder dem Eintauchen in die Tiefen der Geosynklinale die Hauptrolle zugeteilt.

Durch den Zutritt der Alkalilösungen werden die umgebenden Wirtgesteine, das sind die Geosynklinalsedimente mit den begleitenden Vulkaniten, zu Alkalikalkgesteinen und zu kennzeichnenden Vertretern der als die pazifische bezeichneten Magmensippe. Darin wären besonders bezeichnend die palingenen Granite und Granodiorite; sie können gemischter Abstammung und aus Gesteinen verschiedenen Alters und auch durch Konvergenz aus verschiedenen Abstammungsreihen entstanden sein.

Das Studium der Strukturen und ihrer Übergänge aus der Suprakruste in die granitische Unterlage leitet somit zu den gleichen Grundvorstellungen über die Entstehung der pazifischen Magmen, wie die Schlüsse aus der allgemeinen Verbreitung der Magmentypen und ihren regionaltektonischen Zusammenhängen. Auf der anderen Seite tritt an die Stelle der von WEGMANN angenommenen alkalireichen Unterlage das undifferenzierte basaltische Magma, dessen Stellung in der Erdkruste aus dem Auftreten der massenhaften undifferenzierten Plateaubasalte und aus ihren Differenzierungen, d. i. den verschiedenen Alkaligesteinen in Bruchgebieten, sei es als posttektonische Nachschübe in Orogenen oder in Tafelländern, erschlossen wird.

Als nahe verwandt mit den angeführten und als ein wertvoller Beitrag zu den Allgemeinvorstellungen über den Begriff des Magmas verdienen die Gedankenfolgen von DRESCHER-KADEN (1936) noch besondere Erwähnung. Auch er knüpft an die aus dem Studium der Injektionen gewonnenen Gedanken, über die oben berichtet worden ist. Indem er sie weiterführt, gelangt er ebenfalls zu der Annahme, daß verflüssigte Systeme in den Erstarrungsgesteinen sehr verbreitet sind. Dies wird eigentlich nicht an dem stofflichen Umsatze von Injektionsgneisen zu Graniten erläutert; auf dem

Wege der Metamorphose sollen die Gneise zu Graniten umgeprägt werden. DRESCHERS Anschauungen führen damit noch weiter als die eben erwähnten von ESKOLA und von WEGMANN. Es wird nicht die Assimilation der Differentiation gegenübergestellt; sondern es wird erwogen, ob nicht eine erweiterte Metamorphose sehr verschiedene Ausgangsgesteine zu weit auseinander liegenden magmenähnlichen Typen umgestalten kann. Die Frage wäre zu stellen, unter welchen Bedingungen daraus selbst echte Magmen entstehen können. DRESCHER erklärt auch Gruppen sehr kennzeichnender basischer Schollen und Einlagerungen im Gneisgebirge — Amphibolite, Hornblendite, Gabbroschiefer und selbst Eklogite — als Umwandlungen aus Sedimenten, allenfalls mit gelegentlichen Einlagerungen von basischen Vulkaniten. Dabei wird auf den übereinstimmenden Chemismus der ursprünglichen und der abgeleiteten Gesteine großes Gewicht gelegt. So sollen z. B. Gneise mit Einschaltungen von Amphibolit, Gabbroschiefer, Diorit usw., wie sie im Schwarzwald, im Odenwald, im Bayrischen Wald und in den Alpen bekannt sind, aus arkoseartigen Gesteinen mit tonig-mergeligen und eisenschüssigen Zwischenlagen entstehen können.

Auch eine allgemeinere Erwägung, die DRESCHER zur Stütze seiner Annahme einer weit verbreiteten Palingenese in der äußeren Erdkruste vorgebracht hat, ist erwähnenswert. Im ständigen Zuwachs durch die aufsteigenden und erstarrenden Intrusionen hätte die Erdkruste zu einer unermeßlichen Dicke anschwellen müssen. Ein Ausgleich durch Wiedereinschmelzen der Oberflächengesteine muß notwendig angenommen werden.

Die allgemeine Schlußfolgerung kann anerkannt werden: daß „der Kreislauf eruptiv-sedimentär-metamorph-eruptiv-sedimentär usw. sich anscheinend viel öfter und gründlicher wiederholt hat, als bisher angenommen wurde“; — wenn auch die Rolle eines ursprünglichen Magmas in dem von DRESCHER angenommenen Ausmaße einzuschränken sein wird.

In allen diesen, auf verschiedenen Bahnen zu nahe aneinander gelegenen Zielen leitenden Erwägungen ist der unausweichliche Schluß enthalten, daß nur die atlantischen oder Alkalimagmen als wahrhaft juvenil im weiteren Sinne gelten können. Die pazifischen Magmen sind zum wenigsten in einem Teile ihres Stoffbestandes „resurgent“.

IX. Strukturen im ältesten Grundgebirge und ihr Bezug zu Fragen der Aktualität

Das Moldanubikum ist nicht ein tiefer aufgeschlossener Anteil des variszischen Faltenbaues; nochmals sei hingewiesen auf sein Verhältnis zum Barrandien und auf seine große Ausdehnung nach Westen und nach Süden. Daran ist zu erkennen, daß Intrusionstektonik mit überorogener Breite in seichtes Gebirge aufsteigen kann und damit von den mit abgemessener Breite und großem Tiefgange weithin streichenden Orogenen grundsätzlich abzusondern ist. Gewiß wird auch im tieferen Untergrunde der Orogene die magmatische Infrakruste anzutreffen sein und es kann geschehen, daß Intrusionstektonik umgestaltend in einen vorhandenen Deckenbau eingreift; wie ja auch umgekehrt z. B. voralpines Grundgebirge mit thermischer Regionalmetamorphose und der dazugehörigen Tektonik in den alpinen Deckenbau aufgenommen worden ist. Man kann sich leicht vorstellen, daß je nach der Uranlage des Orogens, nach der Tiefe und dem Grade der Umgestaltung der Verband der zweierlei Bauten die denkbar mannigfachsten Formen annehmen und der Aufklärung oft schwer zugänglich werden kann.

Beispiele aus Südafrika

Einen lehrreichen Sonderfall bietet das Grundgebirge des Hererolandes nach der zusammenfassenden Darstellung von H. Cloos (1934). Das offene Wüstenland ermöglicht die lückenlose Wiedergabe der Strukturlinien in wünschenswertester Vollkommenheit. Nach allem Anscheine gewinnt man hier einen Einblick in den Untergrund eines Orogens, das von der Intrusionstektonik erobert und umgeformt wird. Durch die Intrusionen wird neuerliche Umfaltung eingeleitet. Cloos hebt als kennzeichnend hervor: „die zeitlich und mechanisch gleich intime Verbindung von Schmelzförderung und Faltung“, bezeichnet aber andererseits auch das Magma als den „Motor der miteinander gekuppelten Orts- und Formveränderungen“. Ähnlich wird auch für die Erscheinungen der Intrusionstektonik die Intrusion der Batholithen als „letzter gestaltender Faktor“ in Anspruch genommen. Die Granite sind selbst nicht mehr nennenswert durchbewegt und die Plutonräume sollen auf rein tektonischer Grundlage, fast ohne Aufzehrung oder mechanische Beseitigung der vorher vorhandenen Gesteine entstanden sein.



22 20

15° 40'

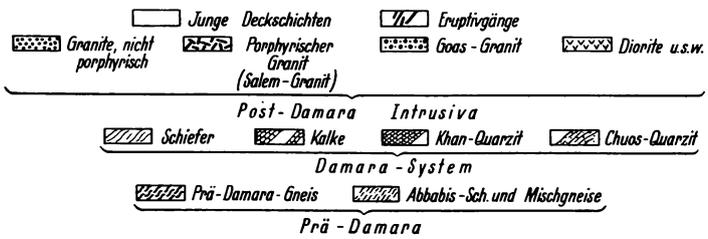


Fig. 7. Ausschnitt aus der geologischen Karte des westlichen Hererolandes (Süd-West-Afrika), nach den Kartierungen von T. W. GEVERS, H. A. FROMMURZE und H. CLOOS gezeichnet unter Leitung von H. CLOOS. Geol. Rundschau Bd. 23. 1935. Maßstab ca. 1 : 570 000.

Nicht der hypothetische Ausbau, sondern, was unmittelbar wahrzunehmen ist, kommt dabei vor allem in Betracht, und es ist nicht entscheidend, daß Cloos für die Faltung außer der Intrusion noch eine allgemeinere magmatische Unterströmung in Anspruch nimmt. Für die Frage nach der Faltung und Metamorphose und ihren Graden vor der Intrusion wäre die Feststellung der kristallinen Fazies der Gesteine und einer möglichen Polymetamorphose von Bedeutung (s. Textbeilage).

Nach den Arbeiten von T. W. GEVERS (1933, 1934) bietet überhaupt das mittlere Südwestafrika das Bild der Auflösung älterer Strukturen im Intrusionskontakte mit aufsteigenden Graniten, wenn dabei auch eine vorherrschende NW—SO-Richtung bewahrt bleibt. Die dichter gedrängten Granitmassen umgibt unregelmäßiger Faltenwurf. Die Verwandtschaft mit den über große Flächen des skandinavischen Grundgebirges wahrnehmbaren Strukturen ist nicht zu verkennen und das Vorgehen der Katametamorphose in unverformtes Gebirge zeigt sich auch hier am eindrucksvollsten an den trotz der Katametamorphose noch kennbaren zarten Texturen alt-vorkambrischer Bändertone mit Biotit, grüner Hornblende und — bezeichnenderweise — auch Diopsid; dazu gehören auch hier die Tillite mit einer zu Biotitschiefer umgewandelten Grundmasse.

Beispiele aus den finnischen Grundgebirgen

Anders zeigt sich z. B. das finnische Grundgebirge. Auch darüber können hier nur einige vorläufige Bemerkungen Platz finden. Nach dem, was der vortrefflichen Beschreibung von WEGMANN und KRANCK zu entnehmen ist, bin ich geneigt, mich der Ansicht von HOLMQUIST anzuschließen, der ähnliche Gebirgsbauten in Schweden für nicht vergleichbar mit dem Baustile der jungen Kettengebirge betrachtet. WEGMANN verweist schon auf gewisse Unterschiede, wenn er hier ein Kettengebirge „ohne großen Tiefgang“ annimmt (1931, S. 61) und das Übergewicht bei den metamorphen Vorgängen der Granitisierung zuschreibt. Bezeichnend ist u. a. in dieser Hinsicht das Auftreten von an ihrem Großgefüge noch wohl erkennbaren, wenn auch stellenweise stark zerquetschten Kissenlaven (Pillow Lavas) mit verhältnismäßig spärlicher Ausbildung von Albit und Chlorit, dagegen mit reichlicherem Auftreten von Augit, Hornblende, Plagioklas, Quarz, und gelegentlich auch von Biotit. In einem Gebirge von alpinem Bau wären solche Gesteine in der weitaus

überwiegenden Menge zu Chlorit-Albit-Schiefern zerdrückt worden. Andererseits würden die reichlichen Cordierit-Kinzigite eine alpine Bewegung nicht überdauert haben. Es wird nichts von einer regional ausgedehnten Albitisation oder muskovitischen Deformationsverglimmerung angegeben, wie sie erfahrungsgemäß im tektonisch überfahrenem überdeckten Teile des Orogens herrschend werden. Es ist die Art, in der der Wärmestrom über der Migmatitfront als periplutonische Metamorphose auf verschiedene Gesteine unmittelbar ohne begleitende Deformationen einwirken kann. Er kann aber auch bewirken, daß eine kräftige Deformation in einem Gesteine von einer gerichteten Kristallisation mit dem Katabestande überholt wird; so entstanden die im Kallvik-Rastböle-Gebiet häufigen Amphibolschiefer und Biotitglimmerschiefer. Epidot ist deutlich davon zu sondern; er entstand in jüngeren Bewegungszonen (KRANCK 1931, S. 76).

Tektonische Bewegungen verschiedener Art und zu verschiedenen Zeiten verändern nur örtlich die durchgreifend periplutonische Prägung des Gebirges. In ihrer gesamten Anlage dürften sie von einer großzügigen Wandertektonik, wie die des Erzgebirges oder der Alpen, ebensoweit abstehen, wie die ebenfalls in den periplutonischen Bereich eingetauchte Bruch- und Falten-tektonik des mittelböhmischen Barrandien.

Wenn auch der Bezug der Migmatitfront zu den weniger veränderten Dachgesteinen und die Charaktere der Metamorphose nicht gestatten, sie in den Sockel eines einstmaligen Faltengebirges von großorogenetischem Bau zu verlegen, so bezeugen doch vielerlei Gefügemerkmale, daß der plutonische und periplutonische Block sehr bedeutenden tangentialen Beanspruchungen ausgesetzt gewesen ist. Man wird sie den mannigfaltigen, innerkontinentalen Verschiebungen angliedern dürfen, die an der Oberfläche der gegenwärtigen Landmassen als Blockgebirge und Grundfalten als weiträumige Verbiegungen und weithin ausstrahlende Bruchsysteme zutage treten können, über deren Bedeutung für die Theorie der Tektonogenese in einem späteren Aufsätze ausführlicher berichtet wird. Verschiedene Abstufungen einer „hypokinematischen“ Regionalmetamorphose werden hierher zu rechnen sein. Sie zeigt sich weniger einheitlich als die beiden anderen unterschiedenen Arten der Regionalmetamorphose. Erst in einer gewissen Tiefe wird die Verbiegung, Zerscherung oder Zertrümmerung in größeren gleitenden Schollen in der als Metamorphose zu bezeichnenden molekularen

Umlagerung ausgedrückt und sie kann die ganze Stufenreihe von der Epi- bis zur Katakristallisation umfassen. Von der Stärke und von der Geschwindigkeit der Bewegung in gewisser Tiefe wird es abhängen, ob die Kataklyse von der Kristallisation überholt werden kann. Von Katamyloniten als Erzeugnis solcher Bewegungen war oben die Rede (S. 35).

KRANCK sagt wohl auch selbst, daß die weit ausgreifenden Bewegungen nicht voll den alpinen gleichzustellen seien (1933, S. 48) und spricht von einer durchgreifenden Polydeformation, die häufig gleichen Ausgangsgesteinen ein sehr ungleichartiges Aussehen verliehen hat. Als ein sehr bezeichnendes Sondererzeugnis solcher Vorgänge treten in dem Gebiete die den Granitgneisen angeschlossenen Leptite auffällig hervor. Gesteine dieser Art in den Formen von größeren Körpern und Lagern gehören nicht zum gewöhnlichem Bestande der enorogenen Metamorphose. Hypokinematische Deformation kann große Teile des gleitenden Blockes so einheitlich und durchgreifend überwältigen. Von den Granitgneisen führen Übergänge zu feinkörnigen Leptiten und auch zu ganz dichten hälleflintartigen Gesteinen. Bei gleichzeitiger Umkristallisation und Regelung der Quarze zu gestreckten Streifen waren die Gesteine aufs feinste zerrieben und ebenflächlich ausgewalzt worden. Protogene Reste von Hornblende und Plagioklas zeigen hier (ebenso wie manche Plagioklassplitter im Granulit), daß das feinstreifige Parallelgefüge nicht durch schiefrige Erstarrung, sondern durch Auswalzung im festen Gestein entstanden ist.

Eine Besonderheit dieser Art der Umwandlung ist auch die reichliche Mobilisation von Kalium, das auch in Form von augenartigen Orthoklasporphyroblasten abgeschieden werden kann. Sie nähert sich gewissen den periplutonischen Bereich kennzeichnenden Abscheidungen von feldspätigem Geäder und der als Augensteine bekannten Porphyroblasten von Kalifeldspat.

Keine universelle Faltung im Präkambrium

In den ausgedehntesten Gebieten mit den ältesten Schichtfolgen, wie in Canada, in Fennoskandia und in Südafrika, liegt mächtiges, reichgegliedertes Präkambrium in scharfer Transgression und verhältnismäßig wenig gestört über dem hochmetamorphem und wirr gefaltetem Gneis- und Granitgebirge, das dem eigentlichen Archäikum zugeteilt wird. Aus diesem augenfälligen Gegensatze

wird von manchen auch heute noch geschlossen, daß das Archäikum eine Zeit besonders stürmischer Entwicklung gewesen sei, und daß ihm zunächst eine allgemeine Evolution und tiefe Abtragung im „Eparchean Intervall“ und dann langandauernde ruhigere kontinentale Zeiten gefolgt seien. Auch bei dieser Annahme wird man berücksichtigen müssen, daß die Strukturen des tiefen Grundgebirges, die Umstellungen, Durchdringungen und Auflösungen der Gesteinsmassen, in ihrer gegenwärtigen Gestalt nicht durch einen einheitlichen und einmaligen Vorgang geschaffen worden sind, und daß in der Mehrzahl der Fälle im tiefen Grundgebirge über große Räume hin eine Verschmelzung verschiedener Gebirgsbauten ungleichen Alters und eine über unbestimmt lange Zeiträume ausgedehnte Ereignisfolge zu erkennen ist. Auch darin könnte noch, mehr oder weniger betont, die Anschauung enthalten sein, daß das Grundgebirge mit seinen kennzeichnenden Eigenschaften die Zustände aus einer Frühzeit der Erdgeschichte vergegenwärtigt. SEDERHOLM war nicht der einzige unter den erfahrenen Forschern, die dagegen das raumbundene dieser Vorgänge ausdrücklich hervorgehoben haben. Sie kommen allenthalben dort zum Vorschein, wo der Abtrag bis in die Berührungszone zwischen der Supra- und Infrakruste hinabgedrungen ist. Diese Zone kann allerdings zu verschiedenen Zeiten und in verschiedenen Gegenden ungleich nahe an die Oberfläche herangerückt sein. Tiefe und gleichmäßige Abtragung hat stets nur im Laufe langer Kontinentalzeiten geschehen können; diese Zeiten sind es auch, in denen verhältnismäßig rasch die mächtigsten Sedimente in Form von kontinentalem Schutt angehäuft werden können. Die flache Ausbreitung von solchem Schutt über hochmetamorphem Grundgebirge wiederholt mehrmals im Laufe der Erdgeschichte das äußere Bild des „Eparchean Intervall“; wenn auch nicht mit den gleichen weiträumigen Abmessungen.

So wie z. B. der Torridon-Sandstein über den Lewisian-Gneisen im nordwestlichen Schottland, liegt der Alte Rote Sandstein des Devon auf dem Kristallin der norwegischen Küste, der schottischen Kaledoniden und auf Neubraunschweig, und so breitet sich das terrestrische Stephanien mit dem mächtigem Rotliegenden in Mitteleuropa über das granitdurchwobene Moldanubikum und ebenso liegt der viel jüngere ungemein mächtige Wüstenschutt der Gobi- und Hanhai-Serien über den weithin ausgedehnten granitischen Batholithen der Mongolei.

X. In den beiden Arten der Regionalmetamorphose wirken gesondert die irdischen und die außerirdischen Umgestaltungskräfte der Erdkruste

Die beiden unterschiedenen Arten der Regionalmetamorphose erscheinen noch über die Rolle als Anzeiger bestimmter Bewegungsformen hinausgerückt und gewinnen noch eine allgemeinere Bedeutung, wenn man wahrnimmt, wie sie den beiden Arten der die irdische Tektogenese beherrschenden Energien angeschlossen sind. Ungeachtet der noch herrschenden Meinungsverschiedenheiten über die Wirkungsweise dieser Energien im besonderen, kann man doch unter allen Umständen an der Unterscheidung von zweierlei Hauptquellen der wirksamen Energien festhalten. Die eine wirkt von außen her durch kosmische Kräfte; sie äußern sich auf der Erde, wie angenommen wird, in den Gezeiten des Flüssigen und des Festen, in Polverlagerungen und in einem Wechsel der Rotationsgeschwindigkeit im Laufe der geologischen Vergangenheit. Auf Vorgänge dieser Art können vor allem die seitlichen Verschiebungen der äußeren Erdhaut, mit Einschluß der eigentlichen Orogenese und wohl auch das Gleiten von Kontinentalschollen zurückgeführt werden (s. u. a. ARNOLD HEIM 1934).

Die zweite Energiequelle ist der durch den Atomzerfall im Erdinneren gespeiste Wärmestrom, der aus der Temperaturzunahme unter der Erdoberfläche erkannt und abgeschätzt werden kann.

Bei der enorogenen Regionalmetamorphose in ihrer vollen Ausbildung wird die Temperatur erhöht, indem die Isothermen im Orogen unter der lastenden Scholle emporsteigen. Für sie ist kennzeichnend, daß eine durchgreifende Deformation der Gesteinsmassen nach Art einer Umrührung eine Mobilisation, und zwar insbesondere und zuerst der beweglicheren Alkalien, bei verhältnismäßig geringer Temperatur, und auch eine Kristallisation von wasserhaltigen Mineralien geringerer Wärmetönung ermöglicht (Meso- und Epistufe). Postkristalline Einschichtung der Kristalle in das tektogenetische Parallelgefüge ist fast allgemein verbreitet. Dies erklärt sich daraus, daß der Wärmestau unter dem aufgeschobenen Dache den Überschiebungsvorgang überdauert und damit kann auch die Diffusion noch nach dem Stillstand der Bewegung wirksam bleiben.

Die unmittelbare Wirkung des Wärmestromes ohne vorbereitende Durchbewegung verleiht der periplutonischen Regionalmetamorphose ihre kennzeichnenden Eigenschaften. Sie wird nicht erleichtert durch die „Umrührwirkung“ der durch die von außen her eingreifenden Energien bewirkten orogenetischen Deformation. Wo sie einsetzt, erzeugt sie unmittelbar und sofort den exothermen, wasserarmen Mineralbestand der Katakristallisation. Eine bestimmte Form der Metamorphose oder zunehmende differentielle Anatexis erzeugt das venitische, arteritische oder migmatitische Geäder und durch die Migmatitfront (WEGMANN) vollzieht sich nach innen zu der Übergang in die granitisch erstarrten Batholithen von pazifischem Chemismus.

Sie besitzt ihre eigene fließende Tektonik, in der aber auch noch die allgemeinen Richtungen eines älteren orogenetischen Streichens erhalten geblieben sein können. Viele Einzelheiten des Gefüges weisen auf eine wiederholt eingreifende Katakristallisation während der Durchbewegung. Sie erfolgte zugleich mit der makroplastischen Durchbewegung der Gesteinsmassen (s. oben S. 37). Katakristallisation als Kristalloblastese mit gleichzeitiger makroplastischer Umstellung der lagerhaften Gesteinsmassen zu mehr oder weniger unregelmäßigem Großgefüge, das mit mehr oder weniger konkordanten Übergängen sich den Umrissen der Batholithen anschmiegt, bilden zusammen die kennzeichnenden Merkmale der Intrusions-tektonik, die als allgemein verbreitet unter der Suprakruste anzunehmen ist.

Den Zustrom der Wärme vermittelt zunächst eine tiefgelegene, wahrscheinlich basaltische Magmenschicht; über ihr vollzieht sich ein beständig erneuertes Aufschmelzen des Daches und ein großzügiger Kreislauf der Stoffe bestimmt den pazifischen Chemismus der zunächst angeschlossenen palingenen Granite. Die diese Zone beherrschenden fließenden Bewegungen, die in der Intrusions-tektonik festgehalten sind, werden wohl hauptsächlich durch Zirkulationsströme in der durchwärmten und ungleichmäßig aufschmelzenden Masse verursacht. Durch die mit dem Aufschmelzen zunehmende Sonderung der Stoffe wird die Unruhe noch gesteigert. Als Anreger solcher Bewegungen können vielleicht überdies auch gewisse tektonische Verschiebungen in der Suprakruste in Betracht kommen. In ihrer allgemeinen Verbreitung ist aber die Intrusions-tektonik außer Bezug zu den großen Tangentialbewegungen, die auch die orogenen Gürtel der Erde geschaffen haben.

Der Migmatitfront mit der anschließenden periplutonischen Regionalmetamorphose wird man die wahre Ubiquität unter der äußeren Kruste zuerkennen dürfen. Mit dem Steigen und Sinken der Erdoberfläche im Laufe langer Zeiträume wogt sie langsam auf und nieder. Hier, wo das Wärmegefälle schwankt, um den Schmelzbereich der die Gesteine aufbauenden Stoffgruppen entsteht mit der Differenzierung zugleich der mannigfaltigste und bunteste Wechsel der vielfältig ineinandergreifenden Stoffgemenge und ihrer Gestaltungen.

Fortschreitender Abtrag müßte an allen Orten in hinreichender Tiefe diese Lage erreichen, die das Bild der größten Unruhe und Beweglichkeit unter der Erdkruste darbietet. Es zeigt sich um ein Vielfaches inhaltsreicher als der Oberbau auf gleichem Flächeninhalt. Man betrachte z. B. den Gesteinsreichtum, mit dem das fennoskanische Grundgebirge allenthalben zum Vorschein kommt, wo die einförmigen transgredierenden Sedimentfolgen über der russischen Tafel durchbrochen sind. Auch die in Faltengebirgen auf engerem Raume zusammengedrängten und in abwechslungsreicher Folge aufbrechenden Gesteinszüge erscheinen noch verhältnismäßig einförmig im Vergleiche zu den vielfältig abgestuften Differentiaten der Magmen und der nahezu unerschöpflichen Mannigfaltigkeit ihrer Kontakte und Verbände mit den von der periplutonischen Umwandlung ergriffenen Gesteinsmassen. Damit soll noch nichts gesagt sein über den Verlauf des dergestaltigen suprakrustalen makroplastischen Flusses in der Zeit; ob er einen in seinem eigentlichem Wesen als beständig und gleichmäßig fortwirkender Dauervorgang darstellt oder ob er mit abwechselndem Erlöschen und Aufflammen episodischen größeren Verschiebungen der Erdhaut anzugliedern ist. Unabhängig davon bleiben die regional verbreitete Anatexis in der Infrakruste und die Orogenese als zweierlei selbständige, durch Kräfte verschiedener Art bewirkte Vorgänge nebeneinander bestehen.

Wo sie zerborsten ist, sowie auch an den Rändern der ihr zugehörigen Kontinentalschollen kann die Suprakruste durch tangentialen Antrieb von außen her über ein Nachbargebiet vorgetrieben werden und durch Eindeckung von oben her in der belasteten Zone die enorogene Regionalmetamorphose bewirken. Im Anschluß an diese Bewegungen kann das unter der Suprakruste haftende syntektische oder pazifische Magma zum Aufbruch nahe am Schollenrande veranlaßt werden. Wo der oberste erstarrte

Teil der Suprakruste durch tangentielle Zerrung zerrissen wird, kann das undifferenzierte basaltische Magma emporsteigen und gelegentlich die Oberfläche erreichen. Wo es in größeren Kammern durch längere Zeit — vielleicht als Grabenfüllung wie bei Oslo — verweilt, kann es in verschiedene, die atlantische Gesteinsreihe darstellende Stoffgruppen zerfallen.

Bedeutungsvolle Schlüsse ergeben sich noch in bezug auf die Rolle, die das periplutonische Grundgebirge, d. i. die Unterlage der Suprakruste, während der ganzen wahrnehmbaren geologischen Vergangenheit in der Erdgeschichte zu übernehmen gehabt hat.

Die verbreitete Angabe, daß es in einer ältesten, „archaischen“ Zeit eine „universelle“ Gebirgsbildung die ganze Erdoberfläche mehr oder weniger gleichmäßig ergriffen hätte, wird einer kritischen Nachprüfung nicht Stand halten können; nachdem zu erkennen ist, daß im älteren und im jüngeren Grundgebirge gewisse weit verbreitete Störungsformen und Intrusionen nicht den Orogenen, d. i. nicht den Räumen alter Faltungszonen, zugehören, sondern nach ihrem Auftreten in verschiedenen Formationen, nach ihrer Lagerung und Metamorphose und nach ihrem Verbands mit außerorogenen und nicht metamorphen Gesteinen als ein Gebilde aufzufassen sind, dem man, als einem Erzeugnis der allenthalben und andauernd aus dem Erdinnern abströmenden Wärme, allgemeine Verbreitung unter der gegenwärtigen Erdkruste zuerkennen muß. Man wird gerade in bezug auf diese Fragen im kristallinischem Grundgebirge vor allem zu unterscheiden haben, was der periplutonischen und was der enogenen Regionalmetamorphose zuzuteilen ist, und in welcher Weise die beiden in manchen Gebieten aufeinanderfolgen und ineinandergreifen. Dabei ist wieder der Mineralbestand, oder die kristalline Fazies der Gesteine vor allem maßgebend. Durch ihren Verband mit der posttektonischen Katakristallisation enthüllt sich erst der wahre Sinn des ungebundeneren Streichens in den Gebieten der Intrusionstektonik und der periplutonischen Metamorphose.

Schon nach den bisherigen Erfahrungen wird kaum daran zu zweifeln sein, daß der größte Teil dieser angeblichen uralten und allgemein verbreiteten Orogenese der Intrusionstektonik zuzuweisen ist; darauf hin weist schon die Vorherrschaft der Granite im infra-krustalem Grundgebirge. Die „Ubiquität“ ist, wie gesagt, nicht als eine zeitliche aufzufassen, die bedingt wäre durch die Tiefenlage im stratigraphischen System, sondern als eine räumliche, die un-

gleichen Alters sein kann und bedingt ist durch die Lage im Grenzbereich zwischen der Supra- und Infrakruste.

In der aus den Aufschlüssen gewonnenen Übersicht über den Bau der Erdrinde erscheint demnach die periplutonische Regionalmetamorphose über einer ständigen im aufdringendem Wärmestrom erzeugten Konvektion, die auch einen Teil der Stoffe in einem großem Kreislaufe mit sich führt. Sie ist im Erdgeschehen einem fortklingendem Grundtone zu vergleichen, über den seit den ältesten vorkambrischen Zeiten der unrhythmische Wechsel der äußeren Ereignisse hingeht, der in dem Kommen und Gehen der Meere und in dem Werden und Vergehen der Gebirge abgebildet ist. Der unterlagernde Migmatitkontakt bietet keinerlei Hinweis auf irgendeinen wirksamen Anteil des Magmas an den allgemeineren und bedeutenderen Bewegungen der äußeren Erdkruste. Wie die Übergänge beweisen, ergreift die Migmatitfront ruhig lagerndes Gebirge und überführt es allmählich in die Anatexis und wo lebhaftere Umstellungen mit den Merkmalen der Intrusionstektonik dazukommen, können sie sich mit wenig gestörtem und nicht metamorphem Gebirge nahe berühren und übertragen sich nicht in der Form einer Orogenese auf die Oberfläche. Die Dynamik der Orogenese ist zu großzügig und mit zu weit ausgreifenden Vorgängen verbunden, als daß sie auf irgendwelche im Gesteinsgefüge zu erkennende Strömungen in der Tiefe bezogen werden könnte. Es gibt überhaupt keinen kinematisch abgebildeten Bewegungsfluß in höheren oder tiefer liegenden Gesteinskörpern. Was als solche erscheint, und damit alles Parallelgefüge von gebietsweiter Ausdehnung, ist den verfestigten Gesteinen aufgeprägt worden. Das kann durch weit ausgreifende Verschiebungen innerhalb der erstarrten periplutonischen Schollen geschehen. Sie bewirken eine „hypokinematische“ oder „infradeformative“ Regionalmetamorphose. Ein großer Teil der nach Gefüge und Mineralbestand den Mesoschiefern und Gneisen zugeordneten Gesteinen gehört hierher. Zwischenstufen verbinden sie mit den Gesteinen der enrogenen Regionalmetamorphose.

Sehr alte, vorkambrische Migmatitkontakte können noch anscheinend frisch und unverletzt erhalten geblieben sein. Das zeigt z. B. das Pellingebiet westlich von Helsingfors. Häufiger sind im Laufe der Zeiten verschiedene Schicksale nicht spurlos darüber hingegangen. Die Merkmale der verschiedenen Metamorphosen greifen ineinander, und es wird schwieriger sie voneinander zu

- ESKOLA, P., On the principles of metamorphic differentiation. *Comptes rendus de la Société géolog. de la Finlande*, N. 5, S. 68—77, Helsingfors 1932a.
- , Conditions during the earliest geological times. *Ann. Acad. Scienciarum Fennicae*, Ser. a, 36, No. 4, Helsingfors 1932b.
- , On the origin of granitic magmas. *Mineralog. petrogr. Mittlg.*, 42, S. 455—481, Leipzig 1932c.
- , On the differential anatexis of rocks. *Comptes rendus de la Société Géolog. de la Finlande*, No. 7, S. 12—25, Helsingfors 1933.
- , A note on diffusion and reactions in solids. *Comptes rendus de la Société Géolog. de la Finlande*, No. 8, S. 1—13, Helsingfors 1934.
- FRANK, M., Das Wandern der tektonischen Vortiefe in den Alpen. *Mittlgen. aus d. geol. Inst. d. technischen Hochschule in Stuttgart*, Nr. 12, 1930.
- GEVERS, T. W., Zur Gliederung des Grundgebirges im Windhoek-Bezirk Südwestafrikas. *Geol. Rundschau*, 26, S. 273—284, Stuttgart 1933.
- , Zur Tektonik des mittleren Südwestafrika (Vorl. Mittlg.). *Geol. Rundschau*, 26, S. 337—349, Stuttgart 1933.
- , Die Untersuchungen des Grundgebirges im westlichen Damaraland. I—III. *Neues Jahrb. f. Min. usw.*, Abt. B. Beilage-Bd. 72, S. 283—330, 399—428; 73, S. 27—41, 1934.
- GERTH, H., Die Bedeutung des Magmas in der Orogenese der südamerikanischen Kordilleren. *Geol. Rundschau*, 27, S. 87, Stuttgart 1936.
- GOLDSCHMIDT, V. M., Die Injektionsmetamorphose im Stavangergebiet. *Vidensk. Selsk. Skrift.*, 10, 142 S., Kristiania 1921.
- HARKER, A., *Metamorphisme. A study of the transformation of rocks.* Methuen & Co., London 1932.
- HAMMER, W., Einige Ergebnisse der geologischen Landesaufnahme in den Westtiroler Zentralalpen. *Geol. Rundschau*, 19, S. 147—160, Stuttgart 1925.
- , Eklogit und Peridotit in den mittleren Ötztaler Alpen. *Jahrb. d. geol. Bundesanst.*, 76, S. 98—123, Wien 1920.
- HEIM, ARNOLD, Energy sources of the earth's crustal movements. Report of XVI. Internat. Geol. Congress, Washington 1933.
- HOLTEDAHL, O., Tectonic disturbances connected with plutonic bodies in the Oslo region. *Amer. Journal of Science*, 29, S. 504—517, New Haven 1935.
- KIESLINGER, A., Geologie und Petrographie der Koralpe. I—VIII. *Sitzungsber. Akad. d. Wiss., math.-nat. Kl.*, 135—137, Wien 1926—1928.
- KÖHLER, A., Das Granulit- und Gneisproblem im südlichen Waldviertel. *Anzeiger d. Akad. d. Wiss., math.-nat. Kl.*, S. 27, 1925.
- , Zur Kenntnis der Ganggesteine im niederösterreichischen Waldviertel. *Mineralog.-petrogr. Mittlgen.*, 39, S. 125—200, Leipzig 1928.
- KÖLBL, L., Die Stellung der Gföhler Gneise im Grundgebirge des niederösterreichischen Waldviertels. *Tscherm. mineralog.-petrogr. Mittlgen.*, 38, S. 508—540, Wien 1925.
- , Das Nordostende des Venediger Massivs. *Sitzungsber. d. Akad. d. Wiss., math.-nat. Kl., Abt. I*, 141, S. 39—66, Wien 1932.
- KRANCK, E. H., On the crystalline complex of Liverpool Land. *Meddeleser om Grønland*, 95, S. 1—119, Kopenhagen 1935.
- KÜNDIG, E., *Selektive Metamorphose.* Schweizer Mineral.-petrogr. Mittlgen., 6, S. 295—305, Zürich 1926.
- , Neu Gesichtspunkte in den Problemen der Tessiner Tektonik. *Eclogae Geol. Helvet.*, 27, S. 333—336, Zürich 1934.

- LIMBROCK, H., Der Granulit von Marbach—Granz an der Donau. *Jahrb. Geolog. Bundesanstalt*, **74**, S. 139—182, Wien 1923.
- , Geologisch-petrographische Beobachtungen im südlichen Teile der Böhmisches Masse zwischen Marbach und Sarmingstein an der Donau. *Jahrb. Geolog. Bundesanst.*, S. 129—180, Wien 1925.
- MAC CALLIEN, W. S., The metamorphic rocks of Kintyre. *Transactions Royal Soc. Edinburgh*, **56**, S. 408—415, 1930.
- , Metamorphic diffusion. *Comptes rendus de la Societé géolog. de la Finlande*, S. 11—27, Helsingfors 1934.
- NIGGLI, P., Bemerkungen zum geologisch-tektonischen Problem der magmatischen Differentiation. *Schweizer mineralog.-petrogr. Mittlgen.*, **15**, S. 153—159, Zürich 1935.
- OBRUTSCHEW, J. W., Geologie von Sibirien. *Fortschritte der Geologie und Paläontologie*, herausgeg. v. W. SOERGEL, Borntraeger, Berlin 1930.
- PRECLIK, K., Zur Analyse des moravischen Faltenwurfes im Thayatale. *Verh. d. Geolog. Bundesanst.*, S. 181, Wien 1924.
- , Die moravische Zone im Thayatale. *Roenik* 1926.
- RAGUIN, E., Haute Tarantaise et Haute Maurienne. *Mem. pour servir à l'explication de la carte géologique détaillée de la France*. Paris 1930.
- SAHLSTEIN, TH. G., Petrographie der Eklogiteinschlüsse in den Gneisen des südwestlichen Liverpool-Landes in Ost-Grönland. *Meddelelser om Grönland*, **95**, Nr. 5, 43 S., Kopenhagen 1935.
- SCHEUMANN, K. H., Über die Altersstellung sächsischer Gneisgranite und Granitgneise. *Sitzungsber. u. Abh. d. Naturwiss. Ges.*, Jahrg. 1931, S. 118—136, Dresden 1932.
- , Über die petrographische Ableitung des roten Erzgebirgsgneises. *Mineralog.-petrogr. Mittlgen.*, **42**, S. 413—454, Leipzig 1932.
- SCHÜLLER, A., Prävariscische Glieder der sächsisch-fichtelgebirgischen kristallinen Schiefer. III. Über epizonal verformte Magmatite des westlichen Fichtelgebirges, ihre genetische Ableitung und ihre Weiterbildung in Hornfelsfazies, mit einem Vorwort von K. H. SCHEUMANN. *Abhandl. d. Math.-phys. Kl. d. Sächs. Akad. d. Wissensch.*, **42**, S. 1 bis 60, Leipzig 1934.
- SCHMIDEGG, O., Steilachsige Tektonik und Schlingenbau auf der Südseite der Tiroler Zentralalpen. *Jahrb. Geolog. Bundesanst.*, **86**, S. 119—149, Wien 1936.
- SCHWENKEL, H., Die Eruptivgneise des Schwarzwaldes und ihr Verhältnis zum Granit. *Tschermaks Mineral.-petrogr. Mittlgen.*, **22**, S. 1—182, Wien 1912.
- SCHWINNER, R., Scherung, ein Zentralbegriff der Tektonik. *Centralbl. f. Min. usw.*, S. 467 bis 476, Stuttgart 1924.
- , Der Begriff der Scherung in der Tektonik. *Das.*, S. 31—43, 1928.
- , Kristallisation und gerichteter Druck. *Tschermaks Mineral.-petrogr. Mittlgen.*, **37**, S. 219, Leipzig 1926.
- SEDERHOLM, I. I., On migmatites and associated pre-Cambrian rocks of south-western Finland. *Bulletin de la Comm. Geolog. de Finlande, Helsingfors*, No. 58. P. I. The Pelling region 1923. P. II. The region around the Barösundfärd W. of Helsingfors and neighbouring areas, No. 71, 1926.
- , On the Geology of Fennoskandia. *Das.* No. 98, Helsingfors 1932.
- SENG, N., Die Gefügeigenschaften von Granuliten. *Mineral.-petrogr. Mittlgen.*, **41**, S. 453 bis 472, Leipzig 1931.
- , Beiträge zur petrographisch-tektonischen Analyse des sächsischen Granulitgebirges. *Das.*, **45**, S. 373—423, 1934.

- STARK, M., Umwandlungsvorgänge in Gesteinen des Böhmer Waldes. *Lotos*, **76**, S. 1—77, Prag 1928.
- STRECKEISEN, A., Geologie und Petrographie der Flügelgruppe. Schweizer Miner.-petrogr. Mittlgen., **8**, S. 87—239, Zürich 1928.
- SUOSS, F. E., Beispiele plastischer und kristalloblastischer Gesteinsumformung. Mittlgen. d. Geolog. Ges. Wien, **2**, S. 150, Wien 1909.
- , Die moravischen Fenster und ihre Beziehung zum Grundgebirge des hohen Gesenkes. Denkschr. Math.-nat. Kl. Akad. d. Wiss. Wien, **78**, S. 541, 1912.
- , Über die Bedeutung der sogenannten Tiefenstufen im Grundgebirge der variszischen Horste. TSCHERMAKS Min.-petrogr. Mittl., **88**, S. 565—582, Wien 1925.
- , Intrusionstektonik und Wandertektonik im variszischem Grundgebirge. Borntraeger, Berlin 1926.
- , Begriff und Bedeutung der Intrusionstektonik. Geolog. Rundschau, **18**, S. 149—154, Berlin 1927.
- , The European Altai's and their correlation to the Asiatic structure. In I. W. GREGORY: The structure of Asia, S. 34—57, Methuen, London 1929.
- , Ostalpinen und böhmisches Grundgebirge. Mittlgen. d. Geolog. Ges. Wien, **24**, S. 29—37, Wien 1931.
- , A suggested interpretation of the Scottish Caledonide structure. Geolog. Magazine, **68**, S. 71—81, London 1931.
- , Europäische und nordamerikanische Gebirgszusammenhänge. Report XVI. internat. Geolog. Congress, Washington 1933.
- , Vergleichende Orogenstudien (vorläufiger Bericht). Anzeiger d. Akad. d. Wiss., Math.-nat. Kl., Nr. 18, S. 1—9, Wien 1934.
- TILLEY, C. E., The facies classification of metamorphic rocks. Geolog. Magazine, **61**, S. 167, London 1924.
- , A preliminary survey of metamorphic zones in the Southern Highlands of Scotland. Quaterly Journ. Geolog. Soc., **81**, S. 102, London 1925.
- WAGER, R., Die Schwarzwälder Gneise. Geol. Rundschau, **26**, S. 161—186, Stuttgart 1935.
- WALDMANN, L., Umformung und Kristallisation in den moldanubischen Katagesteinen des nordwestlichen Waldviertels. Mittlgen. d. Geolog. Ges., **20**, S. 35—101, Wien 1927.
- WEGMANN, C. E., Über Diapirismus (besonders im Grundgebirge). Bull. Comm. geol. Finl., **92**, S. 58—76, Helsingfors 1930.
- , Preliminary report on the Caledonian orogeny in Christian X's Land (North-East-Greenland). Meddelelser om Grønland, **103**, Nr. 3, 59 S., Kopenhagen 1935.
- , Zur Deutung der Magmatite. Geolog. Rundschau, **26**, S. 305—350, Stuttgart 1935.
- , Geologische Merkmale der Unterkruste. Das., **27**, S. 43—47, 1936.
- WENK, E., Beiträge zur Petrographie und Geologie des Silvrettakristallins. Schweiz. Mineral.-petrogr. Mittlgen., **14**, S. 169, Zürich 1934.
- , Kritik und Umdeutung der „Tektonischen Folgerungen aus Graubündner Quarzgefügediagrammen“. Das., **16**, S. 183—194, 1936.

Fortschritte der Geologie und Palaeontologie,

herausgegeben von Professor Dr. W. Soergel-Freiburg i. Br.

Bisher erschienen:		Einzelpreise
Band I Heft 1:	Das Batholithenproblem von Hans Cloos. Mit 24 Figuren im Text. (III u. 80 S.) 1923	Geheftet 3.80
„ „ 2:	Die Familien der Reptilien von Baron Nopcsa. Mit 6 Tafeln (III u. 210 S.) 1923	Geheftet 18.80
„ „ 3:	Die Gliederung der Erdrinde von S. v. Bubnoff. Mit 20 Figuren im Text. (III u. 84 S.) 1923	Geheftet 6.80
„ „ 4:	Angewandte Palaeontologie und Geologie der Flachsegesteine und das Erzlager von Salzgitter von J. Weigelt. Mit 74 Figuren und 14 Tafeln. (III u. 128 S.) 1923	Geheftet 8.40
Band II „ 5:	Diluviale Flußverlegungen und Krustenbewegungen von W. Soergel. Mit 10 Tafeln und 28 Figuren im Text. (VIII u. 388 S.) 1923	Geheftet 22.50
„ „ 6:	Die tertiären Landoberflächen in Thüringen von B. v. Freyberg. Mit 1 Tafel und 19 Figuren im Text. (III u. 77 S.) 1923	Geheftet 6.80
„ „ 7:	Das Devon in Schlesien und das Alter der Sudetenfaltung von E. Bederke. Mit 1 geolog. Karte, 1 Textabbildung und 5 Abbildungen auf 2 Tafeln. (V u. 50 S.) 1924	Geheftet 3.80
Band III Heft 8:	Palaeobiologische Betrachtungen über die fossile Pflanzenwelt von W. Gothan, Berlin. Mit einem Titelbild und 26 Figuren im Text. (III u. 178 S.) 1924	Geheftet 11.—
„ „ 9:	Die Schollen der norddeutschen Moränen in ihrer Bedeutung für die diluvialen Krustenbewegungen von Georg Petersen. Mit 1 Figur und 1 Karte. (IV u. 96 S.) 1924	Geheftet 8.—
„ „ 10:	Ammonitenstudien von Martin Schmidt. Mit 35 Textabbildungen und 1 Tafel. (90 S.) 1925	Geheftet 8.40
„ „ 11:	Über die Natur und Bildungsweise der marinen Eisensilikate, insbesondere der chamositischen Substanzen. Ein Beitrag zur Frage der Entstehung marin-sedimentärer Eisenerzlagerstätten. Von K. Berz. Mit 6 Textfiguren und 6 Tafeln. (156 S.) 1926	Geheftet 15.—
Band IV Heft 12:	Die südafrikanische Karoo-Formation als geologisches und faunistisches Lebensbild von Fr. von Huene in Tübingen. Mit 50 Textabbildungen und 1 Karte. (124 S.) 1925	Geheftet 17.—
„ „ 13:	Die Gliederung und absolute Zeitrechnung des Eiszeitalters von W. Soergel. Mit 3 Tafeln und 7 Abbild. (128 S.) 1925	Geheftet 10.30
„ „ 14:	Laterit. Material und Versuch erdgeschichtlicher Auswertung von Hermann Harrassowitz. Mit 43 Textfiguren und 1 Tafel. (VI u. 316 S.) 1926	Geheftet 30.—
Band V Heft 15:	Geologie von Sibirien von W. A. Obrutschew. Mit 1 Karte, 10 Taf. und 60 Fig. im Text. (XII u. 572 S.) 1926	Geheftet 47.—
Band VI Heft 16:	Der Zusammenhang von Flußlauf und Tektonik, dargestellt an den Flüssen SW-Deutschlands von W. Deecke. Mit 10 Textabbild. und 2 Tafeln. (IV u. 74 S.) 1926	Geheftet 6.60
„ „ 17:	Die Deckentheorie in den Alpen (alpine Tektonik 1905—1925) von Fr. Heritsch. Mit 16 Abb. (IV u. 135 S.) 1927	Geheftet 10.—
Band VI Heft 18:	Diluvialstratigraphie und Diluvialtektonik, Beiträge und Ergebnisse aus Norddeutschland von K. Beurien. Mit 11 Abbildungen. (VIII u. 182 S.) 1927	Geheftet 13.80
„ „ 19:	Die Pflanzenreste des mitteldeutschen Kupferschiefers und ihre Einschaltung ins Sediment. Eine palökologische Studie von Joh. Weigelt. Mit 1 Titelbild, 14 Textabb. u. 35 Taf. Geheftet 25.—	

Fortsetzung siehe Rückseite

Bei Abnahme eines Bandes oder von 4 verschiedenen Heften der „Fortschritte“ ermäßigen sich die Einzelpreise um 20 %.

Ausführliche Verlagsverzeichnisse kostenfrei