

Geologie der metamorphen Bereiche, Betrachtungen über Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft *)

Von H. H. READ, F. R. S.

Imperial College, London, SW. 7

Die Hundertjahrfeier einer Institution, an der alle Zweige der Wissenschaft gepflegt werden, kann zu Recht zum Anlaß genommen werden, um Ausschau zu halten, welchen Stand einzelne Disziplinen erreicht haben. Es kann der Mühe wert sein, Stille zu halten und den gegenwärtigen Stand eines Wissenszweiges zu betrachten, dabei der mühsamen und oft zögernden Schritte zu gedenken, mit welchen das Heute erreicht wurde, doch auch vorausblickend abzuschätzen, auf welchen Pfaden zukünftiger Fortschritt liegen dürfte.

Derartige, zeitweise durchgeführte Betrachtungen sind ganz besonders am Platze bei beobachtenden Wissenschaften, in denen Tatsachen — oder zumindest das, was als solche gilt — sich in erstaunlichem Tempo aufhäufen. Es ist natürlich daran zu erinnern, daß ein Aussortieren, Interpretieren und Korrelieren dieser Akkumulationen nur mit einer persönlichen Note durchgeführt werden kann — trotzdem hat diese Art von Arbeit Wert. All dies trifft ganz besonders zu auf jenen Teil der geologischen Arbeitsbereiche, die sich mit metamorphen und granitischen Gesteinen befassen, mit den plutonischen Gesteinen, wie ich sie genannt habe. In derartigen Studien ist der persönliche Faktor von besonderer Wichtigkeit, denn das, was durch die Interpretation zu verknüpfen ist, sind Feldbeobachtungen, und diese sind, abgeleitet von unzusammenhängenden, teilweisen und manchmal unvollkommenen Beobachtungen, tatsächlich eine besondere Klasse von Tatsachen. Den Betrachtungen dieser Skizze wird also notwendigerweise eine persönliche Note, oder wenn Sie wollen, sogar Voreingenommenheit anhaften; aber diese Note respektive Voreingenommenheit ist erwachsen aus fast einem halben Jahrhundert Feldarbeit in den metamorphen Bereichen und kann deshalb vielleicht hingenommen werden.

Ich stelle mir vor, Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft der metamorphen Bereiche zu betrachten. Geologie ist das Studium der Erdgeschichte, sofern diese in den die Kruste aufbauenden Gesteinen aufgezeichnet ist; der entscheidende Aspekt der Geologie ist deshalb der einer historischen Wissenschaft. Ich möchte deshalb Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft der metamorphen Bereiche betrachten als historische Dokumente und nicht primär als chemische, mineralogische oder petrographische Gegebenheiten.

Was ist nun Vergangenheit, Gegenwart oder Zukunft eines lebendigen Wissenszweiges? Für meinen Zweck möchte ich die Vergangenheit als die Zeit vor dem ersten Weltkrieg definieren; ich möchte besonderen Wert auf das legen,

*) *Metamorphic Geology: Reflections on its Past, Present and Future* von H. H. READ, F. R. S. erschien 1957 an einem für den europäischen Leser nicht ganz leicht zugänglichen Ort (Madras). Prof. READ hat in dankenswerter Weise zugestimmt, daß eine vom Unterfertigten zu entwerfende Übersetzung in den Verh. G. B.-A. erscheinen könne.

Das Essay von H. H. READ erscheint uns besonders wertvoll, weil hier, in einer Zeit von sich immer weiter entwickelnden Hilfsmethoden, ein entscheidendes Wort für die Bedeutung der Feldarbeit auch heute noch, und für alle Zukunft gesprochen wird.

Während vielen noch so wertvollen Hilfsmethoden doch irgendwie die Gefahr innewohnt, die große Silhouette unserer Berge und Profile in ein Mosaik von Dünnschliff- und anderen Mikrobearbeitungen aufzulösen, so mahnt die Auffassung READS zurecht, daß die Geologie als Wissenschaft immer einen Großteil ihres Weltbildes aus jenen Eindrücken aufbaut, die mit dem freien Auge von Horizont zu Horizont erfassbar sind.

H. KÜPPER

was den Studenten zu der Zeit vorgelegt wurde, wie ich Student war. Die Gegenwart dauert vom ersten Weltkrieg bis heute; persönlich gesehen ist es meine aktive Zeit als Geologe im Metamorphikum, die, wie ich hoffe, noch nicht ganz abgeschlossen ist. Die Zukunft ist die aktive Arbeitszeit aller jener, die, heute Studenten, einmal Geologen der metamorphen Bereiche sein werden. Die Skizze, die ich Ihnen vorlegen möchte, wird wohlüberlegt nur aus einigen groben Hauptlinien bestehen können, eine rigorose Auswahl aus einem fast unübersehbaren Material ist nötig; ich kann nur einige wenige der großen Namen, Ideen und Arbeiten erwähnen, die heute diesen Zweig der Erdgeschichte tragen.

Die Vergangenheit

Vor einem halben Jahrhundert hatte der Student der metamorphen Bereiche ein Arbeitsgebiet vor sich, das relativ einfach und wohlumschrieben war, verglichen mit den weiten Verzweigungen und großen Ausdehnungen, mit denen es der heutige Student zu tun hat. Die Grundgliederungen lagen fest. Es herrschte die dem damaligen Stand der Wissenschaft entsprechende Tendenz, die Vorgänge der Metamorphose allzusehr zu vereinfachen und das, was wir heute als vielfältige und verschiedenartige Vorgänge erkennen, durch einige wohl umschriebene und trennbare Mechanismen zu erklären. In der orthodoxen Betrachtungsweise gab es zwei Arten von Metamorphose: eine Dynamo- und eine zweite, die thermische oder Kontaktmetamorphose. Die Dynamometamorphose, die Verwandlung der Gesteine durch Druck und Bewegung, entwickelte sich aus den frühen Konzepten von LOSSEN (1875) und LEHMANN (1884) und fußten auf dem Studium der kristallinen Schiefer in Deutschland. Ein anderer Klassiker dieser Epoche waren TEALL'S (1885) Darlegungen der Dynamometamorphose an Hand der Verwandlung von Diabas in Hornblendeschiefer, in dem bekannten Scourie-Gang in NW Schottland. Beim zweiten Typus der Metamorphose wurde die Veränderung der Gesteine abgeleitet von der Erhitzung durch das eindringende Magma. Die frühe Studie von ROSENBUSCH (1877) über die „Veränderungshöfe“ rund um die kleinen Granite der Vogesen, sind das Modell gewesen für diesen Typus der Vorgänge der Metamorphose.

ROSENBUSCH und mit ihm viele Forscher auf dem Gebiet der thermischen Metamorphose, war der Auffassung, daß kein Stoffaustausch stattgefunden habe über den Kontakt vom Magma zu den intrudierten Gesteinen, und dies wurde auf alle Kontakte übertragen. Dagegen nahm jedoch die französische Schule Stellung, MICHEL LEVY (1893—94), LACROIX (1898—99, 1899—1900) und andere, die darauf hingewiesen hatten, daß an den Kontakten in ihrer Granite ein ausgesprochener Stoffaustausch stattfindet, sowie, daß die Vorgänge der Feldspatisierung sowie Granitisierung weit verbreitet seien und zugleich entscheidende Teile des Mechanismus der Platznahme der Granite darstellten. Die allgegenwärtigen Gneise mußten nicht alle entstanden gedacht werden durch die Vorgänge der Dynamometamorphose. Dem scharf beobachtenden Geologen konnte es damals schon auffallen, daß die Vorgänge der Metamorphose vielfältiger sein dürften, als seine Lehrmeister dachten.

Im Anfang dieses Jahrhunderts beschrieb der Finne SEDERHOLM (1907) die Entstehung von Mischgesteinen, der *Migmatite*, bei welchen eine Beimengung in verschiedener Art und Weise, sowie verschiedenem Ausmaß von granitischem Magma und Hüllgestein eine Rolle spielt. Er vertrat die Ansicht, daß die Granite der Anatexis, ultrametamorphen Vorgängen in den tiefen Teilen der Erdkruste ihr Entstehen verdanken. ADAMS und BARLOW (1910), Kanada, hatten in ihrer

Studie des Haliburton-Bancroft-Gebietes, Ontario, die Entstehung des granitischen Magmas durch Wiederaufschmelzung erklärt. Eine weitere klassische Arbeit über Migmatite war FENNER's (1914) Deutung gewisser New-Jersey-Gneise, als von gemischter Herkunft abgeleitet. In Schottland hatten HORNE und GREENLY (1896) eine innige Durchdringung des umliegenden Gesteins durch granitisches Material, verbunden mit einer Zunahme der Intensität der Metamorphose, beschrieben. TERMIER (1912) hatte den Gedanken des „Fettfleckmechanismus“ in der regionalen Metamorphose sowie Granitisation eingeführt — nach dem Flüssigkeiten in einem Schichtstoß sich unregelmäßig verbreiten können, so etwa wie ein Tropfen Fett oder Öl in Lagen von Stoff eindringt. Beweise für Umwandlung und Mischung kamen so aus Beobachtungen verschiedener Länder zusammen; trotzdem blieben im akademischen Bereich die Ideen von ROSENBUSCH vorherrschend. Wenn aber der damalige Student es dafür übrig hatte, einige Schwierigkeiten auf sich zu nehmen, so konnte er sich in ebensoviel ketzerischen Ideen ergehen, wie dies sein heutiger Kollege tun kann.

BARROW (1892, 1912) hatte in SE-Schottland einen breiten Bereich metamorpher Gesteine, verknüpft mit dem, was wir heute Migmatite nennen würden, behandelt und hat hierbei Zonen zunehmender Metamorphose ausgeschieden, die in pelitischen Gesteinen durch verschiedene Index-Mineralen gekennzeichnet sind; von niedrig zu höher metamorph aufeinanderfolgend, etwa als Chlorit, Biotit, Granat, Staurolit, Kyanit und Sillimanit. BARROW deutete diese Zonen der Metamorphose als riesige Aureole einer thermischen Metamorphose, die um den Kern eines migmatitischen Granites angeordnet ist. Ein anderer Typus der zonaren Anordnung wurde in einer grundlegenden Arbeit von BECKE (1913), Wien, dargelegt. BECKE zeigte, daß Mineralassoziationen und Texturen der metamorphen Gesteine von den Druck-Temperaturbedingungen während ihrer Bildung abhängen und baute auf diesem Prinzip die sogenannten Tiefenstufen auf. Seither wurden diese weiterentwickelt durch GRUBENMANN und NIGGLI (1924), und zwar aufgegliedert in die höchste oder Epizone, in der niedrige Temperatur und starker Stress, in die mittlere Mesozone, in welcher mäßige Temperatur und mäßiger Stress, und in die Katazone, in der hohe Temperatur und niedrige Stressbedingungen vorherrschen.

In den verschiedenen Teilfeldern der Geologie der metamorphen Bereiche, wie sie im vorherigen skizziert wurden, sind wesentliche Beiträge von den verschiedensten Ländern beigebracht worden. Der Student konnte zu meiner Zeit seine Kenntnisse über thermische Metamorphose erweitern durch das Studium von GOLDSCHMIDT'S (1911) wunderbarer Darstellung der Kontaktmetamorphose im Oslo-Distrikt, oder über Dynamometamorphose an Hand von NIGGLI'S (1912) Beschreibung der kristallinen Schiefer des Gotthardmassivs. Eine ganze Menge amerikanischer Forscher hat den Stoffaustausch behandelt, der an vielen ihrer Kalkstein-Granodiorit-Kontakte besteht. Beispiele derartiger Bearbeitungen könnten noch beliebig erweitert werden, jedoch fand im großen und ganzen der Student jener Tage die Geologie der metamorphen Bereiche relativ einfach. Es gab Kontakt-Metamorphose (ohne Stoffwanderung) und Dynamometamorphose; metamorphe Zonen sowie Tiefenstufen waren anerkannte Begriffe, Migmatisierung war zugelassen, jedoch verknüpft mit granitischem Magma; Anatexis galt als eine sehr fortschrittliche Idee, während Granitisierung kaum Erwähnung fand in jenen geologischen Kreisen, die etwas auf ihren Stand hielten. Was für Veränderungen die Gegenwart an diesen Gedanken der Vergangenheit auch angebracht haben möge, die oben erwähnten klassischen Arbeiten und noch viele

andere können auch heute noch mit großem Vorteil studiert werden. Man wird in ihnen die Grundlage finden für viele der allerneuesten Interpretationen der Erscheinungen der Metamorphose.

Die Gegenwart

Die Weiterentwicklung der Geologie der metamorphen Bereiche seit dem ersten Weltkrieg ist weitreichend und vielseitig, jedoch, wie bereits angedeutet, handelte es sich in vielen Fällen um die Weiterentwicklung von bereits bestehenden Gedankengängen. Im folgenden seien die wesentlichen Punkte dieser Entwicklung skizziert und wo nötig mit erläuternden Bemerkungen versehen.

Lassen wir mit BARROWS grundlegendem Konzept der metamorphen Zonen beginnen. Nach meiner Auffassung wurden BARROWS ursprünglich schottische Zonen mit Vorteil auf Gesteine einiger weniger anderer Gebiete angewandt, aber im allgemeinen scheinen sie mir nicht direkt für den Export außer Schottland geeignet zu sein. So zum Beispiel sind sie in Dutchess County, New York, nach der Tiefe verzerrt, wie von BALK und BARTH (1936) dargelegt worden ist. Andererseits sind in Donegal, Irland, keine der Barrow-Indizes in den dortigen metamorphen Gesteinen gültig, Granat, Staurolith, Biotit, Sillimanit und Andalusit kommen alle im gleichen Gestein vor. Der Grund hierfür ist deutlich — die verschiedenen Minerale widerspiegeln eben verschiedene Episoden in der Geschichte der metamorphen Gesteine. Worauf ich später noch mit Nachdruck zurückkommen möchte, die Zeit-Dimension ist in der Geologie der metamorphen Bereiche ein ebenso entscheidendes Element, wie in allen anderen Sparten der Wissenschaft. Zonen der Metamorphose können nur richtig beurteilt werden unter Bezugnahme auf die geologische Geschichte der Gesteine und eine Abhängigkeit der Deutung von einem einzigen Mineral ist eine heikle Angelegenheit. Das gilt besonders für Gesteine mit verschiedener Grundzusammensetzung, da dann die Index-Minerale zu verschiedenen Zeiten in verschiedenen Gesteinen auftreten können.

Die Gefahr, die darin enthalten ist, wenn man für eine zu gebende Antwort von einem Leit-Mineral abhängig ist, wird dargelegt am Gebrauche der Stress- und Antistress-Minerale von HARKER (1932). Da wir inzwischen gelernt haben, daß alle Stress-Minerale auch in einem Milieu vorkommen können, wo kein Stress sich ausgewirkt hat und umgekehrt, ergeben sich aus diesen Indizien keine historisch richtigen Ableitungen. Immer wieder finden wir, daß wir nur einen solchen historischen Ablauf anerkennen können, der in der Geschichte aller Komponenten, Strukturen und Texturen sich widerspiegelt und in diesen abgebildet ist.

Eine der fruchtbarsten modernen Entwicklungen auf dem Gebiete der metamorphen Bereiche sind jene Ideen, die sich um das Prinzip der metamorphen Fazies ESKOLA (1922), gruppieren. Dieses Prinzip hat manche Ähnlichkeiten mit der durch GRUBENMANN und NIGGLI (1924) propagierten Erweiterung der BECKESchen Tiefenstufen. In den metamorphen Gesteinen, die sich in einem chemischen Gleichgewicht befinden, werden charakteristische Mineralvergesellschaftungen in Serien von gleichem Chemismus durch die Druck-Temperaturverhältnisse bedingt. ESKOLA zeigte z. B. in seiner Pionierarbeit über Karelien (1925), daß Grünschiefer, Epidotamphibolite und Amphibolite eine isochemische Reihe bilden, die sich von Diabasen bei Metamorphose mit ansteigender Temperatur ableiten. Wie angedeutet, sind die GRUBENMANN-NIGGLI-Stufen verknüpft mit der metamorphen Fazies, wie auch Erscheinungen, über die von

ROQUES (1941) und anderen berichtet wurde. Entsprechend angewendet, ist das Fazies-Prinzip sowie die Tiefen-Stufen von großem Wert für die Geologie der metamorphen Bereiche — aber ihre Anwendungsmöglichkeit hat Grenzen und nach meiner Meinung ist Vorsicht am Platze. Wiederum verdient der Zeitfaktor vollste Beachtung und nicht-gleichgewichtige Mineralvergesellschaftungen können von gleich großer Bedeutung sein wie jede andere.

Es sind die kristallinen Schiefer, metamorphen Gesteine, auf welche die modernen Fortschritte der *Gefügekunde* (*petrofabrics*) besondere Anwendung finden. Dieser Zweig der petrographischen Forschungen ist mit dem Namen SANDER (1930), Innsbruck, verknüpft. Die meisten metamorphen Gesteine haben eine vorbestimmte Anordnung der sie zusammensetzenden Minerale, entweder nach der Form oder nach dem Kristallgitter. Dieses Gefüge ist das Abbild des Bewegungsflusses, welchem das Gestein ausgesetzt war. Eine enorme Menge mühseliger Detailbeobachtungen steht zur Verfügung, aber ihre Deutung ist oft eine offene Frage. Es scheint mir, daß die Gefügekunde oft ein wertvolles Hilfswerkzeug bei der Auflösung der Geschichte der metamorphen Gesteine sein kann, aber sie ist nicht das Hauptwerkzeug — dies ist und bleibt das aus den geologischen Feldbeobachtungen abzuleitende Gegenseitigkeitsverhältnis der Gesteine. Ich glaube, daß es der richtige Weg ist, die geologische Geschichte zu gebrauchen, um daraus das Gefüge abzuleiten, und nicht umgekehrt.

Die gleiche Auffassung möchten wir mit gleicher Deutlichkeit anwenden auf jene Strukturen der metamorphen Gesteine, die heute unter dem Begriff „*lineation*“ (Linear-Gefüge) zusammengefaßt werden. Diese entstehen durch lineare Anordnung von Kristallen oder Kristallaggregaten, von Falten- und Fältelungsachsen, von Schnittflächen von Schichtflächen, Schieferungsflächen, Klüftflächen und anderen Erscheinungen; sie werden speziell von E. CLOOS (1946) und G. WILSON (1946) verfolgt. Das Studium des Lineargefüges an sich, so will mir scheinen, wird kaum einen adäquaten Ersatz bieten können für eine korrekte Deutung der geologischen Geschichte eines Gebietes; dagegen, wenn die geologische Geschichte sich aus der Summe aller Erscheinungen ergibt, dann können die Lineargefüge entsprechend gedeutet werden. Das in einem Gebiet kartierte Lineargefüge, wie z. B. in Teilen von Donegal, Irland, kann als Ganzes den Eindruck einer vollkommen willkürlichen, ungeordneten Anordnung machen; aber dieses gleiche Gefüge beginnt Züge einer Ordnung zu zeigen, wenn sich ergibt, daß jeder Episode in der geologischen Geschichte des Gebietes eine bestimmte Anordnung zugeordnet ist — auch hier wieder erscheint uns der Einbau des Zeitelementes entscheidend im Studium der metamorphen Gesteine. Es ergab sich z. B. kürzlich in Donegal, daß ein wirklich großartiges Lineargefüge in weiten Bereichen nicht mit normalen tektonischen Bewegungen verknüpft ist, sondern mit der Platznahme eines zähflüssigen Granitkörpers — aus der geologischen Geschichte läßt sich die Deutung des Lineargefüges korrekt ableiten.

Lineargefüge sind nur ein Typus von *Mikrostrukturen*, die heutzutage im Brennpunkt des Interesses der Kristallingeologen stehen. Kleine Strukturen verschiedenster Type — Mikrofalten, Fältelungen, Klüftungen, Schleppungen und ähnliches —, alle müssen durch Kartierung erfaßt werden. Besonders wichtig hierbei ist die relative Altersfestlegung der beobachteten Strukturen, insofern, als hieraus die Formulierung der Geschichte der strukturellen Entwicklung eines Gebietes abgeleitet werden kann. Diese Geschichte kann meist in bezug gesetzt werden mit der Geschichte der Metamorphose und ergibt dann ein wirklich detailliertes Bild des geologischen Ablaufes. Auf diese Art hat z. B. RAMSAY

(unpubliziert) in Teilen der Moineseries in N-Schottland die Kleinstrukturen mit zwei Episoden einer großräumigen Faltung in bezug gesetzt. Wie immer ist die Zeitfestlegung entscheidend in der Erdgeschichte, so wie in allen anderen historischen Disziplinen auch.

Zwischen den Weltkriegen lag der Begriff der differentiellen Metamorphose im Interessenbereich von ESKOLA (1932), READ (1933, 1934b) und anderen. Gesteinsmaterial, besonders in der flüssigkeitsähnlichen Phase der Migmatite, kommt in Bewegung und ergibt nach einer Umgruppierung Stoffanordnungen, die von der ursprünglichen wesentlich abweichen. Als Beispiel darf ich hinweisen auf die Bildung von Quarz-Chloritgängen in Chloritschiefern, von Quarz-Andalusitgängen in Andalusitschiefern, von Quarz-Kyanitgängen in Kyanitschiefern usw. Teilweise Umsetzung in dampfförmige, bzw. flüssige Phase scheint bei erhöhter Mobilität hier am Werk zu sein.

Die regionalmetamorphen Gesteine sind in ihren höheren Stufen verbunden mit Gebieten von Granitisation oder Migmatisation — wobei hier als Granitisation jener Vorgang verstanden wird, nach dem granitische Gesteine entstehen, ohne ein magmatisches Stadium durchlaufen zu müssen. Das Verhältnis zwischen Regionalmetamorphose und Granitisation ist natürlich der Gegenstand vieler Diskussionen; dies in Zusammenhang mit der allgemeinen Debatte über die Granitgesteine als ganze Gruppe. Ich habe die Plutonischen Serien als brauchbaren genetischen Begriff vorgeschlagen, sofern sie die metamorphen, migmatitischen und granitischen Gesteine umfassen. Die Regionalmetamorphose muß man auf die eine oder andere Art mit einem Migmatisations- oder Granitisationszentrum verknüpfen. Wenn dies tatsächlich der Fall ist, dann kann die Gültigkeit und das Ausmaß jeder angenommenen Granitisation nur beurteilt werden nach dem geologischen Rahmengerüst, in dem sie auftritt. Großmaßstäbliche Granitisation muß verknüpft sein mit Regionalmetamorphose und Migmatisation. Scheinbar als Ausnahme zu dieser Regel müssen wir die orogene Metamorphose betrachten, die Entwicklung von intensiv gefalteten Gesteinen niedriger Metamorphose in ausgestreckten Bereichen, den universell verbreiteten Phylliten. Aber selbst diese Ausnahme fügt sich in das dramatische Gesamtbild von Orogenese und Granitisation.

Das Zeitelement in der Geologie der metamorphen Bereiche

Ich darf daran erinnern, daß ich Geologie als Erdgeschichte definiert habe und in jeder Geschichte ist die Zeit eine wesentliche Dimension. Nach meiner Meinung ist der größte Fortschritt in der Geologie der metamorphen Bereiche in den letzten 30 Jahren darin gelegen, daß in zunehmendem Maße die zeitliche Einstufung der Ereignisse in die verschiedensten Zeitskalen Beachtung findet. Es ist nicht länger zureichend, ein metamorphes Gestein, sagen wir, als Granat-Stauroolith-Glimmerschiefer zu beschreiben und es dabei zu belassen; eine ganze Menge von möglichen Zeitbeziehungen ist in gleicher Weise in Betracht zu ziehen. Wir wollen uns nun diesem Fragenkreis etwas näher zuwenden — da ich im vorherigen mehrfach auf die Zeitfrage Anspielungen gemacht habe.

Der Stil der Kristallinstudien hat sich in gar manchen Ländern grundsätzlich geändert durch die Festlegung einer stratigraphischen Abfolge in den vollkommen metamorphen Gesteinen. Dies war erreichbar durch das Studium erhalten gebliebener, ursprünglicher Sedimentärgefüge, wie z. B.

Kreuzschichtung, gradierter Schichtung, die eine Ableitung des ursprünglichen Lageverhältnisses unten-oben zulassen. Mit dieser Kenntnis des ursprünglichen stratigraphischen Verbandes, auch der metamorphen Gesteine, kann der Geologe nun mit einigem Zutrauen an die Auflösung von Strukturen auch in komplizierten Gebieten herangehen. Als Beispiele für diese Methoden und Resultate sei auf die Arbeiten von BAILEY (1930), READ (1936, 1955 b), IYENGAR, PITCHER & READ (1954) hingewiesen. Der Kristallingeologe hat damit ein Werkzeug in der Hand, das ebenso schlagkräftig und brauchbar ist, wie für den Stratigraphen die zwei Grundgesetze von W. SMITH.

Es besteht eine ganze Serie von Zeitbeziehungen zwischen den verschiedenen Episoden der Kristallisation, Deformation, Migmatisierung, Granitisierung, Magmatisierung und Orogenese, welche die metamorphen Gesteine beeinflussen und welche dementsprechend heute vom Kristallingeologen im Auge behalten werden müssen. Wir werden im folgenden mit der Erläuterung einfacher Fälle beginnen und zu komplizierteren fortschreiten.

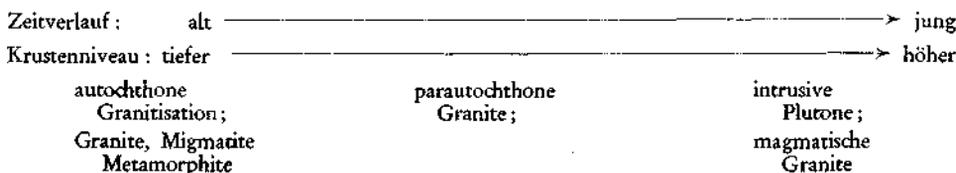
Das gegenseitige Verhältnis der Zeitabschnitte der Kristallisationen der Mineralkomponenten der metamorphen Gesteine verdient genaues Studium, wie z. B. in den Untersuchungen von CHENG (1944) und HIETANEN (CLOOS und HIETANEN, 1941). In bestimmten, metamorphen Gesteinen kann Deformation und Kristallisation zeitlich voneinander verschieden sein. Das bekannte Beispiel der „gerollten“ Granate mit spiralig angeordneten Einschlüssen der Gesteinsgrundmasse spricht für Gleichzeitigkeit von Bewegung und Kristallisation. Drei große Gruppen von Zeitbeziehungen ergeben sich hieraus als: präkristallin, parakristallin und postkristallin mit klarer und wohldefinierter Bedeutung.

Auf diesem Wege kann die Geschichte der Metamorphose eines kompliziert gebauten Gebietes aufgeklärt werden. Als Beispiel darf ich auf meine eigene Arbeit in Unst, Shetland Islands (READ 1934 a, 1937), hinweisen, wo gezeigt werden konnte, daß ein bestimmter Krustenteil drei Metamorphosen verschiedener Prägung ausgesetzt war: eine erste ergab Staurolithe, Kyanithe, Granat und Biotit in pelitischen Gesteinen; während einer zweiten wurde diese erste Assoziation instabil, unter Entstehung von Serizit, Chlorit und Chloritoid, die aber ihrerseits durch eine dritte wiederum ersetzt wurden von Chlorit und Serizit. Eine lange Geschichte der Metamorphose unter wechselnden physikalischen Bedingungen konnte so entziffert werden, und diese Geschichte war klar und deutlich in den Feld- sowie in den Mikroskopbeobachtungen.

Als zweites Beispiel einer derartigen Polymetamorphose möchte ich hinweisen auf die Untersuchungen von SUTTON und WATSON (1951) über den Lewisian-Komplex in NW-Schottland. Diese Bearbeiter konnten darlegen, daß ein früher Komplex charnokitischer Fazies gehoben und abgekühlt wurde, derart, daß die eindringenden Diabasgänge abgekühlt wurden; danach wurde dieser Gesamtkomplex einer zweiten Metamorphose ausgesetzt, die in einer amphibolitischen Fazies resultierte. Untersuchungen dieser Art geben dem geologischen (Zeit-) Begriff Ära eine neue Bedeutung im Anwendungsbereich auf kristalline Schiefer, der ebenso gültig ist, wie der Begriff Ära im Bereich der normalen Stratigraphie.

Mit zunehmendem Breitenwachstum eines Faltungsgürtels wird Magma und Migma einbezogen und auch das Zeitverhältnis zwischen Orogenese und der Platznahme oder Entstehung von magmatischen oder migmatischen Gesteinen wird zu beachten sein.

Die Zeitfestlegung der Migmatisierung oder des Auftretens verschiedener Typen granitischer Körper ist von großer Bedeutung im Studium der plutonischen Gesteinsserien. Intrusionen wurden als prä-, syn- und posttektonisch datiert. Ich habe getrachtet, diese Verhältnisse für das, was ich *granite series* (READ, 1949) umschreiben möchte, zu kodifizieren; Gesteinsgruppen, welche Auftreten und Form verschiedener granitischer Körper in bezug setzen zu ihrer Stellung im Faltungsgürtel und zu der Zeit ihrer endgültigen Erstarrung. Die „*granite series*“ können folgendermaßen dargestellt werden:



In den tiefgelegenen Teilen des Faltungsgürtels werden im Frühstadium der Orogenese ausgedehnte Komplexe von Granitisationsgraniten, verbunden mit Migmatiten und weitverbreiteten kristallinen Schiefem gebildet. Mit dem Fortschreiten der Orogenese lösen sich Teile dieser autochthonen Granite von ihrer Umgebung und rücken in höhere Stockwerke des Faltungsgürtels vor. Diese Vorgänge setzen sich weiter fort mit dem Aufquellen richtig intrusiver und magmatischer Körper in immer späteren Stadien und in höhere Niveaus und kulminieren schließlich in der jüngsten und höchsten Platznahme von Granitplutonen, die sich als quasi-starre Körper ihren Weg bis in die postorogenetischen Sedimente bahnen können. Ich möchte glauben (obwohl ich an vorhergehender Stelle andeuten konnte, daß ich selbst nicht ganz unbeeinflusst sei), daß der Begriff der *granite series* in dieser Fassung ein Zuordnungsprinzip werden kann, von dessen ordnender Perspektive sich Orogenese, Granitisation, Metamorphose und Granitplatznahme verknüpfen und verstehen lassen. Ich habe weiter angedeutet, daß wir hier berichtet haben über verschiedene Aspekte eines großen Vorganges — nämlich der Niederbiegung des Sina unter der Geosynklinaldepression. Mit dieser Niederbiegung dürfte die Verflüssigung des Sina einsetzen, woraus sich wiederum die Ophiolithe und verwandten basischen Gesteine der Geosynklinalserien ableiten. Mit der darauffolgenden Konsolidierung der Simaschmelze entstehen alle jene Säfte, welche die Geosynklinalsedimente granitisieren, der Zyklus der *granite series* ist eingeleitet; in dem Maße sich der Faltungsgürtel entwickelt, nehmen die Teilelemente dieses Zyklus den ihnen zukommenden Platz in der Abfolge ein (READ, 1955 a).

Wie ich im Vorhergehenden bereits mehrmals betonen konnte, ist die zeitliche Einstufung der verschiedenen Ereignisse, welche alle zusammen die Geologie der metamorphen Bereiche ausmachen, der wertvollste Aspekt unserer heutigen Studien. Ein metamorphes oder granitisches Gestein gilt heute als Dokument eines ganz bestimmten Stadiums in der Entwicklung der Erdkruste. Diese Gesteine entstehen nicht unter zufälligen Bedingungen, sondern entstehen zu bestimmten Zeiten in wohlumschriebenen Bereichen. Wenn wir einmal etwas mehr über die Geologie der metamorphen Bereiche wissen werden, wird sich eine einmal von mir geäußerte Meinung bestätigen, nämlich, daß der Petrogenese in der historischen Geologie dieselbe Rolle zufallen wird, wie die Stratigraphie sie heute einnimmt.

Die Zukunft

Auf Grund nicht unbeträchtlicher Erfahrungen im Gebiete der metamorphen und granitischen Gesteine dürfte es mir vielleicht zustehen, die Hauptresultate dieser Erfahrung zu formulieren, sowie anzudeuten, was nach meiner Meinung eine wünschenswerte Zukunftsentwicklung auf diesem Arbeitsgebiet sein dürfte.

Eine einfache Überzeugung liegt allem zugrunde: keine zwei metamorphen Gesteine sind identisch — die Variablen, welche zu ihrer Bildung führen, sind zu vielfältig. Es sind in Betracht zu ziehen die variablen Bedingungen vor der Metamorphose, die Variablen, welche während einer oder mehrerer Metamorphosen eine Rolle spielen, sowie auch die postmetamorphen Variablen. Jedes aus metamorphen Gesteinen zusammengesetzte Gebiet sollte man so angehen, als wenn es ein Teil eines unbekanntes, außerirdischen Körpers wäre. Es ist nötig, es in allen seinen Eigenheiten zu betrachten; man muß den Gesteinen ihre eigene Geschichte ablauschen, selbst dann, wenn diese Geschichte mit dem bisher bekannten nicht übereinstimmen sollte. Verallgemeinerungen im Gebiet der metamorphen Bereiche können wirklich nur den großen Rahmen betreffen und auch die Übertragung von in einem Gebiet erarbeiteten Resultaten auf ein anderes erfordern vorsichtigste Beobachtung. Wie muß also der Kristallingeologe zu Werke gehen? Die Antwort an alle Geologen liegt im Rate des berühmten CH. LAPWORTH — *map it, my boy, and it will all come out*. Die Geologie der metamorphen Bereiche ist, wie die Geologie überhaupt, auf Feldarbeit gegründet und Fortschritte werden sich einstellen mit mehr, besseren und verschiedenartigen Kartendarstellungen.

Es ist hier jedoch eine einfache Erinnerung nötig: der Wert einer geologischen Karte hängt in erster Linie davon ab, ob wirklich viel aufgeschlossener Felsgrund zu kartieren ist. Die Wichtigkeit einer dichten Streuung von Aufschlüssen in Geländestudien des Kristallin kann nicht genug betont werden. Es wäre im Interesse des Fortschrittes der Kristallingeologie gelegen, wenn die verschiedenen Autoren deutlich angeben würden, welcher Art die sichtbaren Aufschlüsse im beschriebenen Kartierungsgebiet seien, so daß man auch daraus einen Schluß auf die Wertigkeit der Folgerungen ziehen kann. Das gleiche gilt, natürlich übertragen, auch für alle Untersuchungen statistischer Art; denn die Untersuchung eines Dünnschliffes oder eines Grammgewichtes Fels kann unmöglich Auskunft geben über die Zusammensetzung eines Granitkörpers von einigen tausend Kubikkilometern Inhalt — die eine Analyse und der eine Dünnschliff sind zugegeben wertvoll, aber eine Extrapolation von ihnen aus, ohne Kontrolle, kann gefährlich werden. Soll ich es hier wagen vorzuschlagen, daß die Routinekartierung von schlecht aufgeschlossenen Gebieten der geologischen Landesaufnahme überlassen bleiben sollte, deren Aufgabe es letzten Endes ist, die mehr und auch die weniger interessanten Gebiete kartierend zu erfassen?

Trotzdem, ein Steinbruch im Kristallin, entsprechend kartiert, kann Resultate von großem Wert ergeben. Wir brauchen Karten in allen Maßstäben, und vor allem Karten auf großem Maßstab von kleinen Gebietsausschnitten. Wir brauchen auch Sonderkarten, in denen jene Resultate enthalten sind, die auf nur eine Episode bezug haben, welche einen Teil einer langen und komplexen Kristallingeschichte bildet; ein Faltungssystem, eine Metamorphose, die Verteilung verschiedener Minerale oder ein System von Mikrostrukturen kann auf verschiedene Karten aufgespalten werden. Diese Karten fügen sich dann wieder zusam-

men und ergeben in ihrer Gesamtheit einen Film — der, zugegeben ruckartig verläuft — des historischen Geschehens der Metamorphose.

Wenn gut aufgeschlossene und ausgedehnte Gebiete metamorpher oder granitischer Gesteine derart detailliert aufgenommen werden sollen, daß für die Wissenschaft wirklich das Beste erreicht wird, dann scheint mir dies in Gemeinschaftsarbeit verschiedener Untersucher empfehlenswert durchzuführen. Es ist z. B. sicher, daß ein Geologe, so fähig und energisch er sein möge, im Rahmen einer ganzen Lebensarbeit nicht das in Donegal, Irland, hätte erarbeiten können, was ein gut eingearbeitetes Collegeteam innerhalb 6 Jahren zusammengetragen hat. Kartierung auf einem einheitlichen Grundmaßstab, mit entsprechendem Spielraum für die Eigenheiten jedes Geologen, kann auf diese Art über große Gebiete erstreckt werden. Kartierungen dieser Art entsprechen den geologischen Problemstellungen von heute, können aber auch jenen der Zukunft bei gegebenem Anlaß angepaßt werden. Vorausblickendes Planen in der geologischen Forschung ist entscheidend für die Fortschritte.

Es ist klar, daß ein wichtiger Typus der geologischen Karten der Kristallinengebiete den Charakter der heute metamorphen Gesteine zum Ausdruck bringen sollten, wie er vor der Metamorphose war.

Dies ist besonders wünschenswert bei Studien über den Bau und die Korrelation größerer Kristallinengebiete. Die ursprüngliche Stratigraphie, die Abfolge der Serien und der Faciesveränderungen, die verschiedene Lage der Sedimente im Geosynklinalraum und ähnliches ist entscheidend zur Enträtselung der vollständigen Geschichte der Metamorphose. Die gegenwärtige Lithologie muß derjenigen vor der Metamorphose gegenübergestellt werden. Vergleiche und Inbezugsetzungen können hauptsächlich mit Hilfe dieser ursprünglichen Lithologie entworfen werden.

Es ist für die Zukunft wünschenswert, daß das große, neue Gebiet rascher Analysemethoden auch auf die metamorphen und granitischen Gesteine ausgedehnt werden möge. Solche intensive chemische Studien sind besonders dort nötig, wo man zu Schlüssen über Veränderungen in der Zusammensetzung während der Metamorphose oder Migmatisation kommen will, sei es der Gesteine oder gesteinsbildenden Minerale. Vor etwa 12 Jahren deutete LAPADU-HARGUES (1945) an, daß auffallende und wichtige Veränderungen in der Zusammensetzung vorkämen in der Abfolge von Schiefen zu migmatitischem Gneis. Derartige Studien könnten durch die jetzt verfügbaren chemischen Schnellmethoden erweitert und eingebaut werden. Die chemischen Veränderungen in Aureolen sowie in metamorphen und auch migmatitischen Abfolgen, sowie die Aufschlüsselung der Veränderung auf die Mineralkomponenten können jetzt schon statistisch durchaus zufriedenstellend festgelegt werden. Ein Beginn derartiger Untersuchungen stammt von PITCHER, SINHA und MERCY in Donegal.

Ein weiterer Sektor fruchtbarer Zukunftsarbeit wird die absolute Altersbestimmung metamorpher und anderer plutonischer Gesteine umfassen. Wertvolle Resultate wurden bereits erreicht von HOLMES (1951) und anderen durch Datierungen innerhalb der komplexen Serien alter Gesteine in Afrika und Indien. Es ist allerdings erforderlich, daß bei der Ausweitung dieser Studien eine gewisse Kontrolle durch geologische und mineralogische Zeitbestimmung Platz finde, trotzdem liegen hier große Möglichkeiten.

Nach meiner Meinung ist das Grunderfordernis für Fortschritte auf dem Gebiet der Geologie der metamorphen Bereiche gelegen in intensiverer, besser koordinierter und entsprechend gesteuerter Feldarbeit. Geochemie, Geophysik,

Gefügekunde und ähnliche ergeben wertvollste Hilfswerkzeuge, aber das Hauptwerkzeug des Kristallingeologen ist und bleibt doch stets der „alte brave Hammer“.

Literatur

Eine komplette Bibliographie zu den oben skizzierten Aspekten der Geologie der metamorphen Bereiche ist in meinem Buche *The Granite Controversy* (Murby, London, 1956) enthalten; die folgende Liste enthält jene Arbeiten, auf die in dieser Skizze hingewiesen ist:

- ADAMS, F. D. und BARLOW A. E.: *Mem. geol. Surv., Can.*, 6, 1910.
BAILEY, E. B.: *Geol. Mag.* 67 : 77, 1930.
BALK, R. und BARTH, T. F. W.: *Bull. geol. Soc. Amer.* 47 : 685, 775, 1936.
BARROW, G.: *Geol. Mag.* 9 : 64, 1892.
— *Proc. geol. Ass.* 23 : 274, 1912.
BECKE, F.: *Denkschr. Akad. Wiss. Wien*, 75 : 1, 1913.
CHENG, Y. C.: *Quart. J. geol. Soc.*, 99 : 107, 1944.
CLOOS, E.: *Mem. geol. Soc. Amer.* 18, 1946.
CLOOS, E. und HIETANEN, A.: *Geol. Soc. Amer., Special Paper*, 35, 1941.
ESKOLA, P.: *Norsk geol. Tidsskr.* 6 : 143, 1922.
— *Fennia*, 45, Nr. 19, 1925.
— *Bull. Comm. geol. Finl.*, Nr. 97 : 68, 1932.
FENNER, C. N.: *J. Geol.* 22 : 594, 1914.
GOLDSCHMIDT, V. M.: *Skr. Videnskabselsk., Christ.*, 11, 1911.
GRUBENMANN, U. und NIGGLI, P.: *Die Gesteinsmetamorphose*, I, 1924.
HARKER, A.: *Metamorphism*, 1932.
HOLMES, A.: *Rep. 18th Int. geol. Congr., Pt. XIV*, 254, 1951.
HORNE, J. und GREENLY, E.: *Quart. J. geol. Soc.* 52 : 633, 1896.
IYENGAR, S. V. P., PITCHER, W. S. und READ, H. H.: *Quart. J. geol. Soc.* 110 : 203, 1954.
LACROIX, A.: *Bull. Serv. Carte géol. Fr.* 64, X, 1898/99.
— *Bull. Serv. géol. Fr.*, 71, XI, 1899—1900.
LAPADU-HARGUES, P.: *Bull. Soc. géol. Fr.*, 5 ser., 15 : 255, 1945.
LEHMANN, J.: *Untersuchungen über die Entstehung der Altkristallinischen Schiefergesteine*. 1884.
LOSSEN, K. A.: *Dtsch. Geol. Gel.* 27 : 970, 1875.
MICHEL-LEVY, A.: *Bull. Serv. Carte géol. Fr.*, V, 1893/94.
NIGGLI, P.: *Beitr. Geol. Karte Schweiz, N. F.*, 36, 1912.
READ, H. H.: *Miner. Mag.* 23 : 317, 1933.
— *Quart. J. geol. Soc.* 90 : 637, 1934 a.
— *Proc. Liverpool geol. Soc.* 16 : 128, 1934 b.
— *Geol. Mag.* 73 : 468, 1936.
— *Trans. Roy. Soc., Edinburgh*, 59 : 195, 1937.
— *Quart. J. geol. Soc.*, 105 : 101, 1949.
— *Geol. Soc. Amer., Special Paper*, 62 : 409, 1955 a.
— *Proc. geol. Ass.* 66 : 1, 1955 b.
ROQUES, M.: *Mem. Serv. Carte géol. Fr.*, 1941.
ROSENBUSCH, H.: *Abh. geol. Spezialkarte Elsaß-Lothringen*, 1877.
SANDER, B.: *Gefügekunde der Gesteine*, 1930.
SEDERHOLM, J. J.: *Bull. Com. géol. Finl.*, 23, 1907.
SUTTON, J. und WATSON, J.: *Quart. J. geol. Soc.* 106 : 241, 1951.
TEALL, J. J. H.: *Quart. J. geol. Soc.* 41 : 241, 1885.
TERMIER, P.: *C. R. XI, Int. géol. Congr.*, 587, 1912.
WILSON, G.: *Proc. geol. Ass.* 57 : 263, 1946.