

Die alpinotypen Ultramafitite und ihre Bedeutung für den Tiefgang der alpinen Orogenese

Von F. ROST, Saarbrücken *)

Schlüsselwörter

Alpen
Ultramafitite (alpinotyp)
Peridotitschale
Upper Mantle
Mantel- und Krustentektonik
Metamorphose der Ultramafitite
Ophiolit-Komplexe

INHALT

Zusammenfassung	266
Abstract	266
I. Einführung	267
II. 1. Zur Definition der „alpinotypen Ultramafitite“	268
2. Vorstellungen über die Grenze „Kruste-Mantel“ und die Peridotitschale des obersten Mantels	269
III. Zur Platznahme der alpinotypen Ultramafitite	271
1. Modellbeispiele der tektonischen Verschuppung	272
2. Geophysikalische Vorstellungen über Einschuppungsvorgänge in größerem Stil	273
3. Zur Platznahme der Peridotite in Ophiolitgebieten	277
IV. 1. Die Fazies der Peridotite im obersten Mantel und in der orogenen Kruste und der Tiefgang der alpinen Orogenese	280
2. Die retrograd-metamorphen Fazies der alpinotypen Ultramafitite in der Kruste	283

Zusammenfassung

Die Platznahme der im Dreieck Olivin, Ortho- und Klinopyroxen definierten alpinotypen Ultramafitite durch tektonischen Transport aus dem Mantel wird erneut nach experimentellen und geophysikalischen Ergebnissen anderer Autoren über die Beschaffenheit der Grenzzone Mantel-Kruste diskutiert. Modellbeispiele und moderne geophysikalische Vorstellungen über Mantelverschiebungen in die Kruste werden als Beweis für die diesbezügliche Hypothese P. DE ROEVER's gewertet.

Die Fazies der Ultramafitite in Mantel und Kruste — auch in Ophiolitgebieten — können Aufschluß über die Herkunftstiefe und damit den Tiefgang der alpinen Orogenese einschließlich der späteren metamorphen Geschichte der alpinotypen Ultramafitite geben.

Abstract

Emplacement of alpine type ultramafic rocks, consisting of olivine, ortho- and clinopyroxen and essential accessories, by tectonic transport from the mantle is discussed according to experimental and geophysical results about the nature of the mantle crust boundary zone. Models and modern geophysical considerations on movements of mantle materials into the crust are estimated as arguments for P. DE ROEVER's hypothesis.

*) Adresse des Autors: Prof. Dr. F. ROST, Universität des Saarlandes, D-66 Saarbrücken.

The facies in the upper mantle and in the crust — even in ophiolite complexes — may explain the depth of origin of the ultramafics and the depth of the alpine orogenesis, including the later metamorphic history of alpine type ultramafic rocks.

I. Einführung

W. P. de ROEVER stellte 1957 die Hypothese als Frage zur Diskussion, „ob die alpinotypen Peridotitmassen vielleicht tektonisch verfrachtete Bruchstücke der Peridotitschale — im Sinne des oberen Mantels — sind“. Unter der Voraussetzung der „Erstarrung des Ausgangsmaterials der alpinotypen Peridotite vielleicht schon während einer sehr frühen Periode der Bildung des Erdmantels“ bietet seine Hypothese eine einfache Erklärung für viele Phänomene, die in alpinotypen — verallgemeinert in orogentypen — Peridotiten verbreitet sind, wie „das augenscheinliche Fehlen einer sicheren Kontaktmetamorphose, für den immer wieder beobachtbaren tektonischen Charakter der Ultramafitkontakte, für das übliche Fehlen von Gängen alpinotyper Ultramafite in anderen Gesteinen und für die häufige Vergesellschaftung der Ultramafite mit offenbar der Unterlage der alpinen Geosynklinale entstammenden Massen von Amphiboliten und untergeordneten anderen kristallinen Schiefen“.

W. P. de ROEVER sagt abschließend, daß für die hier erörterte Hypothese entscheidend ist, ob „sie tektonisch möglich“ ist und empfiehlt seine Hypothese bei künftigen Ultramafitstudien zur Erwägung.

Seit 1957 hat vor allem in Zusammenhang mit dem internationalen „Upper Mantle“-Programm eine nahezu unübersehbare Zahl von Untersuchungen der Geophysik, Petrographie, Geologie und experimentellen Petrologie viele Ergebnisse gebracht und Vorstellungen zum Verhältnis Kruste—Mantel entwickelt, die es gestatten, die Frage DE ROEVER's nach der Herkunft der alpinotypen Ultramafite und ihrem tektonischen Transport zu überprüfen.

Die Herleitung aus dem obersten Mantel führt neben der Beantwortung der Transportfrage zwangsläufig dazu, die alpinotypen Ultramafite materialmäßig mit dem obersten Mantel vergleichen zu müssen oder — besser gesagt — zu fordern, daß der oberste, am orogenen Geschehen teilnehmende Grenzbereich zwischen Kruste und Mantel den alpinotypen Ultramafiten und ihren häufig vergesellschafteten Mafitbegleitern entspricht. Es mag daran erinnert werden, daß die geophysikalischen Ergebnisse über die Wellengeschwindigkeiten nur einen Hinweis auf die Materialdichte oberhalb und unterhalb der Moho geben, dessen stoffliche oder petrographische Zusammensetzung damit nicht geklärt werden kann, so daß mit einem Beweis der Hypothese DE ROEVER's diese Erklärung gegeben werden könnte.

Ungeachtet der Konvektionsströmung als Ursache orogenen Geschehens kann man den Tiefgang der alpinen Orogenese in der Kruste mit der Lage der Moho-Diskontinuität parallelisieren, die in den Westalpen bis über 50 km Tiefgang erreicht. Die von DE ROEVER angenommene tektonische Einschuppung der alpinotypen Ultramafite ist weiter während zeitlich verschiedener Phasen der gesamten alpinen Entwicklung in die Basalserien der sehr verschieden gestalteten alpinen Geosynklinale anzunehmen. Es ergibt sich dann aus der Untersuchung

der Ultramafitite nicht nur die Möglichkeit, die Tiefenherkunft aus dem Material nach dessen P-T-Bedingungen faziell zu interpretieren, sondern auch den Tiefgang der Krustengesteine anhand des Mineralbestandes der eingeschuppten Ultramafitite zumindest nach den Druckbedingungen festzulegen, soweit die experimentelle Petrologie vergleichbare Ergebnisse geliefert hat.

II. 1. Zur Definition der „alpinotypen Ultramafitite“

Bereits H. H. HESS (1955) hatte auf die Notwendigkeit kritisch hingewiesen, „die alpinotypen Peridotite“ und ihre „Assoziation mit Serpentiniten“ von ultrabasischen Gesteinsassoziationen scharf zu trennen. Er schrieb: „Alnöites, Kimberlites, mica peridotites and related rocks can hardly be confused with alpine ultramafics, because they differ conspicuously in mineralogy, chemistry, and tectonic setting.“

Läßt man zunächst — wenn auch im Gegensatz zu manchen Vorstellungen von H. H. HESS — die Serpentinite außer Betracht, können die alpinotypen Ultramafitite nach dem mit A. STRECKEISEN ausgearbeiteten, verbesserten vorläufigen Nomenklaturvorschlag (F. ROST, 1971) in einem Dreiecksdiagramm Olivin-Orthopyroxen-Klinopyroxen zusammengefaßt werden.

Aus Gründen der Vollständigkeit mag darauf hingewiesen werden, daß sich außer den alpinotypen bzw. orogenotypen Ultramafititen auch die „Olivinknollen und Bomben“ des basaltischen Vulkanismus einschließlich der peridotitischen Xenolithe der Kimberlitschlote und die ultramafischen Frühdifferentiate der stratiformen und sillartigen basischen Intrusionen in das vorgeschlagene Diagramm einordnen lassen.

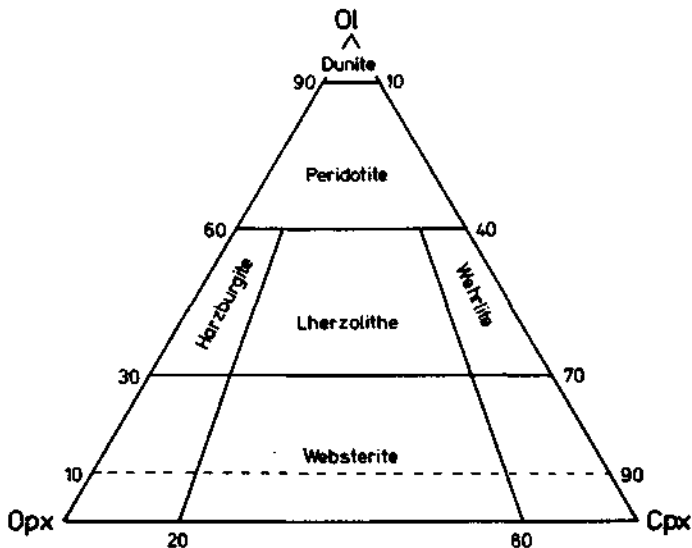


Abb. 1. Zur Systematik der Ultramafitite im Dreieck Olivin—Orthopyroxen—Klinopyroxen (F. ROST, 1971).

Bei kritischer Auswertung von Analysen alpinotyper Ultramafitite, wie der Alpe Arrami im Tessin (U. GRUBENMANN, 1908; E. DAL VESCO, 1953; D. A. CARSWELL, 1968), der Gigestaffel am St. Gotthard (A. SCHNEIDER, 1912) und der zahlreichen von P. BRENNEIS (1970) in einem vorläufigen Diagramm veröffentlichten Analysen der Ultramafititvorkommen aus dem Bergzug südlich des Ultentales, Südtirol, bestätigt sich der auch aus den bestens aufgeschlossenen großen Ultramafititkörpern Westnordens (F. ROST, 1971) erhaltene Befund, daß die Ultramafitite dieser mehr oder weniger von basischen Gesteinen isoliert auftretenden Vorkommen zu den „Peridotiten im engeren Sinn“, also mit Gehalten über 60% Olivin, gehören und nur in beschränktem Maß in das Lherzolithfeld reichen. Pyroxenite sind relativ selten als Lagen oder Bänder in die Peridotite eingeschaltet; sie können in anderen Vorkommen, wie z. B. in dem von H. R. KEUSEN (1970) beschriebenen Geisspfad-Ultramafitit, jedoch Anreicherungen zeigen.

Ganz andere petrographische Züge weisen die Ultramafititkörper der Pyrenäen und der Ivreazone auf (G. LENSCH, 1969), die mehr lherzolithischen Charakter besitzen und durch Übergänge mit Pyroxeniten verbunden sind. Sie scheinen zumindest petrographisch zu den meist vollständig serpentinierten Ultramafititen der alpinen Ophiolitgebiete überzuleiten, wenn auch deren primärer Mineralbestand vor der Serpentinisierung infolge tiefgreifender chemischer Veränderungen — Ausgleich des Mg : Si-Verhältnisses zu einem scheinbaren Olivin : Orthopyroxen-Verhältnisses mit 1 : 1; Abfuhr des Ca — nicht mehr rekonstruiert werden kann.

In allen alpinotyphen Ultramafititen ist eine Lagenbänderung bzw. Bankung verschieden zusammengesetzter Gesteinstypen auffällig, die als ein bezeichnendes Charakteristikum angesprochen werden muß. Sie tritt in analoger Weise auch in außeralpinen Vorkommen auf, wie beispielsweise in Westnordens, wo sich dunitische, peridotitische und untergeordnet pyroxenitische Gesteine im cm- bis m-Bereich in ungleichem Wechsel wiederholen (W. SCHREYER, 1969, Abb. 1).

Die Bankung folgt in der Regel der tektonischen Einlagerung der Ultramafititkörper in ihre Nebengesteine. Sie kann ursächlich auf eine primäre Differentiationsschichtung zurückgeführt werden, wobei der Entstehungsort zunächst außer Betracht bleiben mag und sie kann mehr oder weniger durch eine tektonische Verformung überprägt worden sein, die bereits durch Bewegungen im obersten Mantel hervorgerufen wurde, wie später zu berühren sein wird. Die auch gefügekundlich nachweisbare Gesteinsverformung kann ferner im Rahmen der Krustengesteine zur „Verschieferung der Olivinfelse“ im Sinne GRUBENMANNs geführt haben.

II. 2. Vorstellungen über die Grenze „Kruste—Mantel“ und die Peridotitschale des obersten Mantels

Unter Berücksichtigung einschlägiger Arbeiten anderer Autoren kam R. MEISSNER (1967) auf Grund der Auswertung seismischer Weitwinkelmessungen im bayerischen Molassebecken zu der Vorstellung, daß unter dem alpinen Orogen die Moho-Diskontinuität nicht als zweidimensionale Grenzfläche zwischen Kruste

und Mantel, sondern als eine Übergangszone aufzufassen ist. Sie bestünde unter den Westalpen aus einem „Wechsel von Aufschmelzungszonen mit einer echten Gabbrozone, die vielleicht durch finalen Magmatismus zwischen kristallinen Schiefen eingepreßt worden ist. Im Zentrum der Orogenese — fährt R. MEISSNER fort — sollte man auch mit einer Vermischung von Mantel- und Krustenmaterial rechnen; .. dies ist als Folge starker Kompressionsbewegungen vorstellbar, die ihrerseits möglicherweise durch seitliche Konvektionsströmungen ausgelöst werden“.

Dieses Ergebnis erläutert R. MEISSNER mit einem schematischen Schnitt durch die Übergangszone (Abb. 2), in dem die auftretenden „Lamellen“ verschiedener Dichte und Wellengeschwindigkeit petrographisch interpretiert werden.

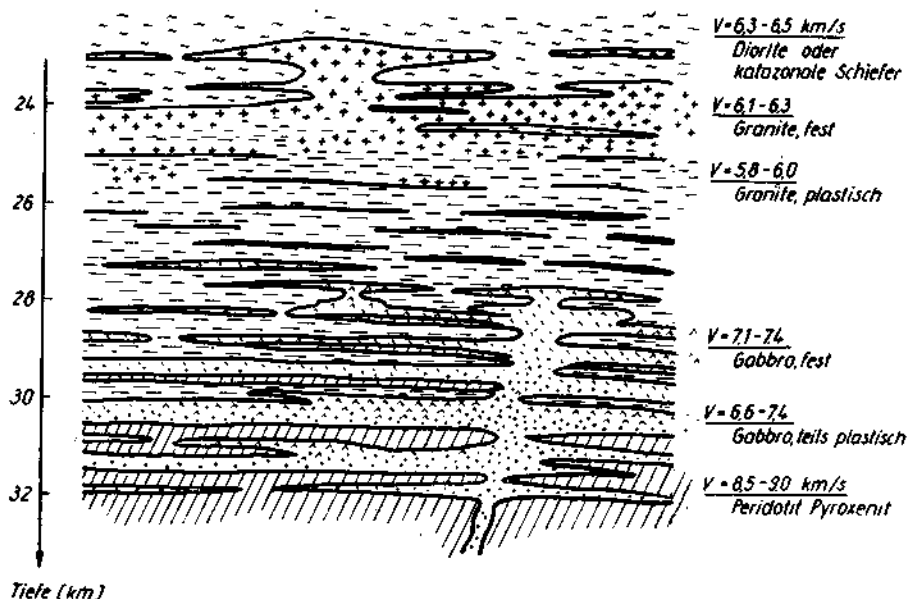


Abb. 2. Schematischer Schnitt durch die Übergangszone Kruste—Mantel; Lamellenzahl reduziert, Lamellendicke vergrößert (aus R. MEISSNER, 1967).

Die Annahme „peridotitisch-pyroxenitischen“ Materials im obersten Mantel durch R. MEISSNER wird durch die Arbeiten von N. L. CARTER und H. G. AVE' LALLEMANT (1970) gestützt, die zwar die Bedeutung von Eklogit als möglichem Bestandteil des oberen Mantels nicht ablehnen, ihre Untersuchungen über das „Hochtemperatur-Fließen von Dunit und Peridotit“ doch unter der Voraussetzung dieser Mantelzusammensetzung diskutieren, wobei dem Olivin die dominierende Rolle zugeschrieben wird.

Ihre experimentellen Untersuchungen des mechanischen Verhaltens und der verformenden Vorgänge von Olivin in Duniten und Lherzolithen umfaßten einen Bereich von Temperatur und Druck bis in Größenordnungen des obersten

Mantels (1400° C, 20 kb); die Deformation führt unter Berücksichtigung „der syntektonischen Rekrystallisation des Olivins“ (H. G. AVE’LALLEMANT und N. L. CARTER [1970]) zu analogen Gefügen, wie sie in natürlich verformten Olivinen in Gesteinen beobachtet werden, die „wahrscheinlich“ vom oberen Mantel abgeleitet werden können oder müssen, wie insbesondere in den Olivinknollen der Basalte ozeanischer Gebiete.

Die als Voraussetzung zu fordernde Tatsache, daß der oberste Mantel aus zwar plastisch deformierbaren, aber phasenmäßig festen — ultramafitisch/peridotischen — Gesteinen besteht, wird durch einen Vergleich der Solidus-Linie des Peridotits (K. ITO und G. C. KENNEDY, 1967) mit dem Verlauf des geothermischen Gradienten nach S. P. CLARK jr. und A. E. RINGWOOD (1964) im Kontinentalbereich bis zu einem Druck von 50 kbar, entsprechend rund 160 km Tiefe, bestätigt.

Nach den gefügekundlichen Ergebnissen von J. R. MÖCKEL (1969) über die zum Teil granatführenden Peridotite der Alpe Arrami, Schweizer Tessin und H. G. AVE’LALLEMANT (1967) über die spinellhaltigen Ultramafitite des Lac du Lherz aus den französischen Pyrenäen, faßt E. DEN TEX (1970) die Ultramafitite beider Vorkommen als „polymetamorphe, wiederholt tektonisierte Gesteine“ auf, mit faziellen und tektonischen Unterschieden zu ihren Rahmengesteinen. Die Ultramafitite müssen bedeutend älter sein und aus größeren Tiefen stammen. Ihre Ortsstellung ist weiter in festem Zustand erfolgt, wobei eine Herkunft aus dem Erdmantel wahrscheinlich gemacht wird.

III. Zur Platznahme der alpinotypen Ultramafitite

Obwohl nach den Ergebnissen von N. L. BOWEN und O. F. TUTTLE (1949) „Die Schlußfolgerung unausweichlich scheint, daß die Ultramafitite nur in festem Zustand intrudiert sein können“, muß zugegeben werden, daß sich dieser — tektonisch erklärbare — Intrusionsmechanismus nur auf Ultramafitite olivinreicher Zusammensetzung (Abb. 1) widerspruchlos anwenden läßt, für die es im alpinen Raum genügend Beispiele gibt. Zusätzlich zu den auf Seite 269 genannten Vorkommen, nur untergeordnet oder randlich stärker serpentinisierter alpinotyper Ultramafitite, sei an die großen Massive von Kraubath (F. ANGEL, 1964) und am Enzinger Boden im Großglockner-Gebiet erinnert (F. ROST, 1967).

Ausgeschlossen erscheint für deren Platznahme das von H. H. HESS (1955) diskutierte „diapirartige“ Aufdringen in ehemals serpentinisierendem Zustand, da dann bei einer Deserpentinisierung ein mehr oder weniger rein harzburgitischer Gesteinscharakter mit einem Olivin/Enstatit-Verhältnis 1:1 resultiert haben müßte, der an den hier behandelten Ultramafititen nur untergeordnet beteiligt ist. Die ferner aus den Ergebnissen von BOWEN und TUTTLE abgeleitete Hypothese einer Entstehung aus einem sogenannten Schmelzbrei („crystal mush“) führt zu ähnlichen Schwierigkeiten, da der Schmelzanteil in den hier zunächst zu diskutierenden olivinreichen Ultramafititen nach der Intrusion unter Krustenbedingungen ausgewandert sein müßte, ohne im erstarrten Ultramafitit wesentliche Spuren zu hinterlassen. Erneut wird diese Möglichkeit von F. SEIFERT und W. SCHREYER (1967) in ihrer Hypothese „über die Entstehung ultrabasischer

Magmen bei Gegenwart geringer Alkalimengen“ zur Diskussion gestellt. Es darf jedoch erstens an die auf Seite 268 zitierten Bedenken von H. H. HESS erinnert werden, der derartige intrudierte alkaliführende Ultramafitite streng von alpinotyphen Gesteinen zu trennen fordert. Zweitens sprechen Beobachtungen über eine sekundär-metamorphe Alkali-Metasomatose in westnorwegischen Peridotiten gegen eine Abfuhr von Alkalien aus den Ultramafititen bei vergleichbaren P-T-Bedingungen; erstere führt im Gegenteil bei Temperaturen von rund 600 bis 700° C sowohl zu einer Na-Zufuhr in den Ultramafititen (unter Hornblende-bildung aus Granatkelyphit und Diopsid) wie zu einer örtlich konzentrierten K-Metasomatose unter sekundärer Phlogopitbildung (F. ROST, 1971). Schließlich sind die Ergebnisse der im vorigen Abschnitt angegebenen Gefügeuntersuchungen und die Vorstellungen über Deformationsbewegungen im obersten Mantel mit einer allgemeineren Anwendbarkeit der von F. SEIFERT und W. SCHREYER angegebenen Möglichkeit auf die Probleme der Platznahme echter orogenotyper Ultramafitite schwer vereinbar. Bei der Behandlung der Platznahme in alpinen Ophiolitgebieten (Abschnitt III. 3., Seite 277) wird jedoch erneut auf die Möglichkeit einer magmatischen Platznahme im Verband entsprechender basischer Massen einzugehen sein.

In den folgenden Abschnitten sollen zur Hypothese DE ROEVER's zunächst kleinere Modellbeispiele des tektonischen Transports von Ultramafititen vorgestellt oder in Erinnerung gerufen werden; sie sollen zu den heutigen Vorstellungen der Geophysik — verbunden mit einer petrographisch-geologischen Interpretation — über Einschuppungsvorgänge von größeren Massen aus der Übergangszone Kruste-Mantel und aus dem Mantel selbst überleiten.

III. 1. Modellbeispiele der tektonischen Verschuppung

In vielen Vorkommen alpinotyper Ultramafitite ist eine mehr oder weniger ausgeprägte linsenförmige Abspaltung kleinerer Körper von einem zentralen größeren Komplex beobachtbar, die sich über viele km verteilen können und dem tektonischen Gesamtstreichen in auffallender Weise folgen. Die sorgfältige Detailkartierung des oberen Zemmgrundes in den Zillertaler Alpen, Tirol, durch E. CHRISTA (1931) zeigt beispielsweise WSW des Ochsner/Rotkopf-Massivs, dem Nordrand der Greiner Serie folgend, mehrere isolierte „Serpentinkörper“ bis in den Nordhang des Großen Greiners. Unabhängig von der später noch zu diskutierenden Auffassung der Platznahme des Ochsner-Rotkopf-Komplexes durch B. LAMMERER und D. D. KLEMM (1970) — in einem Ophiolitgebiet — wird auch von diesen Autoren eine „sekundäre“ tektonische Abspaltung kleinerer Körper vom Hauptkomplex zugegeben; die „tektonische Transportweite“ kann auf einige km geschätzt werden.

In der vortriassischen Serie der Granatspitze (H. P. CORNELIUS und E. CLAR, 1934) zieht in den Hüllgesteinen des Zentralgranitischen Granatspitzkernes von dem im Norden gelegenen, bereits erwähnten Ultramafititkomplex des Enzinger Bodens eine, auf längere Strecken öfters unterbrochene Serie von annähernd „konkordant“ eingeschalteten — oder tektonisch abgeschuppten — Ultramafitit-

linsen über den „Roten Balfen“ und den bekannten Totenkopf im Westgrat der Hohen Riffel bis zur Linse N der Unteren Ödwinkelscharte.

Modellbeispiele im Kleinbereich aus außeralpinen Gebieten bestätigen in noch sinnfälligerer Weise den tektonischen Transport „völlig unveränderter Peridotite“ durch Abschuppung aus größeren Körpern, wie in den Gneis-Nebengesteinen der Ultramafitite des Gebiets von Aaheim, Westnorwegen (F. ROST, 1971) und in Granulitaufrüchen des Moldanubikums (L. KOPECKY und V. SATTRAN, 1962; E. FEDIUKOWA, 1965; F. ROST, 1966), wo zwischen Granuliten und Ultramafititen gegenseitige Verschuppungen bis zu cm-Größe — insbesondere von kleinsten Peridotitlinsen — nachgewiesen werden können, ohne daß während des tektonischen Transportes eine Reaktion zwischen dem Ultramafitit — durchwegs Granatperidotite — und dem sauren Granulit stattfand, die erst bei einer späteren retrograden Metamorphose im Sinne einer metamorphen Differentiation zu einer charakteristischen Reaktions-Zonen-Bildung führte (F. ROST, 1966). Auch in diesen Fällen sind Transportweiten von einigen km anzunehmen. Aus den wenigen angeführten Modellbeispielen kann die Hypothese DE ROEVER's über einen tektonischen Transport von Ultramafititen im km-Bereich nicht mehr in Zweifel gezogen werden.

III. 2. Geophysikalische Vorstellungen über Einschuppungs-Vorgänge in größerem Stil

In einem Schlüsselgebiet tieferogenen Geschehens in den Westalpen, der bekannten Zone Ivrea-Verbano — kurz Ivreazone genannt — führten die im letzten Jahrzehnt durchgeführten geophysikalischen Untersuchungen nach einer von H. BERCKHEMER (1968) gegebenen Zusammenfassung zu der Deutung, daß entlang einer bis in die Moho-Zone hinabreichenden Störung, der Insubrischen Linie, ein mächtiger Komplex von Gesteinen höherer Dichte ($D = 3.1$) in ein hohes Krustenniveau emporgeschoben wurde. Dieser geophysikalische „Ivrea-Körper“ ließ sich von Locarno — in einem nach E konkaven Bogen — bis zum östlichen Rand des Alpenbogens westlich von Turin nachweisen (Abb. 3).

Nach der geologisch-petrographischen Kartierung der im heutigen Erosionsniveau aufgeschlossenen „geologischen Ivreazone“ bestehen die schweren Gesteine des „geophysikalischen Ivrea-Körpers“ aus einer mächtigen Schichtfolge von basischen Gesteinen mit eingeschalteten Ultramafititen — Lherzoliten bis Pyroxeniten — die sich in der Nähe der Insubrischen Linie häufen. In dem von R. SCHMID (1967, 1968) entworfenen Profil (Abb. 4) längs des tief eingeschnittenen Toce-Tales treten Ultramafitite zwar zurück, es muß jedoch an den großen, linsenartigen Körper von Finero und die SW des Toce-Tales folgenden Vorkommen, insbesondere im Val Sesia erinnert werden (G. LENSCH, 1968, 1969).

Nach SE schalten sich zunehmend zwischen die basischen Gesteine saure Metamorphite, eine Besonderheit des Toce-Profiles, die sich sowohl im SW wie im E dieses Querschnitts mehr auf den Innenrand des nach SE konkaven Ivrea-bogens beschränken.

Unter Berücksichtigung der geophysikalischen Vorstellungen und der Tatsache, daß die der Aufschiebungsfläche der Insubrischen Linie naheliegenden Basite

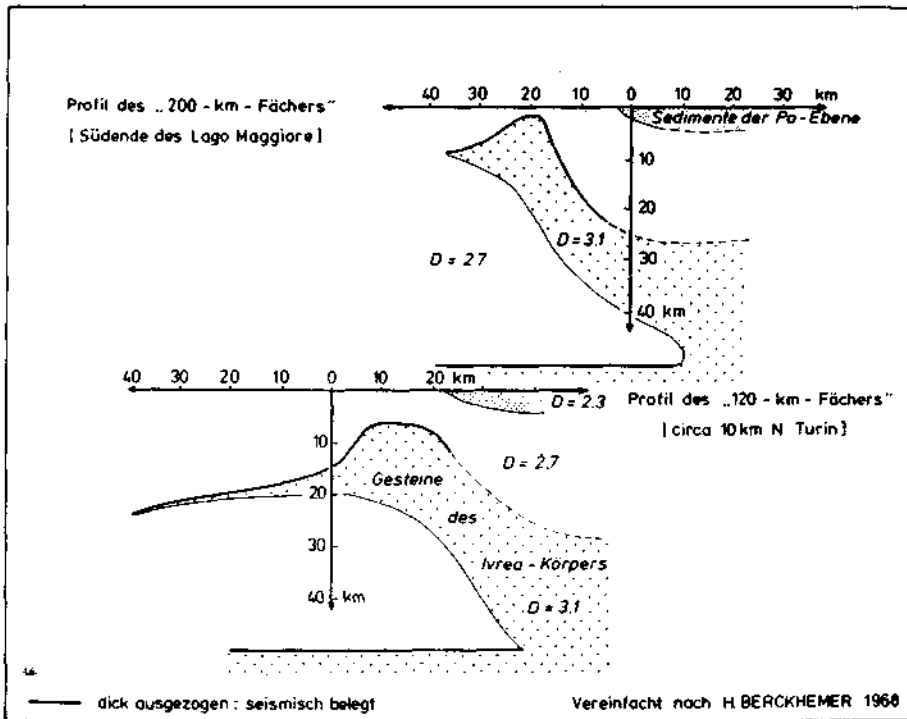


Abb. 3. Die zwei schematischen Querprofile des geophysikalischen Ivreakörpers in vereinfachter Zusammenstellung.

in Granulitfazies — Granatpyroxengabbros — vorliegen, also dem tiefsten Niveau der Ivreazone entsprechen, ist die Gesteinsfolge mit einem durch die Aufschiebung senkrecht gestellten bis überkippten Querschnitt durch die Erdkruste einschließlich ihrer unterlagernden Übergangszone Kruste-Mantel interpretierbar; ihre tieferen, liegenden Teile dürften sich mit den Vorstellungen R. MEISSNERS (Seite 269) über den Lamellenbau der Moho-Zone zwanglos parallelisieren lassen.

Nach dem Hangenden zu — bei wachsender Entfernung von der Insubrischen Linie — nimmt die Fazies der Basite bis zur Amphibolitfazies ab, desgleichen die fazielle Ausbildung der sauren Metamorphite, entsprechend der zu erwartenden Abnahme der P-T-Bedingungen bei Bildung bzw. Metamorphose der Gesteinsfolgen. In Erinnerung an den hypothetischen Hinweis auf die Möglichkeit von Eklogit als „Mantelmaterial“ (Seite 270) durch N. L. CARTER und H. G. AVE’LALLEMANT (1970) mag darauf hingewiesen werden, daß unter den „hochmetamorphen Basiten“ der Ivreazone eine eklogitische Gesteinsausbildung völlig fehlt und die Ultramafitite zumeist olivinführend (Iherzololithisch) sind, was die Annahmen der genannten Autoren über die peridotitische Zusammensetzung des obersten Mantels stützt.

Einen ähnlichen Querschnitt durch die Erdkruste einschließlich der Übergangszone und der obersten Mantelbereiche längs einer Linie Chamonix-Aosta-Ivrea-

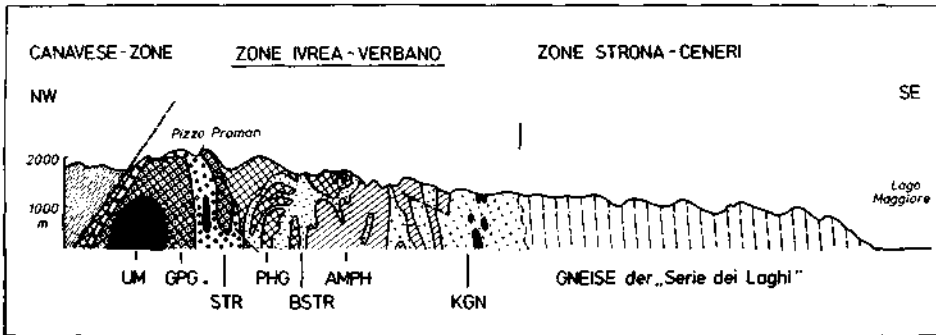


Abb. 4. Schematisches geologisches Querprofil durch die Zone Ivrea-Verbano NE des Toce-Tales (vereinfacht und erweitert nach R. SCHMID, 1968).

Erklärung

Basisch-Ultramafische Serie

- UM = Ultramafite
- GPG = Granat-Pyroxen-Gabbro
- PHG = Pyroxen-Hornblende-Gabbro
- AMPH = Amphibolite

Saure Metamorphit-Serie

- STR = Biotit-freie Stronalithe
- BSTR = Biotit-führende Stronalithe
- KGN = Kinzigitgneis mit eingelagerten Marmoren.

Poebene veröffentlichten P. GIESE, K. GÜNTHER und KL.-J. REUTTER (1970), der sich in dem die Ivreazone berührenden Teil im wesentlichen mit den hier zitierten Ergebnissen deckt, und ebenfalls eine Hochpressung von schwerem Material aus der Grenze zwischen Kruste und Mantel zugrunde legt.

Abschließend darf kurz darauf hingewiesen werden, daß der tektonische Transport allein mit einfacher Hochpressung und Einschuppung nicht erklärt werden kann, da infolge der plastischen Deformierbarkeit, insbesondere olivinreicher Ultramafitite, mit Einfaltungen gerechnet werden muß, wie sie G. LENSCH (1968) für den Ultramafitkörper von Finero nachweisen konnte.

Auch aus außeralpinen Gebieten wurden in den letzten Jahren Profile einer Ein- bzw. Aufschiebung von Ultramafititen aus dem obersten Mantel in bzw. auf die Kruste oder deren Geosynklinalsedimente beschrieben, die hier in Kürze wegen ihrer allgemeinen Bedeutung für das behandelte Problem des „tektonischen Transports alpinotyper Ultramafitite“ vorgestellt werden sollen.

Aus dem Troodos-Massif auf Cypern veröffentlichte nach der Auswertung geophysikalischer Messungen I. G. GASS (1967) ein Bild der geologischen Entwicklung der Auf- bzw. Unterschiebung von Mantel- bzw. Krustenmaterial, das hier im Original wiedergegeben werden soll (Abb. 5).

Aus Neuguinea gibt schließlich H. L. DAVIES (1968) eine entsprechende Mantel-Krusten-Aufschiebung (Abb. 6).

Übereinstimmend mit der geophysikalischen Deutung und petrographisch-geologischen Erläuterung der für das alpine Orogen wichtigen Ivreazone zeigen die weiteren, hier zitierten Beispiele, daß die Hypothese DE ROEVER's über die

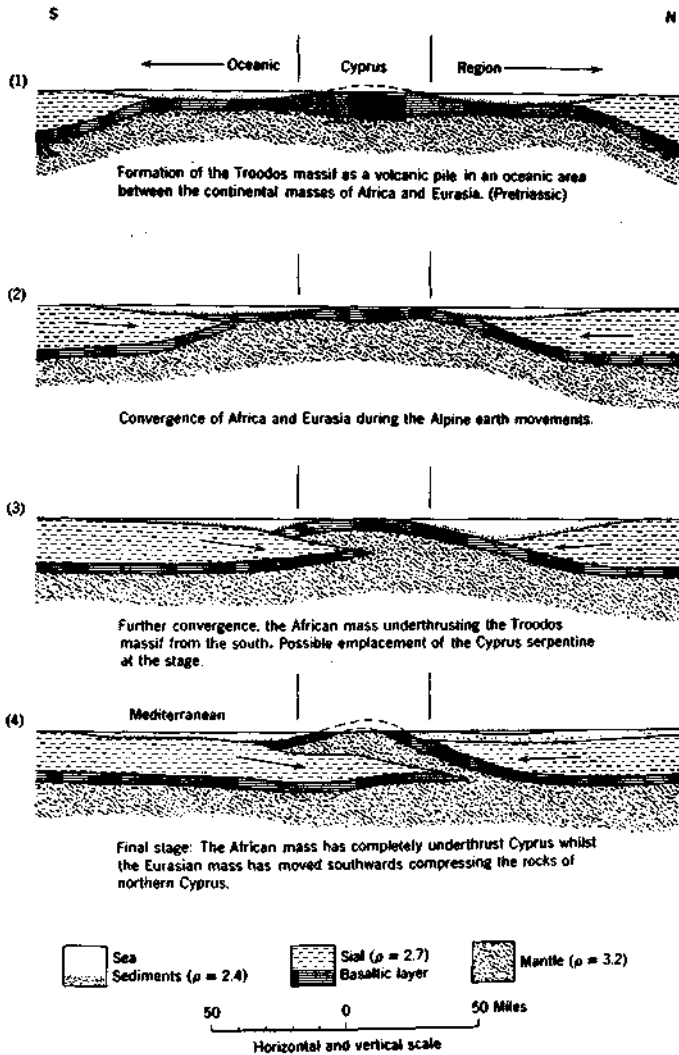


Abb. 5. Diagrammatic representation of stages in the underthrusting of Cyprus by the African shield (I. G. Gass 1967).

Herkunft der orogentypen Krusten-Ultramafitite aus dem Mantel auch über größere Transportentfernungen mehr und mehr an Wahrscheinlichkeit zunimmt, wenn man sie bereits heute nicht als erwiesen gelten lassen möchte. Unter Berücksichtigung der gezeigten „Modellbeispiele“ einer tektonischen Verschiebung von ultramafischen Gesteinen in andere Gesteinsserien darf man schließen, daß im Bereich tieferreichender Störungszonen bereits kleinere Massen von ihrem Ursprung im obersten Mantel oder in der Moho-Zone abgetrennt und in höhere Krustenniveaus transportiert wurden.

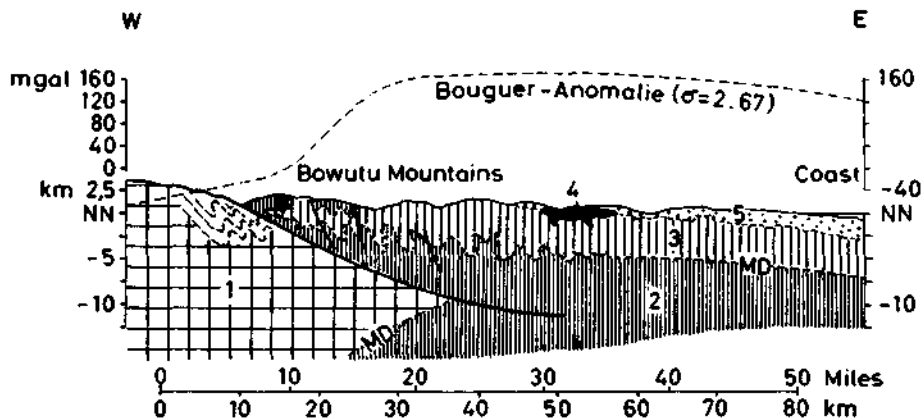


Abb. 6. Profil durch die Bowutu-Mountains (Papuan-Geosynklinale) im südlichen Neu-Guinea nach H. L. DAVIES (1968).

Legende: 1 = Sial-Kern; 2 = Ultrabasischer, oberer Mantel (Peridotite); 3 = Basische ozeanische Unterkruste (Gabbro); 4 = Diorit; 5 = Basische, ozeanische Oberkruste (Basalt); MD = Moho-Diskontinuität.

(Referiert aus P. GIESE, K. GÜNTHER und KL.-J. REUTTER, 1970.)

Die bisher zu diskutierenden Beispiele alpinotyper Ultramafitite und die Vorstellungen ihrer Platznahme bezogen sich fast ausschließlich auf Vorkommen von primär unserpentinisierten Ultramafititen in mindestens mesozonalen Gesteinsserien eines kristallinen Grundgebirges; die bisher durchgeführten Altersbestimmungen in Ultramafititen dieser Gebiete führten nach Abkühlungsalterswerten der in Finero auftretenden Phlogopite und nach einer Bestimmung von Kontaktbiotiten im Bereich des Ultentales durch E. JÄGER, der hierfür der Dank auszusprechen ist, zu voralpidischen, variszischen Werten.

Der untergeordneten und hauptsächlich auf randliche Bereiche der Ultramafitite beschränkten Serpentinisierung ist ein sekundärer, retrograd-metamorpher Charakter zuzusprechen.

III. 3. Zur Platznahme der Peridotite in Ophiolitgebieten

Das Auftreten von mächtigen, völlig serpentinisierten — in zweiter Phase antigoritisierten — Ultramafititen im geologischen Verband mit Metabasiten in Grünschiefer- bis Prasinitfazies in wenig metamorphen alpidischen Sedimentserien der meist dem Penninikum zugeschriebenen Ophiolitserien stellt bezüglich ihrer Platznahme neue Probleme. Sie erfolgte offensichtlich zunächst in unmetamorphe Sedimentserien, deren Wassergehalt bei der folgenden „epizonalen“ Metamorphose zu Kalkphylliten oder Kalkglimmerschiefern zu einer meist totalen Hydratisierung der Ultramafitite zu Serpentiniten führte, wenn man nicht annehmen möchte, daß die Serpentinisierung der ersten Phase (nach F. ANGEL) bereits in den obersten Mantelbereichen bzw. der Moho-Zone stattfand. Die meisten Vorstellungen über die Basis der penninischen Geosynklinal-Teiltröge

stimmen darin überein, daß das kristalline Grundgebirge durch Dehnungsvorgänge im Untergrund der penninischen Teilgeosynklinale entfernt wurde, so daß die „basische Unterkruste bzw. die Moho-Zone“ die Basis der mächtigen penninischen Sedimente bildete. Vergleichbare Vorstellungen über Mantel-Krusten-Über- bzw. Unterschiebungen ohne Berücksichtigung einer durchhaltenden Schicht des kristallinen Grundgebirges entwickelten ja bereits I. G. GASS (Abb. 5) und N. L. DAVIES (Abb. 6) aus außeralpinen Gebieten.

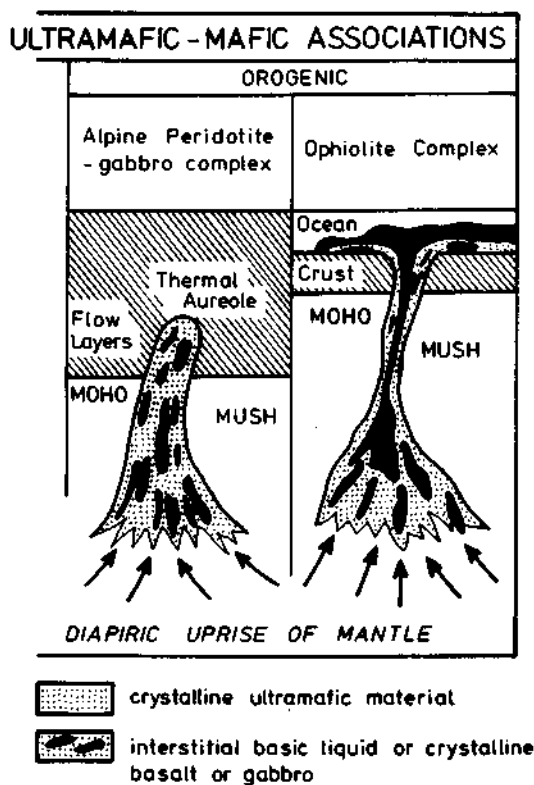


Abb. 7. Platznahme von „ultramafic-mafic associations“ orogener Vorkommen einschließlich der Ophiolit-Komplexe nach P. J. WYLLIE (1970).

In gleichem Zusammenhang mag auch auf die Vorstellungen von P. J. WYLLIE (1970) hingewiesen werden, die er über die Platznahme der basisch-ultramafischen Ophiolit-Komplexe — unter Zugrundelegung einer stark reduzierten Krustendicke — in einer schematischen Darstellung veröffentlichte (Abb. 7) und die mit seiner Vorstellung der Platznahme von „Alpine Peridotite-Gabbro“-Komplexen wiedergegeben werden sollen. Man darf die sich auf Ophiolitkomplexe beziehende Darstellung im Bereich der submarinen Ablagerung so interpretieren, daß hier eine gravitative Sonderung in Ultramafite an der Basis der überlagernden basischen Erstarrungsgesteine erfolgen konnte.

Gegenüber der Hypothese einer submarinen, rein magmatischen und in mehreren übereinander stattfindenden Deckenergüssen erfolgten Platznahme einer ultramafischen Schmelze im Massiv des Ochsner-Rotkopfs im oberen Zemmgrund der Zillertaler Alpen (B. LAMMERER und D. D. KLEMM, 1970) ist die Möglichkeit nicht abzustreiten, daß sich in Ophiolitgebieten die Ultramafitite in situ durch Differentiation aus basischen Magmen des initialen Magmatismus ausgeschieden haben können, wengleich die heutigen, durch ausgezeichnete Kartierungen geklärten geologischen Verhältnisse zwischen Metabasiten und Serpentiniten eine derartige Deutung erschweren, als beispielsweise im Gebiet der Geol. Karte des Großglockner die Lagebeziehungen zwischen den großen Bereichen prasinitischer Metabasite zu beiden Seiten des Pasterzen-Gletschers zu den größeren Serpentinittkörpern des Brennkogels und kleinen Tennen mit einer Differentiation rein räumlich kaum vereinbar scheinen, wenn man nicht mit sekundären tektonischen Trennungen rechnet, auf die im Gebiet des Zemmgrundes auch

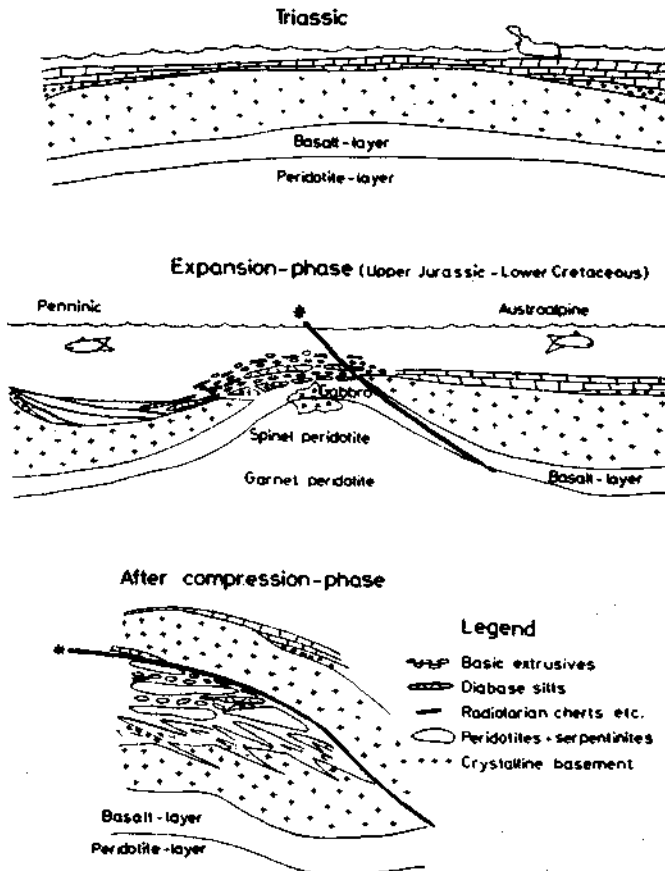


Abb. 8. „Expansion and after-compression phases“ als Erklärung der Platznahme ophiolitischer Ultramafitite und Metabasite (T.J. PETERS, 1969).

B. LAMMERER und D. D. KLEMM (1970) als Möglichkeit der späteren geologischen Entwicklung hinweisen.

Eine allen Schwierigkeiten gerecht werdende Lösung gab T. J. PETERS (1969) auf Grund eigener petrologischer und geologischer Untersuchungen in den östlichen Schweizer Alpen, die „auch auf andere alpinotype Gebirgsbereiche anwendbar ist“ (Abb. 8).

In seiner Zusammenfassung führt T. J. PETERS aus, daß „during both the Jurassic and Cretaceous, the upper mantle buckled upwards in the region between the Pennine eugeosyncline and the Austroalpine miogeosyncline. Here oceanic conditions must have prevailed with the extrusion of basic volcanics. During the following compression phase, the rise formed an ideal glide surface for the large overthrusts, with which large ultrabasic masses from the buckled mantle were carried along“.

Die Trennung der Platznahme in eine submarine Extrusion der basischen Vulkanite — später metamorphosiert zu den Grünschiefern und Prasiniten der Ophiolitserien — und eine tektonische Einschuppung der „großen ultrabasischen Massen“ — nach Abbildung 8 Peridotite und Serpentinite — kann auch in Einklang mit der Hypothese DE ROEVER's die geologischen Verhältnisse der Ophiolitgebiete befriedigend erklären.

IV. 1. Die Fazies der Peridotite im obersten Mantel und in der orogenen Kruste und der Tiefgang der alpinen Orogenese

In Übereinstimmung mit anderen Autoren hat auch T. J. PETERS in seiner Hypothese der Platznahme ophiolitischer Ultramafitite (nach Abb. 8) im tieferen Niveau der „Peridotitschale“ die Existenz von Granatperidotit angenommen, der von Spinellperidotit überlagert wird.

Zusätzlich zu den Hauptmineralien der alpinotypen Ultramafitite, Olivin, Ortho- und Klinopyroxen (s. Abb. 1), ist den genannten Mineralien Granat und Spinell als „faziellen Leitmineralien“ eine besondere Bedeutung zuzuschreiben, da sie genauere Angaben über Druck- und Temperaturbedingungen der Entstehung im Mantel und der metamorphen Umwandlungen in der Kruste gestatten und damit Aussagen über den Tiefgang der alpinen Orogenese ermöglichen.

Aus den Ergebnissen der experimentellen Petrologie über Bildungs- und Existenzbedingungen der an der Zusammensetzung beteiligten Haupt- und Nebenmineralien hat der Verfasser für die Ultramafitite ein Faziesdiagramm entwickelt (Abb. 9; F. ROST, 1967, 1968, 1969, 1971); gegenüber den beispielsweise von M. J. O'HARA (1967) und anderen Autoren veröffentlichten faziellen Einteilungsprinzipien stellt folgendes Diagramm eine Vereinfachung dar, als erstens im wesentlichen die durchschnittliche peridotitische Zusammensetzung der alpinotypen Ultramafitite berücksichtigt und zweitens auf ganz exakte Angaben von Druck- und Temperaturwerten verzichtet wird, die in der Literatur ausschließlich für „chemisch einfachere Systeme“ gelten, als sie in natürlichen Ultramafititen und ihren Mineralien vorliegen.

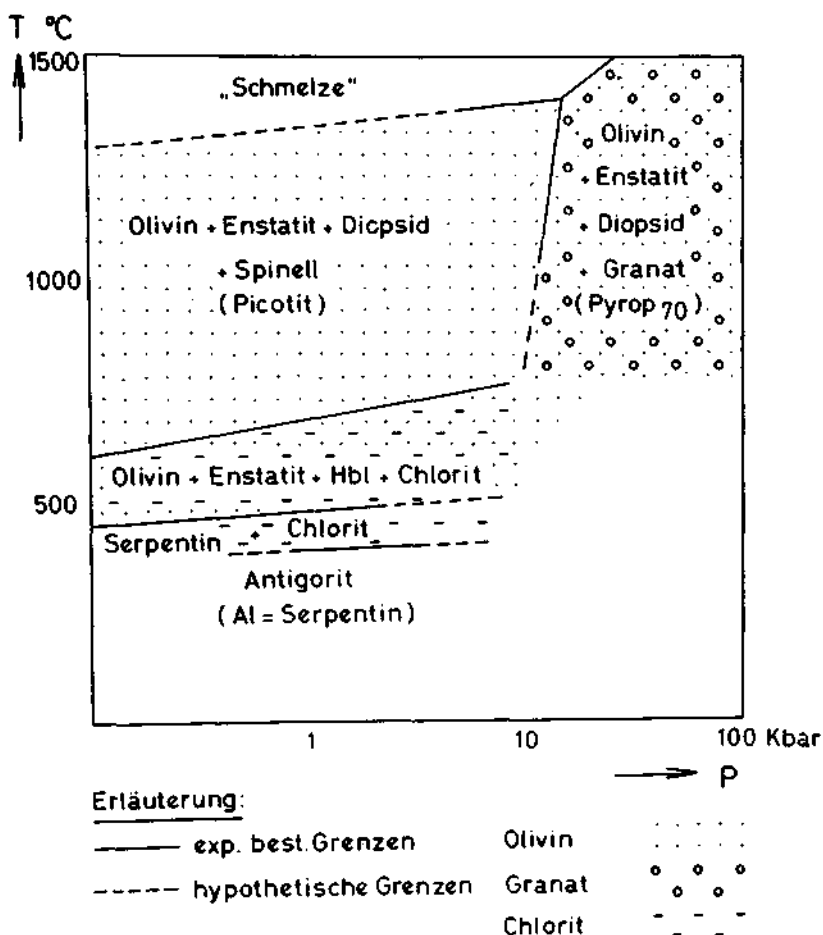


Abb. 9. Vereinfachtes Faziesdiagramm peridotischer Ultramafite.

Ausgehend von den von F. R. BOYD und J. L. ENGLAND (1958/59) bei der Synthese reinen Pyrops ermittelten Bezugswerten kann eine „Soliduslinie“ zwischen 1300° und 1600° angenommen werden, unterhalb welcher eine Differentiation zwischen einer hypothetischen basischen Ausgangsschmelze und den Ultramafitit-Mineralien stattfindet. Von besonderer Bedeutung ist der für die Pyropbildung erforderliche Druck; gegenüber den von BOYD und ENGLAND angegebenen Mindestwerten von 23 Kbar (bei 1000° C) konnte von W. SCHREYER und F. SEIFERT (1969) „in Gegenwart von H₂O“ ein niedrigerer Bildungsdruck reinen Pyrops bei 16 Kbar (bei 850° C) bestimmt werden. Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß der in natürlichen Granatperidotiten auftretende Granat nur einen Pyrop-Anteil von 70—74 Mol-% aufweist (z. B. F. ROST und W. GRIGEL [1969]), kann man mit einer weiteren Druckerniedrigung bei der Granatbildung rechnen,

die vom Verfasser mit 10—15 Kbar angenommen wird, entsprechend einem Temperaturintervall zwischen 800° und 1400° C.

Unterhalb der angegebenen Druckwerte ist bei höheren Temperaturen anstelle des pyropreichen Granats als akzessorisches Mineral ein chromreicher Spinell (Picotit-Chromit) stabil; die Hauptminerale Olivin, Ortho- und Klinopyroxen werden in erster Annäherung von dieser Faziesgrenze nicht berührt.

Im obersten Mantel können demnach je nach Tiefenlage — unter der von de ROEVER gemachten und wiederholten Angabe der „Erstarrung des Ausgangsmaterials der alpinotypen Peridotite vielleicht schon während einer sehr frühen Periode der Bildung des Erdmantels“ — die Ultramafitite in Granatperidotitfazies oder Spinellperidotitfazies entstehen. Je nach dem Verlauf des geothermischen Gradienten im Bereich des alpinen Orogens sind für die Grenztiefe beider Fazies Werte zwischen 30 und 50 km anzunehmen.

Nur am Rande sei in diesem Zusammenhang an die vergleichbaren pyropreichen Granate in den Kimberliten erinnert, als weiterer Beweis für die Existenz der Granatperidotitfazies im oberen Mantel.

Spinellperidotite bilden nach vorstehenden Betrachtungen den obersten Mantel unterhalb der Moho-Zone und die in dieser Zone auftretenden Ultramafiteinschaltungen — die pyroxenitischen Differentiate liegen als granatfreie Gesteine vor —. Aus diesen Tiefen müssen — außerhalb vorliegender Diskussion über die alpinen Verhältnisse — auch die mit Basalten geförderten Olivinbomben und Knollen stammen, die sowohl im ozeanischen wie im kontinentalen Bereich (Eifel, Auvergne) in Spinellperidotitfazies ausgebildet sind. Im alpinen Bereich sind die im „kristallinen Grundgebirge“ eingelagerten großen Massive der Ostalpen (Kraubath, Stubachtal), die Ultramafitite im Süd- und Ostteil der Ivreazone und der Ultramafititkörper des Geisspfads ursprünglich als Spinellperidotite entwickelt; ihre späteren retrograden Faziesumwandlungen werden noch kurz zu streifen sein.

Der Tiefgang dieser frühen orogenen Phasen kann unter der berechtigten Annahme einer variszischen Platznahme der Ultramafitite zumindest in den betrachteten Bereichen keine allzu großen Tiefen erreicht haben. Mit der bereits behandelten Platznahme der ophiolitischen Ultramafitite nach der Hypothese von T.J. PETERS (1969) aus einem seichten Mantelniveau stimmt die aus Reliktstrukturen und Mineralien zu rekonstruierende, vorsepentinische Spinellperidotitfazies ebenfalls bestens überein.

Granatperidotite treten in den Alpen nach bisheriger Kenntnis ausschließlich im Bereich der Insubrischen Linie auf. In der Ivreazone konnten durch R. SCHMIDT zwischen dem Toce-Tal und der südlich liegenden Val Strona Kelyphitperidotite aufgefunden werden, die nach den mit R. SCHMIDT dankenswerterweise abgesprochenen Untersuchungen von G. LENSCH und F. ROST (1971) eindeutig auf Granatperidotite zurückzuführen sind — die Granate sind zu auffälligen „Knoten“ von Hornblende und Spinell kelyphitisiert, was einer Subfazies der Spinellperidotite mit Hornblende statt Klinopyroxen entspricht, die auch im großen Körper von Finero vorliegt —. Es sei ferner an die Deutung

der Granat-ultramafitite der Alpe Arrami durch E. DEN TEX (1970) erinnert, der sie ebenfalls möglicherweise aus dem Mantel herleitet, so daß im Westteil der Insubrischen Linie die Möglichkeit nicht ausgeschlossen erscheint, daß hier bereits während der variszischen Phase der alpinen Orogenese tiefliegende granatperidotitische Ultramafitite des Mantels in krustale Gesteine eingeschuppt wurden. Während die Genese der Granatperidotite im Gebiet nördlich des Comer Sees, die durch M. FUMASOLI, Zürich, neu aufgefunden wurden (mündliche Mitteilung und gemeinsame Feldbegehung mit dem Verfasser), noch einer Klärung bedarf, ist die metamorphe Bildung der Granat-ultramafitite im Bergzug südlich des Ultentales (P. BRENNIS, 1970) eindeutig nachweisbar, die im Rahmen ihrer granulitartigen Nebengesteine erfolgte. Zu dem analogen Schluß kommen F. ROST und W. GRIGEL (1969) auch für die Genese der vergleichbaren Granat-ultramafitite des Moldanubikums.

Nimmt man für die Temperaturen der metamorphen Granulitbildung rund 700—800° C an, so fordert die Granatbildung in den Ultramafititen des Ultentales Drucke von mindestens 10 Kbar, was einer Tiefenlage der variszischen Metamorphose in den Alpen (s. Seite 267) von rund 30 km entsprechen dürfte.

Aus dem Auftreten der Granatperidotite entlang der Insubrischen Linie — Tonalelinie, für die hier verschiedene genetische Interpretationen möglich erscheinen, kann jedoch zweifelsfrei eine Schlußfolgerung gezogen werden, daß im Bereich dieser Störungszone bereits in der variszischen Phase des alpinen Orogens ein Tiefgang von mindestens 30 km erreicht wurde, wobei die Zeit der Platznahme dieser Kristallingesteine einschließlich ihrer eingeschuppten Mantelultramafitite im heutigen Niveau ein noch ungelöstes Problem bleiben muß.

IV. 2. Die retrograd-metamorphen Fazies der alpinotypen Ultramafitite in der Kruste

Auch bei der Erklärung der retrograden Metamorphose alpinotyper Peridotite — als wichtigsten Repräsentanten der Ultramafitite — ist man gezwungen, zwischen den in alte Kristallinserien eingeschuppten Ultramafititen und den ophiolitischen Ultramafititen einen entscheidenden Unterschied festzustellen.

Wie das Diagramm in Abb. 9 veranschaulicht, werden bei Temperaturen unter 600—750° C sowohl die Spinellperidotitfazies wie die Granatperidotitfazies von der Chlorit-Hornblende-Peridotitfazies abgelöst. Diese bei gleichzeitiger Druckabnahme durch Hebung in höhere Krustenniveaus stattfindende retrograde Metamorphose ist mit einer teilweisen Hydratisierung der Ultramafititminerale verbunden und nach ihren Bedingungen mit der Amphibolitisierung der Metabasite (Amphibolitfazies) vergleichbar. Alle Mineralumwandlungen und Reaktionen lassen sich auch in Übergängen in den Ultramafititen der mesozonalen Kristallingebiete mikroskopisch und chemisch belegen.

In Umkehrreaktion der Granatbildung aus Pyroxen und Spinell (F. ROST & W. GRIGEL, 1969) entsteht bei der retrograden Kelyphitisierung der pyropreichen Granate zunächst ein radialstrahliges Aggregat von Pyroxenen und sekundärem Spinell, die bei abnehmenden Temperaturen — Annäherung an die Amphibolitfazies — zu Hornblende und Chlorit umgewandelt werden. Auf die relativ seltene

Ausnahme einer Hornblende-Spinell-Subfazies in der mittleren Ivreazone (F. ROST, 1968) wurde bereits hingewiesen. Bei gleichzeitiger Gesteinsverformung führt die Metamorphose zu ausgesprochenen „Olivin-Schiefern“, wie sie in allen Übergängen in den ursprünglichen Granatperidotiten der Alpe Arrami von E. DAL VESCO (1953) beschrieben wurde. Ähnliche Beobachtungen können in den Granat-ultramafititen des Ultentales und des Gebietes N des Comer Sees (M. FUMASOLI) gemacht werden.

Die retrograde Metamorphose führt in Gesteinen der Spinellperidotitfazies zur Umwandlung der Klinopyroxene in Hornblenden und zur Chloritisierung der chromreichen Primärspinelle, deren Eisengehalt nicht im Chlorit aufgenommen, sondern in neugebildetem Magnetit ausgeschieden werden kann. In den Ultramafititen des Stubachtales ist die Chloritbildung aus dem hohen Aluminiumgehalt der primären Klinopyroxene, zum Teil in orientierter Entmischung, nachweisbar.

Einen Chlorit-Enstatit-Peridotit beschrieben beispielsweise V. TROMMSDORFF & B. W. EVANS (1969) aus den lepontinischen Alpen; schließlich liegen stark verschieferte Chlorit-Ultramafitite an der Gigestaffel bei Andermatt vor (A. SCHNEIDER, 1912, und eigene, unveröffentlichte Untersuchungen des Verfassers).

In den meist nur epizonal-metamorphen Ophiolitgebieten des alpinen Penninikums führt die retrograde Metamorphose bei Temperaturen unter 450–500° C und unter einem beträchtlichen H₂O-Angebot aus den penninischen Geosynklinalsedimenten direkt zur meist völlig durchgreifenden Serpentinisierung der ursprünglich anzunehmenden Spinellperidotite, die vielleicht schon im Mantel begonnen haben kann. Die Serpentinite sind auf Grund ihrer nicht isochemisch verlaufenden Bildungsreaktion nur mit Vorbehalt in ein Faziesdiagramm der alpinotypen Ultramafitite aufzunehmen; als Abschluß der Betrachtung über die retrograden Umwandlungen der Ultramafitite soll jedoch auf die Nennung der Serpentinite in den Ophiolitiserien nicht verzichtet werden, da sie einen weiteren Beweis für den „flachen Tiefgang“ der alpinen Orogenese in diesen Gebieten liefern.

Literatur

- ANGEL, F. (1964): Petrographische Studien an der Ultramafitmasse von Kraubath (Steiermark). — Mitt. Blatt Joanneum Graz, Abt. Min. 1964/2, 1–123.
- AVE'LALLEMANT, H. G. (1967): Structural and petrofabric analysis of an "Alpine-type" peridotite: The Lherzolitite of the french Pyrenees. — Leidse Geol. Med. 42, 1–57.
- AVE'LALLEMANT, H. G., & CARTER, N. L. (1970): Syntectonic recrystallization of olivine and modes of flow in the upper mantle. — Bull. Geol. Soc. Amer. Bull. 81, 2203–2220.
- BERCKHEMER, H. (1968): Topographie des „Ivrea-Körpers“ abgeleitet aus seismischen und gravimetrischen Daten. — Schweiz. Min. Petr. Mitt. 48, 235–246, Zürich.
- BOWEN, N. L., & TUTTLE, O. F. (1949): The System MgO - SiO₂ - H₂O. — Bull. Geol. Soc. Amer. 60, 439–460.
- BOYD, F. R., & ENGLAND, J. L. (1958/59): Experimentation at high pressures and temperatures; Pyrop. — Yearb. Carnegie Inst. Wash. 58, 83–87.
- BRENNEIS, P. (1970): Die Ultramafitite im Bergzug südlich des Ultentales, Südtirol. — Fortschr. Miner. 48, Beiheft 1, 1–2, Jena.
- CARTER, N. L., & AVE'LALLEMANT, H. G. (1970): High temperature flow of Dunite and Peridotite. — Bull. Geol. Soc. Amer. 81, 2181–2202.

- CARSWELL, D. A. (1968): Possible primary upper mantle peridotite in Norwegian basal gneiss. — *Lithos* 1, 322—355.
- CHRISTA, E. (1931): Geologisch-petrographische Karte des oberen Zemmgrundes (Zillertaler Alpen). — *Jahrb. Geol. B.-A.*, 81, Wien.
- CLARK, S. P., jr., & RINGWOOD, A. E. (1964): Density distribution and constitution of the mantle. — *Rev. Geophysics* 2, 35—88.
- CORNELIUS, H. P., & CLAR, E. (1934): Geologische Karte des Großglocknergebietes. — *Geol. B.-A.* Wien.
- DAL VESCO, E. (1953): Genesi e metamorfosi delle rocce basiche e ultrabasiche nell'ambiente mesozonale dell'orogeno. — *Boll. Svizz. di Min. e Petr.* 33, 173—480, Zürich.
- DAVIES, H. L. (1968): Papuan Ultramafic Belt. — 23. *Int. Geol. Congr. 1, Upper Mantle*, 209—220.
- FEDIUKOVA, E. (1965): Ultrabasic Xenoliths in the Granulite at Mt. Klet near Český Krumlov. — *Acta Univ. Carol.-Geol.* 3, 189—202, Prag.
- GASS, I. G. (1967): The ultrabasic volcanic assemblage of the Troodos Massif, Cyprus. — WYLLIE, P. J.: *Ultramafic and related rocks* New York, 121—134.
- GIESE, P., GÜNTHER, K., & REUTTER, K.-J. (1970): Vergleichende geologische und geophysikalische Betrachtungen der Westalpen und des Nordappennins. — *Z. deutsch. geol. Ges.* 120, 151—195, Hannover.
- GRUBENMANN, U. (1908): Der Granatolivinfels des Gordunotales und seine Begleitgesteine. — *Vierteljahresschrift d. Naturf. Ges. Zürich*, 53, 129—153.
- HESS, H. H. (1955): Serpentine, Orogeny and Epeirogeny. — *Geol. Soc. of Amer. Spec. Pap.* 62, 391—408.
- ITO, K., & KENNEDY, G. C. (1967): Melting and phase relations in a natural peridotite to 40 kilobars. — *Amer. Jour. Sci.* 265, 519—538, New Haven.
- KEUSEN, H. R. (1970): Genese der basischen und ultrabasischen Gesteine vom Geisspfad (Wallis, Schweiz). — *Fortschr. Miner.* 48, Beiheft 1, 14—16, Jena.
- KOPECKY, L., & SATTRAN, V. (1962): Ke genezi pyropen v Českém středohoří (Zur Genese des Pyrop im Böhm. Mittelgebirge). — *Vestn. Úst. Geol.* 37, 269—283, Prag.
- LAMMERER, B., & KLEMM, D. D. (1970): Elementverteilung in Serpentiniten der alpinen Unteren Schieferhülle und ihre geologische Interpretation. — *Fortschr. Miner.* 48, Beiheft 1, 16, Jena.
- LENSCH, G. (1968): Die Ultrafitite der Zone von Ivrea und ihre geologische Interpretation. — *Schweiz. Min. Petr. Mitt.* 48, 91—102, Zürich.
- LENSCH, G. (1971): Die Ultramafite der Zone von Ivrea. Habilitationsschrift Saarbrücken 1969. — *Ann. Saraviensis*, Bd. 9 (1971) im Druck.
- LENSCH, G., & ROST, F. (1971/72): Kelyphitperidotite in der mittleren Ivrea-Zone zwischen Toce-Tal und Valstrona. Ein Beitrag zur Herkunftstiefe der Ultramafite der Ivreazone (in Vorbereitung).
- MEISSNER, R. (1967): Zum Aufbau der Erdkruste. Ergebnisse der Weitwinkelmessungen im bayerischen Molassebecken, Teil II. — *Gerlands Beitr. z. Geophysik* 76, 295—314, Leipzig.
- MÖCKEL, J. R. (1969): Structural petrology of the Garnet-peridotite of Alpe Arrami (Ticino, Switzerland). — *Leidse Geol. Med.* 42, 61—130.
- O'HARA, M. J. (1967): Mineral paragenesis in ultrabasic rocks WYLLIE, P. J.: *Ultramafic and related rocks*. J. Wiley and Sons Inc., New York, 393—403.
- O'HARA, M. J. (1967): Mineral facies in ultrabasic rocks. — WYLLIE, P. J.: *Ultramafic and related rocks*. J. Wiley and Sons Inc., New York, 7—18.
- PETERS, Tj. (1969): Rocks of the alpine ophiolitic suite. *Tectonophysics, Special Issue* 7, 507 to 509, Amsterdam.
- DE ROEVER, P. (1957): Sind die alpinotypen Peridotitmassen vielleicht tektonisch verfrachtete Bruchstücke der Peridotitschale? — *Geol. Rundschau* 46, 137—146, Stuttgart.
- ROST, F. (1956): Ultrabasic Gesteine in der Münchberger Gneissmasse. — *Geol. Bav.* 27, 175—231, München.
- ROST, F. (1966): Über ultrabasiche Einschlüsse in metamorphen Gesteinen des südlichen Moldanubikums. — *Krystallinkum, Prag*, 4, 127—162.
- ROST, F. (1967): Zur faziellen Einstufung österreichischer Peridotite. — *Mitt. Blatt Joanneum Graz, Abt. Min.* 1/2, 92—98.

- ROST, F. (1968): Über die FaziesEinstufung orogentypischer Peridotite und ihre Beziehungen zur Peridotitschale des Erdmantels. — XXIII. Int. Geol. Congr. Vol. 1, 187—196.
- ROST, F., & GRIGEL, W. (1969): Zur Geochemie und Genese granatführender Ultramafitite des mitteleuropäischen Grundgebirges. — Chem. d. Erde, 28, 91—177, Jena.
- ROST, F. (1971): Probleme der Ultramafitite. — Fortschr. Miner. 48, 54—68.
- SCHMID, R. (1967): Zur Petrographie und Struktur der Zone Ivrea—Verbano zwischen Valle d'Ossola und Val Grande (Prov. Novara, Italien). — Schweiz. Min. Petr. Mitt. 47, 935, 1117, Zürich.
- SCHMID, R. (1968): Schwierigkeiten der Nomenklatur und Klassifikation massiger Katamorphite, erläutert am Beispiel der Zone Ivrea-Verbano (Norditalien). — Schweiz. Min. Petr. Mitt. 48, 81—90 Zürich.
- SCHNEIDER, A. (1912): Der Diallageridotit und seine Umwandlungsprodukte auf Gigestaffel südlich Andermatt. — Dissertation Zürich.
- SCHREYER, W. (1969): Über den Aufbau der Erde aus der heutigen Sicht der Petrologie. — Fortschr. Miner. 46, 29—41, Jena.
- SCHREYER, W., & SEIFERT, F. (1969): High-pressure phases in the System MgO - Al₂O₃ - SiO₂ - H₂O. — Am. Journ. Sc., Schairer Volume 267 A, 407—443.
- SEIFERT, F., & SCHREYER, W.: (1967): Die Möglichkeit der Entstehung ultrabasischer Magmen bei Gegenwart geringer Alkalimengen. — Geol. Rundschau 57, 349—362, Stuttgart.
- DEN TEX, E. (1970): Alter, Herkunft und Ortsstellung „alpidischer“ Ultramafitite im Lichte neuer Korngefügeforschungen. — Fortschr. Miner. 48, Beiheft 1, 36—37, Jena.
- TROMMSDORFF, V., & EVANS, B. W. (1969): The stable Association Enstatite-Forsterite-Chlorite in Amphibolite Facies Ultramafics of the Lepontine Alps. — Schweiz. Min. Petr. Mitt. 49, 325—332, Zürich.
- WYLLIE, P. J. (1970): Ultramafic rocks and the upper mantle. — Miner. Soc. Amer. Spec. Pap. 3, 3—32.