

Zeitschrift: Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen = Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie
Band: 60 (1980)
Heft: 2-3

Artikel: P-T Bestimmungen anhand von Mineralanalysen in Eklogiten und Glaukophaniten der Ophiolite von Zermatt
Autor: Oberhäslı, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-46668>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 25.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

P-T Bestimmungen anhand von Mineralanalysen in Eklogiten und Glaukophaniten der Ophiolite von Zermatt

von *R. Oberhänsli**

Abstract

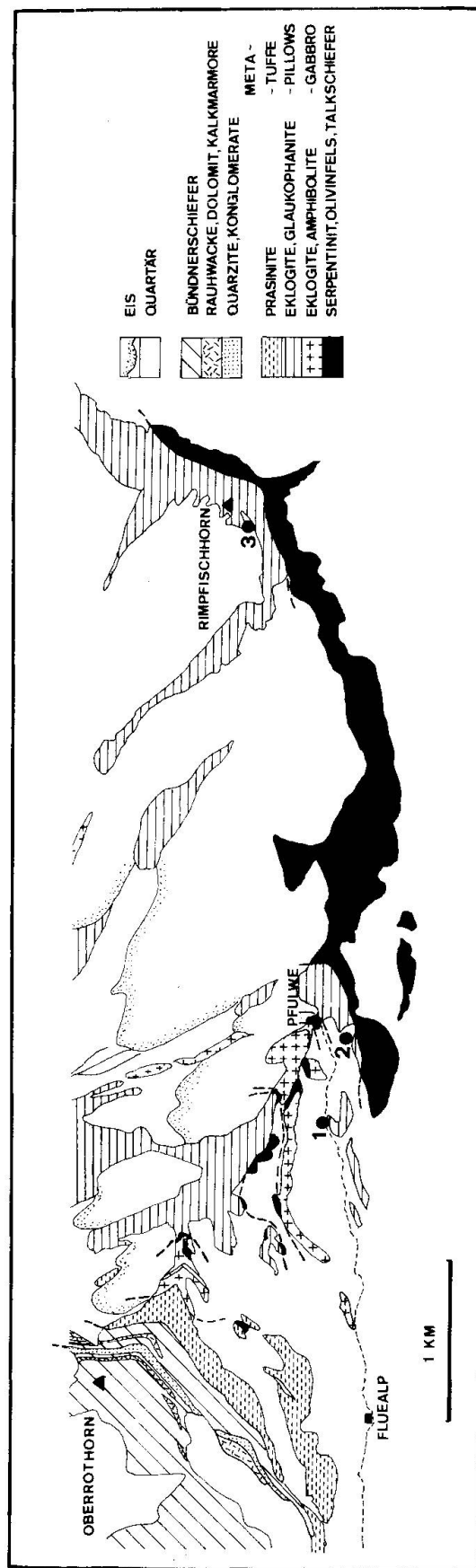
Microprobe data of phengites, paragonites, biotites, garnets, omphacites, glaucophanes and other amphiboles for 9 eclogite samples from the Zermatt-Saas area are presented. Physical conditions during the early Alpine high pressure-«low» temperature metamorphism were derived from the garnet-clinopyroxene geothermometer (RÄHEIM & GREEN, 1974; ELLIS & GREEN, 1979) and the jadeite component in omphacite. P-T values obtained range from 10 kb/400°C to 16 kb/700°C within a single sample or even within a single garnet grain. The garnet-phengite geothermometer (KROGH & RÄHEIM, 1978) yielded a larger spread in temperature with a trend to higher T values. From textural and chemical data it is suggested that phengite is a post-eclogite mineral. These results are consistent with a complicated metamorphic history for the Zermatt-Saas area where equilibrium conditions are only locally preserved.

EINLEITUNG

Östlich von Zermatt liegt der von BEARTH (1967, 1973) und BEARTH & STERN (1971) mehrfach beschriebene Ophiolithkomplex von Zermatt-Saas. Am Westabhang des Rimpfischhornes findet man alle für die ozeanische Kruste typischen Gesteine. Doch liegt nirgends eine normale Abfolge von Serpentiniten, Metagabbros, Metavulkaniten und Metasedimenten vor. Vielmehr ist diese Ophiolithzone in sich stark verschuppt. Mehr oder weniger mächtige Serpentinkeile trennen meist Metagabbros, Metapillowlaven und metamorphe Tuffe untereinander und von den Sedimenten ab.

Der ganze Komplex ist von zwei Metamorphosephasen überprägt worden: erstens einer kretazischen Hochdruckphase (60–90 mj) mit Eklogit- und Glaukophanitbildung und zweitens einer tertiären (~ 38 mj) grünschieferfaziellen Phase. In den hier untersuchten Gesteinen vermischen sich die Produkte beider Phasen. Im Gebiet zwischen Pfulwe und Rimpfischhorn findet man die von

* Labor für Mikroröntgenspektroskopie der phil. nat. Fakultät der Universität Bern, Sahlistrasse 6, 3012 Bern



Figur 1 Kartenskizze der geologischen und tektonischen Einheiten der Ophiolithzone von Zermatt-Saas zwischen Rimpfischhorn und Oberrothorn mit Probenpunkten. 1: PB 2013, 2014, 1296; 2: PVB 891; 3: PVB 878. Die Proben PB 1544, 1699, 2069 stammen aus der Allalinmoräne bei Mattmark.

Bearth beschriebenen Pillowlaven mit eklogitischem Kern und glaukophanitischen Rand neben prasinitischen Metatuffen. Untersuchungen koexistierender Mineralpaare, insbesondere von Granat/Klinopyroxen und von Granat/Phengit, aber auch die Zusammensetzung der mit Albit koexistierenden Amphibole, sollen Aufschluss über die Metamorphose-Geschichte der Pillowlaven vom Rimpfischhorn geben. Da es sich hier um eine reine Laborarbeit an Proben von Prof. P. Bearth handelt, möchte ich für eine eingehendere Beschreibung der Geologie auf seine Arbeiten von 1967 und 1973 verweisen.

PETROGRAPHIE

In den Metavulkaniten des Rimpfischhornes treten vorwiegend Eklogite mit Omphacit, Granat, Hellglimmer und Epidot auf. Daneben findet man aber auch Glaukophanite mit Granat, Hellglimmer, Chlorit, Chloritoid und Talk. Ohne kartierbare Grenzen können diese Gesteine in Albit-Epidot-Amphibolite oder Prasinite übergehen. Es lässt sich nicht beurteilen, ob diese chemische Andersartigkeit, welche sich im Mineralbestand ausdrückt, magmatisch oder durch Umwandlungen während der Metamorphose bedingt ist (BEARTH, 1973).

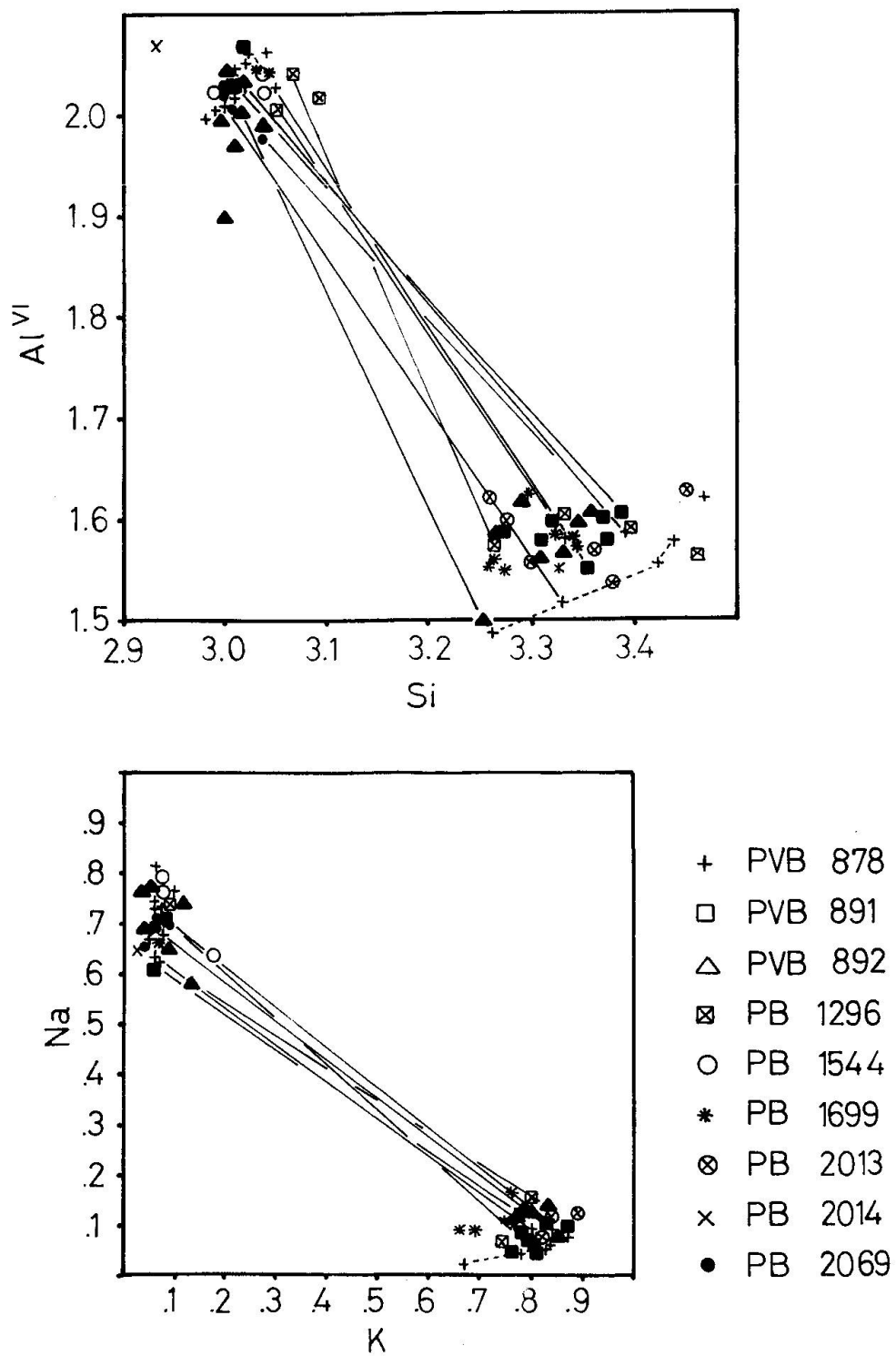
Im folgenden wurden vor allem Eklogite und eklogitische Granatamphibolite untersucht. In den Eklogiten tritt Glaukophan neben Granat, Omphacit und Phengit/Paragonit nur untergeordnet auf. Als Nebengemengteile findet man Albit, Epidot, Klinozoisit, Chlorit, etwas Quarz und Calcit. Hämatit, Apatit und Rutil treten akzessorisch auf. Glaukophan ist randlich immer in blaugrüne barroisitische Hornblende umgewandelt.

Der Mineralbestand der eklogitischen Granatamphibolite gleicht demjenigen der Eklogite. Allerdings ist die Amphibolgruppe mit Glaukophan, Crossit, Barroisit und Aktinolit gegenüber den Pyroxenen stärker vertreten.

MINERALCHEMIE

Von 9 Proben aus eklogitischen Pillowlaven der Pfulwe und vom Rimpfischhorn wurden die folgenden Mineralzusammensetzungen bestimmt. Für die Analysen stand die SEMQ-Mikrosonde mit dem energiespersiven System TN-2000 des mineralogisch-petrographischen Institutes der Universität Basel zur Verfügung. Die Spektrenentflechtung sowie die Auswertung energie- bzw. winkeldispersiver Information wurde on-line durchgeführt (ZAF-Korrektur, SCHWANDER & GLOOR, 1980).

Röntgenographisch konnte in den Proben PB 1699, 1544, 2014 und PVB 878 Muskowit und Paragonit bestimmt werden. In den Proben PVB 892, PB 1296 und 2069 war der röntgenographische Nachweis von Muskowit neben Parago-



Figur 2 Variationsdiagramme von Al^{VI} gegen Si und Na gegen K für die Hellglimmer. Koexistierende Paare sind mit Linien verbunden. Zeichenerklärung siehe Legende.

nit zweifelhaft; in den Proben PB 2013 und PVB 891 konnte Muskowit nicht nachgewiesen werden.

Mit der Mikrosonde konnte in den Proben PB 2014 und PB 2011 nur Paragonit festgestellt werden obwohl z. B. Probe PB 2014 nach den röntgenographischen Untersuchungen ebenfalls Muskowit enthält. Dies lässt sich dadurch erklären, dass von den Proben verschiedene Gesteinssplitter bearbeitet wurden.

Glimmer

Wie BEARTH (1967/1973) beschrieb, treten in den eklogitischen Gesteinen Zermatts Hellglimmer verbreitet auf. In den untersuchten Proben tritt Phengit und Biotit neben Paragonit nur untergeordnet auf. Phengit bildet einerseits kleine diskrete Körner und andererseits Bereiche in grösseren Paragoniten. Es handelt sich nicht um zonierte Minerale mit Phengitkernen und Paragoniträndern, sondern um Paragonite mit Phengitdomänen, wobei die Grenzen zwischen Phengit und Paragonit scharf sind. Die untersuchten Phengite sind immer relativ rein und weisen im Gegensatz zu den Paragoniten kein Margaritmolekül auf. Wie aus Fig. 2 ersichtlich ist, variieren die Si-Gehalte der Hellglimmer, in der Kationennorm auf 11 Sauerstoffatome (wasserfreie Analysen) berechnet, pro Formeleinheit von 2.96 bis 3.05 um einen Mittelwert von 3.01 für Paragonit, während sie in den Phengiten um den Mittelwert 3.34 von 3.25 bis 3.46 schwanken.

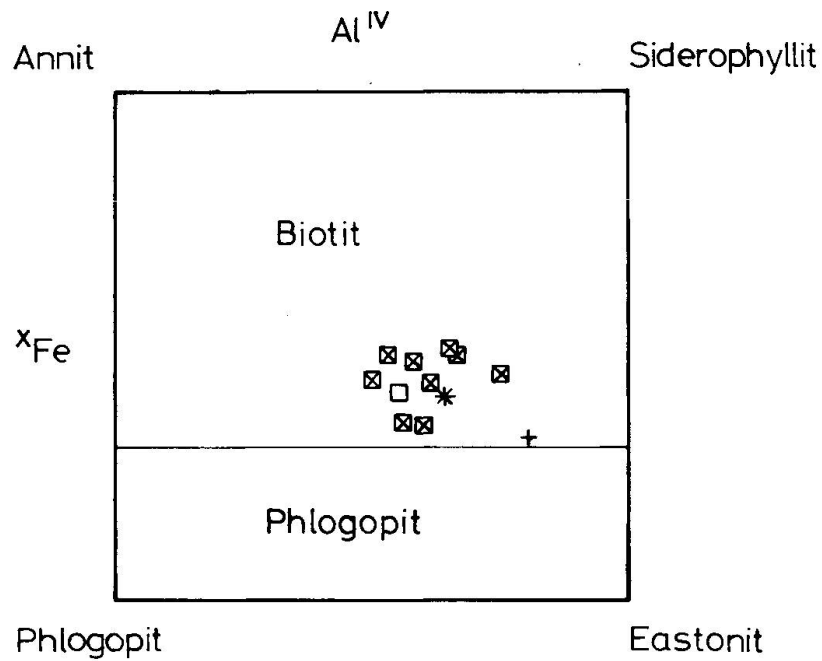
Für Al, Na und K ist die Variation aus Fig. 2 ersichtlich. Die Titangehalte schwanken um einen Mittelwert von 0.003 für die Paragonite und 0.014 in den Phengiten.

Bei den Paragoniten erkennt man einen leichten Überschuss an oktaedrisch koordiniertem Aluminium, ebenso zeigen die Summen der sechsfach koordinierten Kationen in den Phengiten Werte über 2000. Dieser leichte Überschuss kann durch das Defizit in den Zwischenschichten wieder ausgeglichen werden.

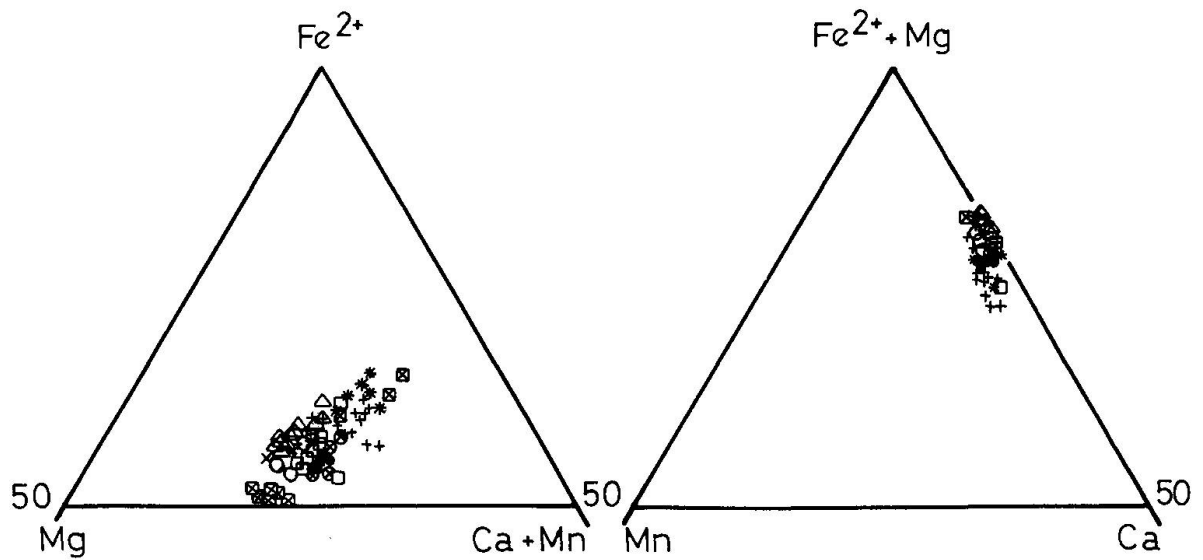
Biotite treten in den untersuchten Proben im allgemeinen nur sehr selten auf. Probe PB 1296 bildet eine Ausnahme; die Biotite treten meist zwischen Granat und Paragonit oder zwischen Granat und Phengit auf. Es handelt sich um relativ Eastonitreiche Biotite (Fig. 3).

Granat

Die Granatformeln wurden auf 12 Sauerstoffatome bezogen. Fe^{3+} wurde nach der Formel $\text{Fe}^{3+} = 8 - 2\text{Si} - 2\text{Ti} - \text{Al}$ (RYBURN et al., 1975) berechnet. Die so bestimmten Fe^{3+} -Werte sind klein, so dass die Andradit-Komponente im



Figur 3 Variationsdiagramm für Biotite der Proben PB 1296, 1699, PVB 891 und 878. Fe wurde als FeO berechnet. Für genau bestimmte FeO- und Fe₂O₃-Werte dürften die Biotite etwas Phlogopit-reicher sein.



Figur 4 Kationenverhältnisse der die Oktaederplätze belegenden Kationen in den Granaten. Es sind nur die eisenreichen Ecken der Variationsdreiecke dargestellt.

weiteren vernachlässigt werden kann. Die Variationsdiagramme¹ (Fig. 4) zeigen, dass die Granate, obwohl teilweise zonierte, in einem beschränkten Feld streuen und die folgende mittlere Zusammensetzung besitzen:



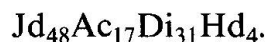
Damit passen sie in die Gruppe der Granate der C-Eklogite nach COLEMAN et al. (1965).

Die Pyrop-Komponente der Zermatter Granate liegt wesentlich höher als diejenigen der Granate von Breuil (ERNST & DAL PIAZ, 1978) und erreicht im Mittel den von BEARTH (1967/1973) publizierten Wert von Py_{18-20} . Die Granate sind nur schwach zonierte mit einem Ca- und Mn-reicheren Kern sowie Fe- und Mg-reicheren Rand. Das Fe/Mg-Verhältnis kann vom Kern zum Rand leicht zu- oder abnehmen und zeigt keine Gesetzmässigkeit, wie sie von ERNST & DAL PIAZ (1978) angedeutet wird.

Omphazit

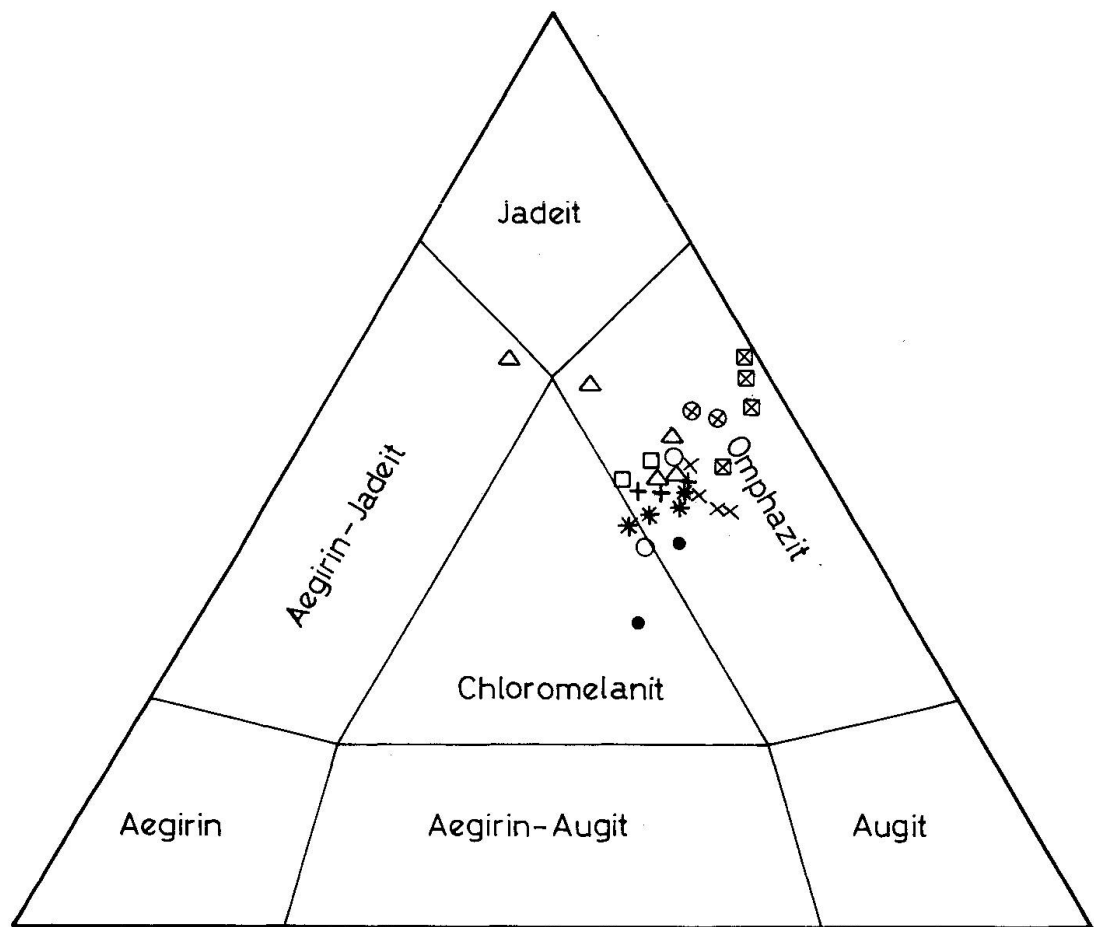
In Fig. 5 sind 28 Omphazite dargestellt. Es handelt sich ausschliesslich um mit Granat koexistierende Körner mit gemeinsamen Korngrenzen. Die in Fig. 6a eingezeichneten Pyroxene aus der Diablastik zeigen deutlich niedrigere Ca- und Na-Werte. Die Omphazitanalysen wurden auf 6 Sauerstoffe normiert. Ca und Na ergeben zusammen innerhalb des Messfehlers 1 oder etwas mehr (Mittel 1.02). Feste Lösungen zu den Endgliedern Enstatit und Ferrosalit können daher vernachlässigt werden. Angenäherte Fe^{3+} -Werte wurden unter der Annahme eines Ladungsausgleichs nach der Formel $\text{Fe}^{3+} = 4 - 2\text{Si} - 2\text{Ti} - \text{Al} + \text{Na} + \text{K}$ berechnet (RYBURN et al., 1975). Der Jadeit-Gehalt der Pyroxene wurde nach der Methode von BANNO (1959) bestimmt.

Die Jadeit-Anteile der Pyroxene von Rimpfischhorn streuen etwas mehr als bei BEARTH (1973) und ERNST & DAL PIAZ (1978). Das Mittel entspricht einem Omphazit mit der Endgliedformel

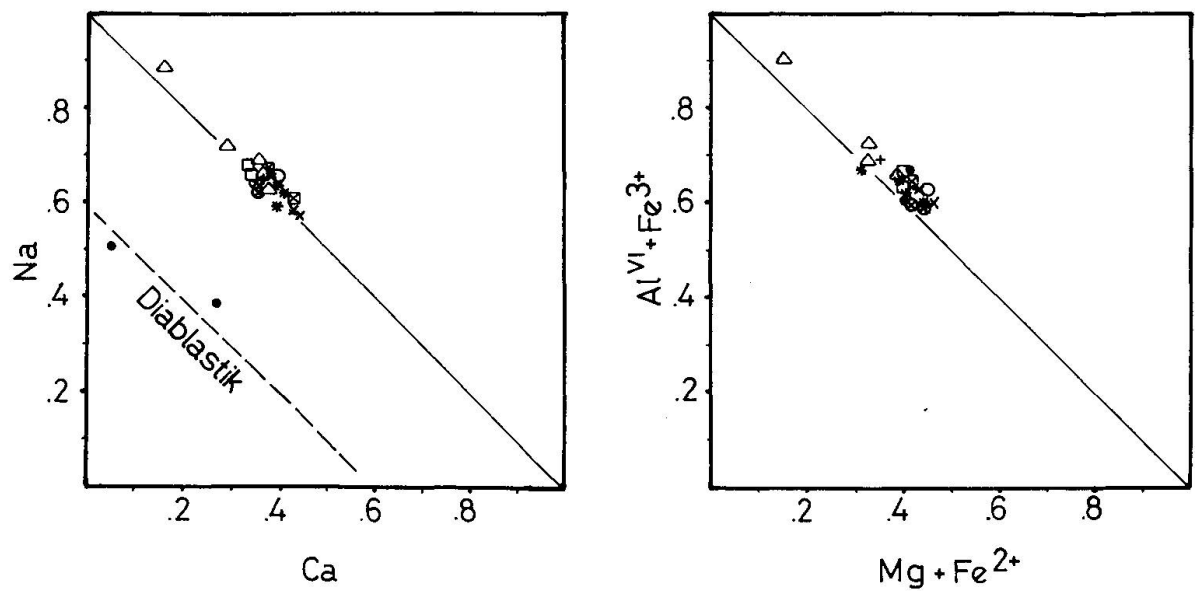


Die Jadeit-Gehalte liegen somit höher als die von ERNST & DAL PIAZ (1978) berechneten ($\text{Jd}_{42}\text{Ac}_{12}\text{Di}_{34}\text{Hd}_{12}$).

¹ Zum einfachen Vergleich wurden dieselben Diagramme wie bei ERNST und DAL PIAZ (1978) gewählt.



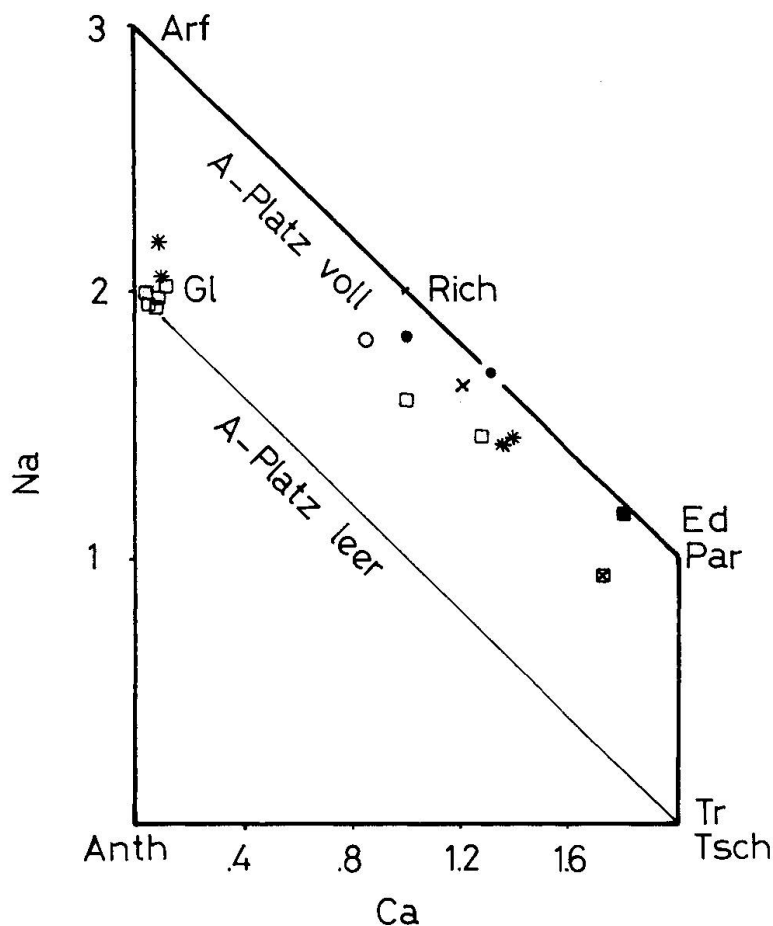
Figur 5 Klassifikationsdiagramm für Na-führende Klinopyroxene.



Figur 6 Variationsdiagramme für die Klinopyroxene. Na/Ca für die M2-Position und $\text{Al}^{(\text{VI})} + \text{Fe}^{3+} / \text{Mg} + \text{Fe}^{2+}$ für die M1-Position. Die Diagonalen entsprechen den geometrischen Orten für vollständig besetzte Positionen.

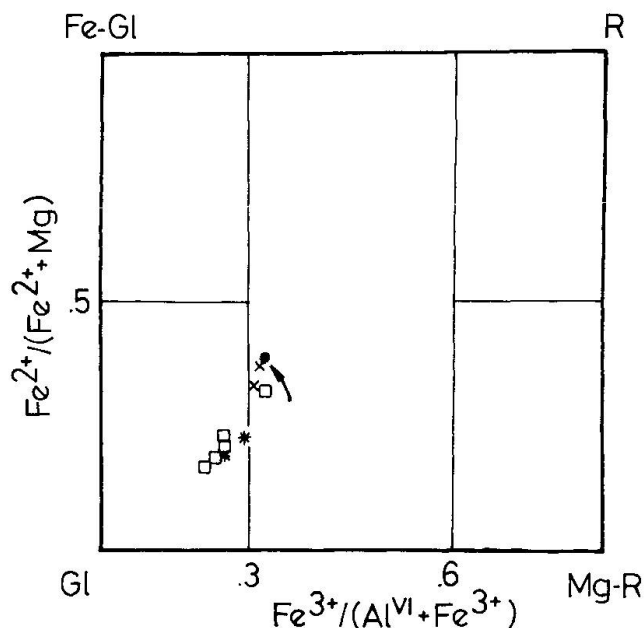
Amphibole

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Amphibole nicht sehr eingehend untersucht. Man kann zwischen Alkaliamphibolen, z.T. eigentlichen Glaukophanen, und den aus der Diablastik hervorgegangenen Ca-führenden Amphibolen unterscheiden. Die Diablastik besteht aus einem nahezu submikroskopischen Gemenge von Pyroxen, Glimmer, Epidotmineralen und Amphibol. Fig. 7 stellt einige Ca-Amphibole nebst Glaukophanen dar. Es zeigt sich ein schwer interpretierbares Bild von Amphibolen mit mehr oder weniger gefüllten A-Plätzen. Es ist ein deutliches Abweichen zu den von ERNST (1979) aus der Valtournanche beschriebenen Ca-Amphibolen und Hornblenden festzustellen. Der durch die Retromorphose bedingte Trend zu gefüllten A-Plätzen tritt in den Zermatter-Proben deutlicher in Erscheinung. Die Glaukophan-Analysen sind im Dia-



Figur 7 Na-Ca-Variationsdiagramm für Amphibole.

Die A-Plätze sind deutlich stärker belegt als dies von ERNST (1979) für die Proben der Valtournanche bestimmt wurde. Arf: Arfvedsonit, Rich: Richterit, Ed: Edenit, Par: Pargasit, Tr: Tremolit, Tsch: Tschermakit, Anth: Anthophyllit, Gl: Glaukophan.



Figur 8 Myashiro-Diagramm für Alkali amphibole.

gramm nach MIYASHIRO (1957) dargestellt (Fig. 8). Es wurde $\text{Fe}^{2+} = \text{Fe}^{3+}$ angenommen, um so einen maximalen Gehalt an dreiwertigem Eisen zu erhalten. Für genau bestimmtes Fe^{3+} müssten alle Analysen in Pfeilrichtung rücken.

METAMORPHOSEBEDINGUNGEN

Wie die in BEARTH & STERN (1971) und BEARTH (1973) publizierten Gesteinsanalysen zeigen, ist der Fe_2O_3 -Gehalt der hier untersuchten Proben gering. Deshalb, und ausgehend von der Annahme, dass die Paragenese Granat/Phengit während der Eklogitbildung stabil war, sollte im Rahmen dieser Arbeit versucht werden, das von KROGH & RÅHEIM (1978) für Eklogite mit niedrigem Fe_2O_3 -Gehalt erstellte Granat-Phengit-Thermometer im Gebiet von Zermatt anzuwenden und mit dem Granat-Klinopyroxen-Thermometer (RÅHEIM & GREEN, 1974; ELLIS und GREEN 1979) zu vergleichen.

Auf Grund geologischer Beobachtungen gibt BEARTH (1967) Druckabschätzungen, welche zu weit gestreut sind, um für Berechnungen verwendet zu werden. CHINNER und DIXON (1973) rechnen mit 10–15 kb und 700° für die Bildung der frühalpinen eklogitischen Paragenesen im Allalingabbro. Sie nehmen dabei allerdings an, dass Talk und Disthen als stabile Paragenese auftritt (vgl. Einwand bei BEARTH, 1974, p. 393). ERNST und DAL PIAZ (1978) nehmen für die Proben von Breuil einen lithostatischen Druck von 8–10 kb während der Eklogitbildung an. Mit diesem Druck ermitteln sie nach RÅHEIM & GREEN (1974) Temperaturen von $470 \pm 50^\circ\text{C}$.

Tabelle 1 Mikrosondendaten für Granat-Klinopyroxen-Paare.

	PVB 878			PVB 891			PVB 892								
	Gr	Px		Gr	Px		Gr	Px	Gr	Px	Gr	Px	Gr	Px	
SiO ₂	37.98	55.22		38.38	55.69		38.31	55.44	38.28	54.93	38.78	56.15	37.97	54.76	Px-R
TiO ₂	-	-		-	-		.14	.08	-	-	-	.16	-	-	
Al ₂ O ₃	22.23	12.12		22.74	12.10		21.95	12.90	22.03	12.26	22.31	13.90	22.31	12.76	15.23
FeO*	26.17	7.51		25.78	6.87		25.52	7.24	26.72	6.62	26.87	6.62	26.13	5.52	8.51
MnO	.50	-		.25	-		.26	-	-	-	.38	.26	.22	-	.15
MgO	6.75	5.99		6.66	5.79		5.88	5.22	6.80	6.02	6.87	5.13	6.82	6.56	2.61
CaO	6.08	9.14		6.91	9.78		7.06	8.67	6.48	9.40	6.01	7.63	6.27	9.69	4.04
Na ₂ O	-	9.84		-	9.05		-	9.60	-	9.38	-	10.47	-	8.82	12.85
Total	99.71	99.82		100.72	99.28		99.12	99.15	100.31	98.61	101.22	100.32	99.62	98.11	99.35
Si	2.957	1.991		2.951	2.008		2.994	2.000	2.960	1.995	2.969	1.995	2.947	1.986	2.013
Ti	-	-		-	-		.008	.002	-	-	-	.004	-	-	-
Al	2.040	.515		2.061	.514		2.022	.549	2.008	.525	2.013	.582	2.032	.546	.646
Fe***	.046	.191		.037	.103		-	.119	.072	.146	.049	.141	.074	.102	.224
Fe**	1.658	.035		1.623	.104		1.668	.099	1.656	.055	1.671	.056	1.622	.065	.032
Mn	.033	-		.016	-		.107	-	-	-	.025	.008	.014	-	.005
Mg	.783	.322		.763	.311		.685	.281	.784	.326	.784	.272	.789	.355	.140
Ca	.507	.353		.569	.378		.591	.335	.537	.366	.493	.291	.521	.377	.156
Na	-	.688		-	.633		-	.672	-	.661	-	.721	-	.620	.896

Jadeit
in CPX

KD

63.2

०६

52.4

11.2

4.25

10.4

7.00

2.5

4.8

6.9

2.2

5.4

3.2

5.5

deit

PB 1296

PB 1544

	Gr	Px	Gr-K	Gr-R	Px	Gr	Px	Gr	Px	Gr	Px	Gr	Px
SiO ₂	39.21	57.18	38.33	39.54	57.42	39.15	57.36	39.20	56.94	38.66	56.89	38.80	56.54
TiO ₂	.10	-	-	-	-	.16	.23	-	-	-	.09	-	.12
Al ₂ O ₃	22.14	14.05	21.09	22.48	13.23	21.76	14.30	21.26	12.54	21.69	12.61	21.35	12.09
FeO*	23.98	3.73	29.21	24.40	3.19	23.78	3.69	25.52	3.59	24.66	6.53	26.01	6.16
MnO	.46	-	.47	.28	-	.33	-	.31	-	.27	-	.61	-
MgO	7.91	6.42	4.50	7.75	6.85	7.96	5.90	7.35	7.48	6.32	6.05	5.69	5.66
CaO	6.73	9.16	6.55	6.91	10.61	6.55	9.12	6.20	11.20	7.71	9.55	7.28	8.88
Na ₂ O	-	9.06	-	-	8.88	-	9.43	-	8.87	-	9.06	-	9.53
Total	100.53	100.10	100.15	101.36	100.20	99.69	100.03	99.86	100.62	99.31	100.60	99.74	98.99

Si	2.994	2.006	3.013	2.988	2.013	3.009	2.011	3.031	2.000	3.008	2.013	3.020	2.032
Ti	.006	-	-	-	-	.009	.006	-	-	-	.002	-	.003
Al	1.992	.581	1.954	2.003	.547	1.971	.591	1.938	.519	1.990	.526	1.959	.512
Fe...	.008	.023	.020	.021	.031	-	.016	-	.085	-	.066	.001	.082
Fe..	1.523	.086	1.900	1.521	.063	1.529	.092	1.651	.020	1.605	.122	1.692	.103
Mn	.030	-	.031	.018	-	.021	-	.018	-	.018	-	.040	-
Mg	.900	.336	.527	.873	.359	.912	.308	.847	.392	.733	.319	.660	.303
Ca	.551	.363	.552	.560	.399	.539	.343	.514	.422	.643	.362	.607	.342
Na	-	.616	-	-	.604	-	.641	-	.604	-	.622	-	.664

Jadeit
in CPX

60.5

57.0

63.4

50.6

56.2

56.9

KD

6.6

9.9

5.6

38.2

5.7

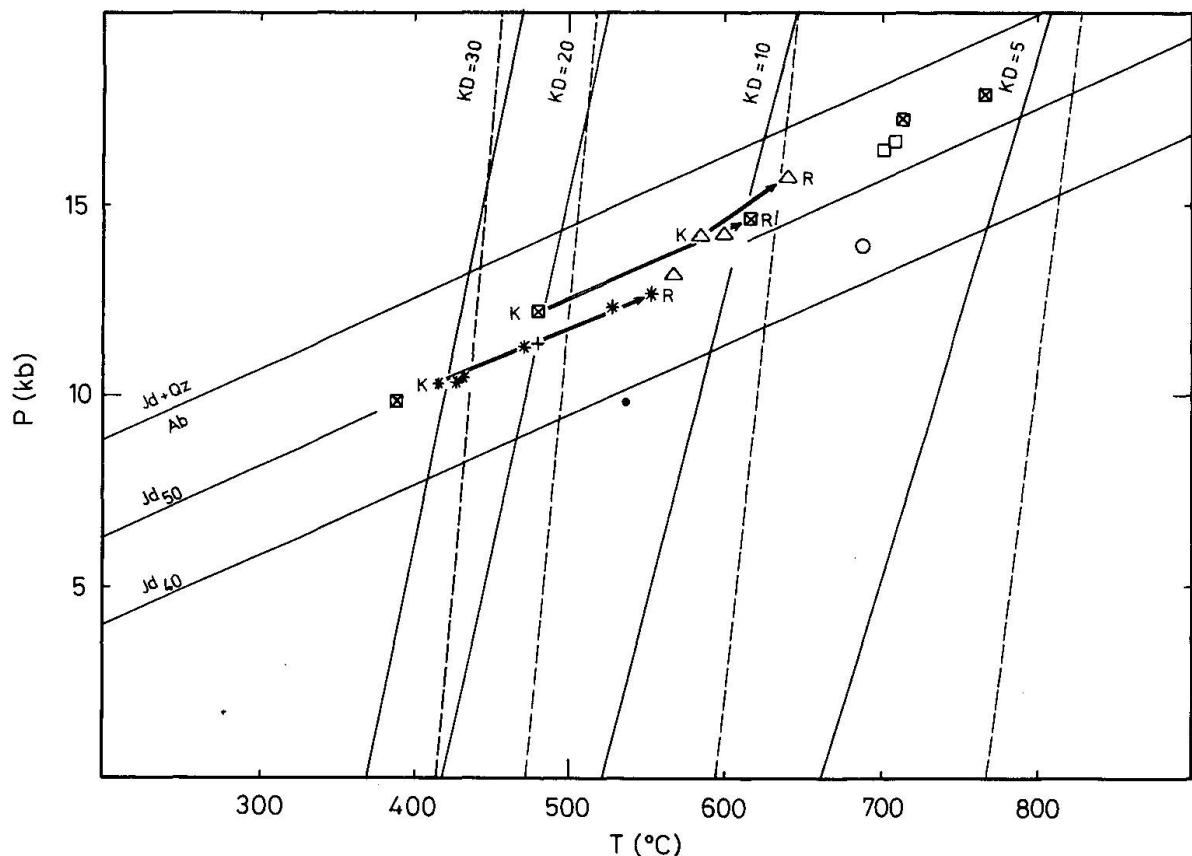
7.5

	PB 1699						PB 2069					
	Gr	Px-R	Px-K	Gr-K	Gr-R	Px	Gr	Px	Gr	Px	Gr	Px
SiO ₂	37.83	54.43	56.42	37.64	37.67	54.97	37.46	54.33	37.73	54.94	37.81	53.93
TiO ₂	-	.16	-	-	-	-	.15	-	-	.16	.12	-
Al ₂ O ₃	21.89	10.77	12.14	21.60	21.78	11.55	21.38	11.52	21.85	10.97	22.03	8.73
FeO*	28.73	8.86	6.11	29.21	27.48	7.22	27.38	7.39	29.66	7.36	25.78	9.53
MnO	.41	-	-	.63	.40	-	.93	-	.66	-	.80	.33
MgO	4.64	5.76	6.84	4.03	5.16	6.47	3.73	6.22	3.57	6.63	6.24	7.31
CaO	7.08	9.29	10.46	6.92	6.50	9.58	7.91	10.43	7.31	10.06	7.35	10.39
Na ₂ O	-	9.37	9.28	-	-	9.28	-	9.01	-	8.48	-	8.49
Total	100.58	98.64	101.25	100.04	99.00	99.07	99.03	98.90	100.78	98.60	100.14	98.71
Si	2.958	2.001	1.994	2.972	2.972	1.995	2.982	1.983	2.967	2.004	2.937	2.000
Ti	-	.004	-	-	-	-	.009	-	-	.004	.007	-
Al	2.017	.467	.506	2.009	2.026	.494	2.006	.496	2.025	.471	2.017	.382
Fe ⁺⁺⁺	.067	.191	.142	.047	.030	.169	.012	.176	.041	.113	.095	.228
Fe ⁺⁺	1.811	.082	.039	1.881	1.783	.050	1.811	.050	1.910	.111	1.580	.068
Mn	.027	-	-	.042	.027	-	.063	-	.044	-	.053	.010
Mg	.541	.316	.360	.474	.607	.350	.443	.338	.418	.360	.723	.404
Ca	.593	.366	.396	.585	.549	.373	.675	.408	.616	.393	.612	.413
Na	-	.668	.636	-	-	.653	-	.638	-	.600	-	.610
Jadeit in CPX	45.9	48.1				47.4		45.0		48.7		37.3
KD	12.9	30.9			27.8	20.6		27.6		14.8		13.0

Die hier untersuchten Granat-Klinopyroxen-Paare mit ihren KD-Werten und den Jadeit-Gehalten der Pyroxene sind in Tab. 1 zusammengefasst und in Fig. 9 dargestellt.

Die Kombination der aus Jadeit-Gehalten bestimmten Drucke (KUSHIRO 1969) mit den aus den KD-Werten bestimmten Temperaturen (RÅHEIM & GREEN, 1974) ergibt für die Zermatter-Proben das Bild einer Kristallisation von Granat und Omphazit unter zunehmenden Druck- und Temperaturbedingungen, was sich an zonierten Mineralien zeigen lässt, wo Kerne und Ränder koexistierender Minerale verglichen wurden. Die Eklogitbildung der untersuchten Proben fand, Gleichgewicht vorerst einmal angenommen, im P/T-Bereich von 10 kb/400°C bis zum Extrem von 18 kb/765°C statt. Für die Mehrheit der untersuchten Mineralpaare kann man jedoch 16 kb und 700°C als oberste Grenze, für die Eklogitbildung mit einem Mittelwert von 14 kb/600°C, annehmen (Fig. 9).

Berücksichtigt man bei der Temperaturbestimmung den Calciumgehalt des Granates (ELLIS & GREEN, 1979), so ergeben sich bei einem mittleren $X_{Ca}^{Gr} = .195$ Temperaturerhöhungen von 30°C. Die Granat-Klinopyroxen-Paare aus den

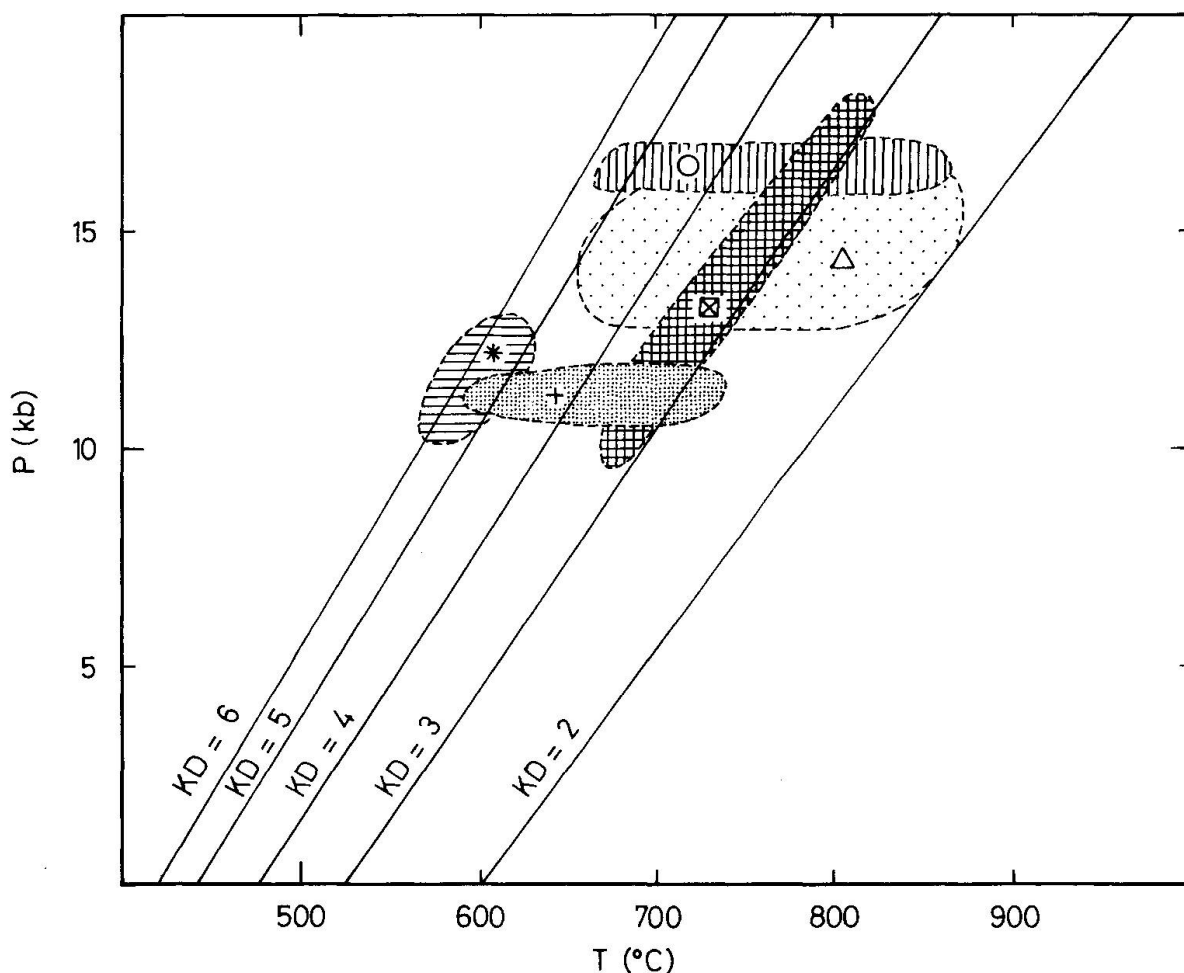


Figur 9 P-T-Diagramm für Granat-Klinopyroxen-Paare. Die Reaktionskurven für Jadeit + Quarz = Ab wurden für die entsprechenden Jadeit-Gehalte nach KUSHIRO (1969) eingezeichnet. Gestrichelte Linien: KD-Werte nach ELLIS und GREEN (1979).

Eklogitkernen der glaukophan-eklogitischen Pillowlaven deuten auf ähnlich hohe P-T-Bedingungen, wie sie von CHINNER & DIXON (1973) aus der umstrittenen Talk-Disthen-Paragenese abgeleitet wurden und wie sie KIENAST (1976) für Hochdruckparagenesen des Metagabbros von Etirai-Levaz (Valtournanche) bestimmte.

Im P-T-Diagramm (Fig. 9) zeigt sich ein relativ konsistentes Bild einer kontinuierlichen Druck- und Temperaturzunahme. Ein nicht koexistierendes Mineralpaar (PB 2069) deutet im selben Diagramm eine spätere Druck- und Temperatur(?)-abnahme an.

Verwendet man die mittels der Jadeit-Gehalte (KUSHIRO, 1969) ermittelten Drücke für das Granat-Phengit-Thermometer (KROGH und RÅHEIM, 1978), so ergibt sich (Fig. 10), dass die Temperaturen noch höher sind und über einen grösseren Bereich variieren. Temperaturen zwischen 600°C und 800°C (Fig. 10)



Figur 10 P-T-Diagramm für Granat-Phengit-Paare nach KROGH und RÅHEIM (1978). Die Druckbestimmungen wurden für die einzelnen Proben aus Figur 9 übernommen und entsprechen den aufgrund des Jadeit-Gehaltes der Klinopyroxene ermittelten Werten.

Tabelle 2 Mikrosondendaten für Granat-Phengit-Paare.

	PVB 878				PVB 891								
	Gr-K	Gr-R	Ph	Gr	Ph	Gr-K	Gr-R	Ph	Gr	Ph	Gr-K	Gr-R	Ph
SiO ₂	37.20	37.91	48.58	38.61	49.58	37.44	38.61	48.60	38.55	49.01	38.78	38.24	48.62
TiO ₂	-	-	.25	-	.20	.10	.20	.35	-	.32	-	-	-
Al ₂ O ₃	21.90	21.92	27.48	22.54	28.42	21.67	22.56	29.25	22.76	28.59	22.84	22.19	27.41
FeO	26.81	28.37	3.45	25.32	3.55	26.84	27.63	3.91	25.66	3.97	26.57	24.61	3.91
MnO	1.66	.80	-	.15	-	1.27	.80	.10	.68	-	.52	.73	-
MgO	4.50	5.11	3.23	6.34	2.59	3.74	5.41	2.66	5.79	2.42	5.55	5.69	2.92
CaO	7.18	6.71	-	6.46	.07	7.08	6.00	-	6.75	.07	6.89	8.27	-
Na ₂ O	-	-	.72	-	.42	-	-	.87	-	.64	-	-	.69
K ₂ O	-	-	9.61	-	9.78	-	-	9.24	-	9.87	-	-	9.96
Total	99.25	100.82	93.33	99.42	94.61	98.14	101.21	94.98	100.19	94.89	101.15	99.73	93.51
Si	2.943	2.949	3.326	2.994	3.341	2.995	2.976	3.270	2.980	3.308	2.978	2.975	3.336
Ti	-	-	.013	-	.010	.006	.012	.018	-	.016	-	-	-
Al	2.042	2.009	2.218	2.060	2.257	2.043	2.050	2.319	2.074	2.274	2.067	2.035	2.216
Fe···	.015	.042	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe··	1.759	1.803	.198	1.642	.200	1.795	1.781	.220	1.659	.224	1.707	1.601	.224
Mn	.111	.503	-	.010	-	.086	.052	.006	.045	-	.034	.048	-
Mg	.531	.592	.330	.733	.260	.446	.622	.267	.667	.243	.635	.660	.299
Ca	.609	.599	-	.573	.005	.607	.496	-	.559	.005	.567	.689	-
Na	-	-	.096	-	.055	-	-	.113	-	.084	-	-	.092
K	-	-	.839	-	.841	-	-	.793	-	.850	-	-	.872
KD	5.53	5.07		2.91		4.89	3.48		2.70		3.59	3.24	

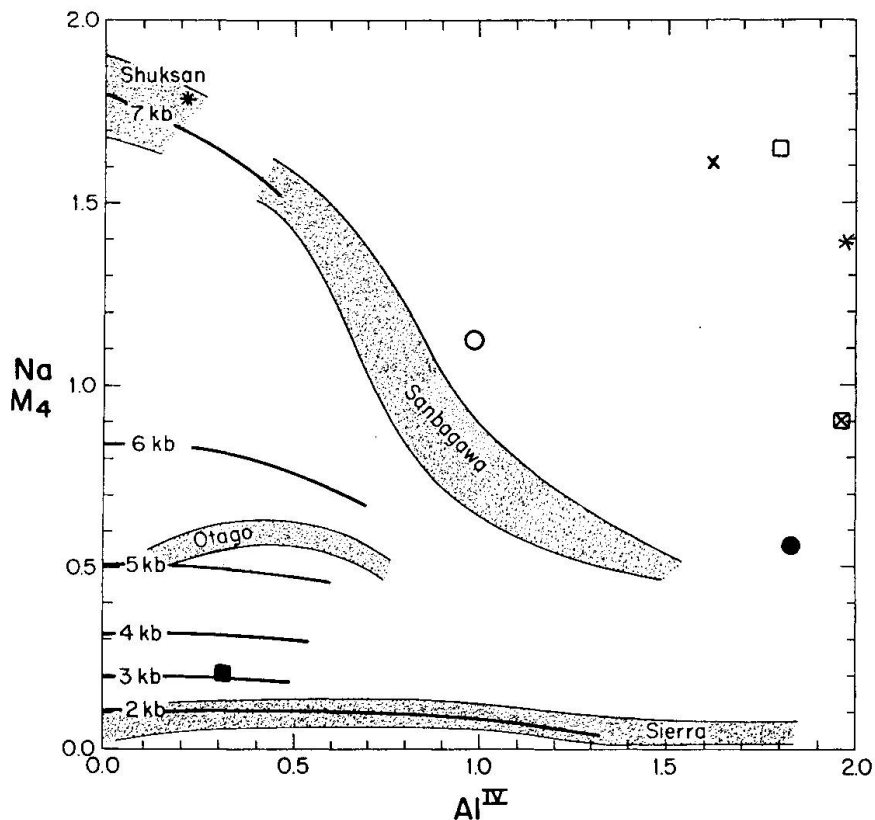
	PVB 891				PVB 892				PVB 1296			
	Gr-K	Gr-R	Ph	Gr-K	Gr-R	Ph	Gr	Ph	Gr	Ph	Gr	Ph
SiO ₂	37.79	38.33	49.70	38.66	38.64	48.81	38.51	47.81	38.28	50.20	38.55	47.02
TiO ₂	-	-	.42	-	-	.28	-	.35	-	.32	.13	.09
Al ₂ O ₃	22.26	22.66	28.12	23.05	23.09	29.33	22.62	27.98	22.69	28.74	21.46	28.16
FeO	27.52	27.11	3.52	27.57	26.49	3.82	26.11	4.96	28.03	3.63	22.94	3.06
MnO	.84	.60	.05	.31	.24	.05	.19	-	.38	.05	.40	-
MgO	4.09	5.45	2.66	6.08	6.45	2.50	6.42	2.78	5.04	2.94	7.70	3.34
CaO	7.03	7.04	-	6.13	6.13	.07	6.41	.55	6.38	-	6.72	.08
Na ₂ O	-	-	.57	-	-	.90	-	1.05	-	.94	-	1.07
K ₂ O	-	-	9.14	-	-	9.24	-	9.61	-	9.60	-	8.95
Total	99.53	101.19	93.92	101.80	101.20	95.00	100.26	95.09	100.81	96.42	97.90	91.77
Si	2.978	2.957	3.326	2.955	2.957	3.280	2.973	3.254	2.966	3.322	2.999	3.267
Ti	-	-	.022	-	-	.015	-	.018	-	.016	.008	.005
Al	2.067	2.060	2.239	2.076	2.082	2.323	2.058	2.244	2.072	2.244	1.968	2.306
Fe ⁺⁺⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	.018	-
Fe ⁺⁺	1.814	1.749	.184	1.762	1.695	.215	1.686	.282	1.817	.201	1.475	.178
Mn	.056	.039	.003	.020	.016	.003	.012	-	.025	.003	.026	-
Mg	.480	.627	.268	.693	.736	.251	.739	.282	.582	.290	.893	.346
Ca	.594	.582	-	.502	.503	.005	.530	.040	.530	-	.560	.006
Na	-	-	.075	-	-	.117	-	.139	-	.120	-	.144
K	-	-	.788	-	-	.792	-	.834	-	.811	-	.793
KD	5.51	4.06		2.97	2.69		2.28		4.50		3.20	

PB 1544				PB 1699									
	Gr	Ph	Gr	Ph	Gr	Ph	Gr	Ph	Gr	Ph	Gr-K	Gr-R	Ph
SiO ₂	38.17	49.79	38.17	48.79	39.17	48.84	38.74	48.40	38.80	47.96	37.33	37.73	48.62
TiO ₂	.09	.20	-	.13	-	.29	-	-	-	-	-	-	.17
Al ₂ O ₃	21.17	26.93	21.50	28.21	21.48	26.96	21.66	28.20	21.35	29.52	21.60	21.85	27.60
FeO*	28.26	3.76	26.36	3.49	25.76	3.59	25.06	4.32	26.01	4.23	29.97	29.02	3.94
MnO	.30	-	.59	-	.35	-	.59	-	.61	-	1.01	.91	-
MgO	4.33	3.04	5.54	2.89	5.59	3.05	6.20	2.60	5.69	2.22	3.33	3.48	2.64
CaO	7.42	.11	7.22	.10	7.61	-	7.53	-	7.28	.07	6.86	7.62	.16
Na ₂ O	-	.68	-	.95	-	.47	-	.81	-	1.02	-	-	.57
K ₂ O	-	9.62	-	10.39	-	9.29	-	9.40	-	9.37	-	-	9.18
Total	99.76	94.13	99.28	94.95	99.96	92.49	99.78	93.73	99.74	94.39	100.10	100.02	92.88
Si	3.007	3.379	2.996	3.302	3.034	3.364	3.003	3.308	3.020	3.257	2.957	2.989	3.341
Ti	.005	.010	-	.007	-	.015	-	-	-	-	-	-	.009
Al	1.965	2.154	1.989	2.250	1.961	2.189	1.979	2.272	1.959	2.362	2.016	1.985	2.235
Fe***	.011	-	.019	-	-	-	.015	-	.001	-	.027	.026	-
Fe**	1.851	.213	1.705	.198	1.669	.207	1.609	.247	1.692	.240	1.958	1.897	.226
Mn	.020	-	.039	-	.023	-	.039	-	.040	-	.068	.061	-
Mg	.511	.308	.648	.292	.645	.313	.716	.265	.660	.225	.393	.411	.270
Ca	.626	.008	.608	.007	.632	-	.625	-	.607	.005	.582	.647	.012
Na	-	.089	-	.125	-	.067	-	.107	-	.134	-	-	.076
K	-	.833	-	.897	-	.816	-	.820	-	.812	-	-	.805
KD	5.20		3.90		3.90		2.40		2.40		5.95	5.50	

müssten vor allem in der assoziierten Metapeliten Staurolith anstelle des beobachteten Chloritoides produziert haben.

Zusammen mit den mikroskopischen Beobachtungen lässt dies den Schluss zu, dass Phengit kein Relikt der Hochdruckmetamorphose sein kann, sondern ebenso wie die selten auftretenden Biotite als Entmischungsprodukt bei niedrigeren Drucken, nach der kretazischen Phase, aus einem älteren Glimmer(?) entstanden ist.

Wie bereits erwähnt sind die untersuchten Proben noch grünschieferfaziell überprägt. In den Gesteinen tritt neben Granat, Hellglimmer und Omphazit meist auch Albit, Chlorit, Epidot, Glaukophan und Ca-Amphibol auf. Zusammen mit den Eisenoxiden ist dies die Paragenese, bei welcher nach BROWN (1977) der Crossit-Gehalt im Ca-Amphibol druckabhängig ist. Die an den Zermatterproben bestimmten Na-Gehalte auf der M4-Position der Ca-Amphibole zeigen eine mehr oder weniger kontinuierliche Druckabnahme von sehr hohen Drucken (über 10 kb) bis etwa 3 kb (Fig. 11).



Figur 11 Variationsdiagramm von Na in der M4-Position gegen vierfach koordiniertes Al als Druckindikator für den Crossitgehalt von Ca-Amphibolen (BROWN, 1977).

Diskussion der Daten

Aus den vorliegenden Daten lässt sich, zusammen mit den Feldbeobachtungen, eine recht konsistente Metamorphosegeschichte rekonstruieren. Im einzelnen aber ist bei derart vielphasig metamorphen, chemisch relativ heterogenen Gesteinsproben Vorsicht bei der Interpretation der Daten am Platz. Vor allem Glimmerminerale zeigen keine Gleichgewichtstexturen und Reste von Phengit können, wie die Daten zeigen, nicht als Relikte einer älteren Metamorphosephase interpretiert werden. Ähnliches gilt auch für die Pyroxene, welche sehr oft Reaktionsränder zeigen, aber auch völlig umgewandelt sein können. Sie bilden nur selten Gleichgewichtszustände ab. Eine gewisse Wahrscheinlichkeit für die Erhaltung eines Gleichgewichts geben die im Granat auftretenden Pyroxeneinschlüsse. Doch finden sich auch hier solche auf feinen Adern, welche teilweise oder ganz umgewandelt wurden. Anhand der Granat-Omphazit-Paare lässt sich der Weg der Hochdruckmetamorphose aufzeichnen, weil mittels des Jadeit-Gehaltes der Pyroxene eine Druckabschätzung möglich ist. Doch ergeben sich gerade aus diesen Daten recht extreme P-T-Bedingungen für die untersuchten Eklogitrelikte, welche in den umliegenden Gesteinen kaum mehr erhalten sein dürften. Für Granat-Phengit-Paare muss eine unabhängige Druckbestimmung vorliegen – im hier gezeigten Falle wiederum aus dem Jadeit-Gehalt der Pyroxene. Diese Drucke variieren von 10 bis 17 kb innerhalb einer einzelnen Probe und eignen sich schlecht als Grundlage für das Granat-Phengit-Thermometer. In Proben mit weniger Streuung im Druckbereich (z.B.: PB 1544 mit 16.5 ± 0.5 kb) erkennt man eine weite Streuung der Temperaturen von 670°C bis 860°C, was wiederum darauf schliessen lässt, dass Granat und Phengit kein Gleichgewicht abbilden.

Verdankungen

An erster Stelle möchte ich Herrn Professor P. Bearth für die anregenden gemeinsamen Feldbegehungen in Zermatt danken. Ihm, Herrn Prof. M. Frey und Herrn PD J. Hunziker danke ich für die kritische Durchsicht des Manuskriptes. Für die Herstellung der Sondenpräparate aus den extrem kleinen Handstückbruchstücken sei Herrn J. Mergert ein Lob ausgesprochen.

Literaturverzeichnis

SMPM = Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.

- BANNO, S. (1959): Aegirinaugites from crystalline schists in Sikoku; Jour. Geol. Soc. Japan 65/770, 652-657.
- BEARTH, P. (1967): Die Ophiolithe der Zone von Zermatt-Saas Fee; Beitr. Geol. Karte CH, NF 132.
- BEARTH, P. (1973): Gesteins- und Mineralparagenesen aus den Ophiolithen von Zermatt; SMPM 53, 299-334.
- BEARTH, P. (1974): Zur Gliederung und Metamorphose der Ophiolithe der Westalpen; SMPM 54, 385-397.
- BEARTH, P. & STERN, W. (1971): Zum Chemismus der Eklogite und Glaukophanite von Zermatt; SMPM 51, 349-359.
- BROWN, E.H., (1977): The Crossite Content of Ca-Amphibole as a guide to pressure of Metamorphism; J. Petrol. 18, 53-72.
- CHINNER, G.A. & DIXON, J.E. (1973): Some high-pressure paragenesis of the Allalin-Gabbro, Valais, Switzerland; J. Petrol. 14, 185-202.
- COLEMAN, R.G., LEE, D.E., BEATTY, L.E. and BRANNOCK, W.W. (1965): Eclogites and eclogites: their differences and similarities, Geol. Soc. Amer. Bull. 76, 483-508.
- ELLIS, D.J. & D.H. GREEN (1979): An experimental study of the effect of Ca upon Garnet Clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria; Contr. Mineral. Petrol. 71, 13-22.
- ERNST, W.G. (1979): Coexisting sodic and calcic amphiboles from high-pressure metamorphic belts and the stability of barroisitic amphibole; Min. Mag. 43, 269-278.
- ERNST, W.G. & DAL PIAZ, G.V. (1978): Mineral paragenesis of eclogitic rocks and related mafic schists of the Piemonte ophiolite nappe, Breuil-St. Jacques area, Italian Western Alps; Am. Miner. 63, 621-640.
- KIENAST, J.R. (1976): Etude de paragenèses magmatiques relics et métamorphiques d'un gabbro lié à la série ophiolitique inférieure du Val d'Aoste, Alpes italiennes (abstr.); Réunion ann. Sci. terre, Paris 241.
- KROGH, E.J. & RÅHEIM, A. (1978): Temperature and pressure dependence of Fe-Mg partitioning between Garnet and Phengite, with particular reference to Eclogites; Contr. Min. Petrol. 66, 75-80.
- KUSHIRO, I. (1969): Clinopyroxen solid solutions formed by reactions between Diopside and Plagioclase at high pressure; Mineral. Soc. Amer. Spec. Pap. 2, 179-191.
- MIYASHIRO (1957): The Chemistry, optics and genesis of the Alkali Amphiboles; J. Fac. Sci. Univ. Tokyo, II/11, 57-88.
- RÅHEIM, A. & GREEN, D.W. (1974): Experimental determination of the temperature and pressure dependence of the Fe-Mg partitioning coefficient for coexisting Garnet and Clinopyroxene; Contr. Min. Petrol. 48, 179-203.
- RYBURN, R.S., RÅHEIM, A. & GREEN, D.H. (1975): Determination of the P, T path of natural eclogites during metamorphism - record of subduction; Lithos 9, 161-164.
- SCHWANDER, H. & F. GLOOR (1980): Zur quantitativen Mikrosondenanalyse von geologischen Proben mittels kombiniertem EDS-WDS; X-Ray Spectrometry 9/3, 134-137.

Manuskript eingegangen 19. Dezember 1980