



UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG

COPYRIGHT AND CITATION CONSIDERATIONS FOR THIS THESIS/ DISSERTATION



- Attribution — You must give appropriate credit, provide a link to the license, and indicate if changes were made. You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use.
- NonCommercial — You may not use the material for commercial purposes.
- ShareAlike — If you remix, transform, or build upon the material, you must distribute your contributions under the same license as the original.

How to cite this thesis

Surname, Initial(s). (2012) Title of the thesis or dissertation. PhD. (Chemistry)/ M.Sc. (Physics)/ M.A. (Philosophy)/M.Com. (Finance) etc. [Unpublished]: [University of Johannesburg](https://ujdigispace.uj.ac.za). Retrieved from: <https://ujdigispace.uj.ac.za> (Accessed: Date).

AG10
Reen

285

**METAMORFE STUDIES VAN
GRANOLIETE EN VERWANTE
HOË-GRAADSE GESTEENTES
IN DIE SUIDELIKE GRENSSONE
VAN DIE
LIMPOPO-METAMORFEKOMPLEKS
IN
SUID-AFRIKA**

deur

Dirk-Daniël van ²⁰Reenen



PROEFSKRIF



voorgelê ter vervulling van die vereistes vir die graad
DOKTOR IN DIE NATUURWETENSKAPPE

in

GEOLOGIE

in die

FAKULTEIT NATUURWETENSKAPPE

aan die

RANDSE AFRIKAANSE UNIVERSITEIT

Promotor : DR. C. Roering

JOHANNESBURG

NOVEMBER

1978

Title:

METAMORPHIC STUDIES OF GRANULITES AND RELATED HIGH-GRADE ROCKS IN THE SOUTHERN MARGINAL ZONE OF THE LIMPOPO METAMORPHIC COMPLEX IN SOUTH AFRICA

by

Dirk Daniël van Reenen

Promoter: Dr C. RoeringDegree: Doctor PhilosophiaeDepartment: Geology : Rand Afrikaans UniversityLanguage Medium of Thesis: AfrikaansSummary ✕

The Limpopo Metamorphic Complex covers an area of approximately 10 000 km² south of the Soutpansberg. The complex consists of intensely metamorphosed pelitic, mafic and ultramafic gneisses of the Bandelierkop Formation which exist as highly deformed relicts in the grey tonalitic granite-gneisses of the Baviaanskloof gneiss and represents equivalents of typical granite-greenstone material.

The area is divided into two high-grade metamorphic zones distinguished by the presence of either orthoamphibole and kyanite, or cordierite and hypersthene in pelitic gneisses. The regular distribution of the orthoamphibole zone in the southern part and the orthopyroxene zone in the northern part of the area is illustrated by the presence of a well-defined orthopyroxene reaction isograd which cuts across the structural grain of the different lithologic units. The southern limit of the orthoamphibole zone is a less well established isograd defining the first appearance of orthoamphibole. The mafic gneiss of the Bandelierkop Formation is distinguished by amphibolites in the orthoamphibole zone and hypersthene-augite granulites in the orthopyroxene zone.

Petrographic studies supplemented by 110 mineral analyses and 50 rock analyses of the Pelitic gneiss define a systematic progression of (one prograde) and (two retrograde episodes of high-grade isochemical metamorphism).

The initial granulite event ($P > 8,5$ kb; $T \pm 800^{\circ}\text{C}$) resulted in the stable co-existence of garnet + hypersthene + biotite as portrayed by cordierite free garnet granulites with $X_{\text{Mg}} < 0,59$.

The following granulite episode resulted in cordierite and second generation hypersthene coronas replacing garnet in cordierite-garnet- $(X_{\text{Mg}} 0,59-0,70)$ and garnet free $(X_{\text{Mg}} > 0,70)$ cordierite granulites. The general tendency towards widespread chemical equilibrium under constant temperature conditions ($780-820^{\circ}\text{C}$) during the development of the coronas from the sliding reaction, $\text{garnet} + \text{quartz} \rightleftharpoons \text{cordierite} + \text{hypersthene}$, is illustrated by uniform distribution values of Fe and Mg between co-existing cordierite, garnet and hypersthene in an area of at least 4 500 km². Furthermore the

Title:

METAMORPHIC STUDIES OF GRANULITES AND RELATED HIGH-GRADE ROCKS IN THE SOUTHERN MARGINAL ZONE OF THE LIMPOPO METAMORPHIC COMPLEX IN SOUTH AFRICA

by

Dirk Daniël van Reenen

Promoter: Dr C. RoeringDegree: Doctor PhilosophiaeDepartment: Geology : Rand Afrikaans UniversityLanguage Medium of Thesis: AfrikaansSummary

The Limpopo Metamorphic Complex covers an area of approximately 10 000 km² south of the Soutpansberg. The complex consists of intensely metamorphosed pelitic, mafic and ultramafic gneisses of the Bandelierkop Formation which exist as highly deformed relicts in the grey tonalitic granite-gneisses of the Baviaanskloof gneiss and represents equivalents of typical granite-greenstone material.

The area is divided into two high-grade metamorphic zones distinguished by the presence of either orthoamphibole and kyanite, or cordierite and hypersthene in pelitic gneisses. The regular distribution of the orthoamphibole zone in the southern part and the orthopyroxene zone in the northern part of the area is illustrated by the presence of a well-defined orthopyroxene reaction isograd which cuts across the structural grain of the different lithologic units. The southern limit of the orthoamphibole zone is a less well established isograd defining the first appearance of orthoamphibole. The mafic gneiss of the Bandelierkop Formation is distinguished by amphibolites in the orthoamphibole zone and hypersthene-augite granulites in the orthopyroxene zone.

Petrographic studies supplemented by 110 mineral analyses and 50 rock analyses of the Pelitic gneiss define a systematic progression of (one prograde) and (two retrograde episodes of high-grade isochemical metamorphism).

The initial granulite event ($P > 8,5$ kb; $T \pm 800^{\circ}\text{C}$) resulted in the stable co-existence of garnet + hypersthene + biotite as portrayed by cordierite free garnet granulites with $X_{\text{Mg}} < 0,59$.

The following granulite episode resulted in cordierite and second generation hypersthene coronas replacing garnet in cordierite-garnet- $(X_{\text{Mg}} 0,59-0,70)$ and garnet free $(X_{\text{Mg}} > 0,70)$ cordierite granulites. The general tendency towards widespread chemical equilibrium under constant temperature conditions ($780-820^{\circ}\text{C}$) during the development of the coronas from the sliding reaction, garnet + quartz \rightleftharpoons cordierite + hypersthene, is illustrated by uniform distribution values of Fe and Mg between co-existing cordierite, garnet and hypersthene in an area of at least 4 500 km². Furthermore the

systematic iron enrichment of the cordierite-garnet-hypersthene subtriangles in an AFM diagram is a good indication that equilibrium was attained under conditions of decreasing pressure (8,6-7,5 kb). ^{The} sliding reaction began at a higher pressure in the garnet free granulites and was completed at a stage when cordierite + garnet still co-existed in the cordierite-garnet rocks at lower pressures. The second metamorphic event is therefore, related to a period of uplift.

The last metamorphic event is revealed by the hydration of hypersthene and cordierite and defines the position of the present orthopyroxene reaction isograd. These reactions give rise to the stable co-existence of anthophyllite + gedrite + kyanite in the lower-grade equivalents of the cordierite-rich granulites in the orthoamphibole zone. It must be emphasised that this is a superimposed retrograde event in which hypersthene disappears as a result of hydration, thus diminishing the extent of the previous orthopyroxene zone.

A theoretical PT-diagram, based on the actual composition of co-existing cordierite + hypersthene + anthophyllite + gedrite + kyanite, is proposed for the CaO- and K₂O-poor pelitic rocks in part of the system MgO-FeO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O and clearly defines a bivariant PT-interval in which anthophyllite, gedrite and kyanite can co-exist. The initial development of these minerals along the isograd is determined by a decrease in temperature (> 730°C) at constant total pressure (+ 8 kb). The final disappearance of cordierite + hypersthene with transition to the orthoamphibole zone is however also a function of increasing P_{H₂O}. Fluid

This investigation indicates that the transition from the "Limpopo Mobile Belt" to the Kaapvaal Craton can essentially be accounted for by well defined metamorphic isograds. The southern margin bears no relationship to regional shear zones as proposed by previous workers, and it is shown that shear deformation clearly post-dates the last period of metamorphism which ended approximately 2 600 m.y. ago. (Wain)

<u>AFDELING I</u>	INLEIDING	1
1.	LIGGING VAN GEBIED	3
2.	VORIGE GEOLOGIESE WERK	4
3.	HUIDIGE ONDERSOEK	5
4.	BEDANKINGS	8
<u>AFDELING II</u>	ALGEMENE GEOLOGIE EN REGIONALE STRUKTUUR	10
1.	ALGEMEEN	11
2.	GEOLOGIE	11
2.1	Die Baviaanskloofgneis	13
2.2	Die Bandelierkop-Formasie	14
2.2.1	Die Pelitiese gneis	15
2.2.2	Die Mafiese gneis	18
2.2.3	Die Ultramafiese gneis	20
2.2.4	Kwartsitiese gesteentes	23
2.3	Die Leukokratiese graniet	24
2.4	Jonger plutone	27
3.	REGIONALE STRUKTUUR	28
3.1	Algemeen	28
3.2	Verskillende plooiperiodes	28
3.3	Verwantskap tussen anatektiese gebeurtenisse en verskillende plooiperiodes	29
3.4	Regionale skeu ^u fskeursones	32
3.5	Ouderdom	33

<u>AFDELING III</u>	METODES EN TERMINOLOGIE WAT IN DIE METAMORFE ONDERSOEK GEBRUIK IS	34
1.	MONSTERVERSAMELING	35
1.1	Regionale versameling van monsters	35
1.2	Die detail ondersoek van spesifieke lokaliteite	37
2.	LABORATORIUMONDERSOEK	38
2.1	Petrografie	38
2.2	Totale chemiese analises	40
2.3	Mikrosonde-analises	40
2.4	Terminologie en afkortings	41
<u>AFDELING IV</u>	PETROGRAFIESE ONDERSOEK VAN DIE PROSES VAN METAMORFOSE AAN DIE HAND VAN DIE PELITIESE EN MAFIESE GNEIS VAN DIE BANDELIERKOP-FORMASIE	45
1.	DIE PELITIESE GNEIS	46
1.1	Algemene petrografiese eienskappe van die Pelitiese gneis in die verskillende metamorfe sones	46
1.1.1	Die Ortopirokseensone	46
1.1.1.1	Kordiëriet-granaatgranoliete	49
1.1.1.2	Granaatvrye kordiërietgranoliete	57
1.1.1.3	Kordiërietvrye granaatgranoliete	58
1.1.1.4	Hipersteen-biotietgranoliete	59
1.1.2	Die Ortopirokseenreaksie-isograad	60
1.1.3	Die Ortoamfiboolsone	63
1.1.3.1	Die Ortoamfiboolgneis	64

1.1.3.2	Die granaat-biotietgneis	69
1.1.3.3	Die granaat-kordiëriet-sillimanietgneis	70
1.2	Petrografiese beskrywing van petrogenetiese belangrike mineraalversamelings en reaksieverwantskappe in die Pelitiese gneis	71
1.2.1	Mineraalversamelings en reaksieverwantskappe in die Ortopirokseensone	75
1.2.1.1	Die assosiasie van granaat, hipersteen en kordiëriet in koronateksture	77
a.	<u>Teksturele kenmerke van die reaksiekoronas</u>	77
b.	<u>Petrogenetiese betekenis van die reaksiekoronas</u>	79
1.2.1.2	Die assosiasie kordiëriet+biotiet+kianiet+K-veldspaat	83
a.	<u>Probleme gekoppel aan die interpretasie van die vergroeiingstekstuur tussen biotiet en kianiet</u>	84
1.2.1.3	Die assosiasie kordiëriet+spinel	87
1.2.1.4	Vervanging van granaat en plagioklaas deur 'n simplektitiese vergroeiing van kordiëriet en kwarts	89
1.2.1.5	Die hidrasie van kordiëriet	89
1.2.1.6	Samevatting van reaksieverwantskappe in die Ortopirokseensone	91
1.2.2	Mineraalversamelings en reaksieverwantskappe langs die Ortopirokseenreaksie-isograad	92
1.2.2.1	Die hidrasie van kordiëriet	92
1.2.2.2	Die hidrasie van hipersteen	93
1.2.2.3	Interpretasie van die hidrasiereaksies	96

1.2.3	Mineraalversamelings en reaksieverwantskappe in die Ortoamfiboolsone	97
2.	DIE MAFIESE GNEIS	100
2.1	Die Hipersteen-ougietgranoliet	100
2.2	Die Amfiboliete	106
2.3	Ewewigsaspekte van samebestaande minerale in die Mafiese gneis	108
2.4	Die metamorfe status van hornblende, en die ont- wikkeling van hipersteen en ougiet in die Ortopi- rokseensone	110
3.	SAMEVATTING VAN DIE HOOPFUNTE VAN DIE PETROGRAFIESE ONDERSOEK VAN METAMORFOSE	113
<u>AFDELING V</u>	CHEMIESE SAMESTELLING VAN HOOF-GESTEENTE- TIPES VAN DIE BANDELIERKOP-FORMASIE	118
1.	DIE PELITIESE GNEIS	120
2.	DIE MAFIESE GNEIS	129
3.	OORSPRONKLIKE KARAKTER VAN DIE PELITIESE, MAFIESE EN ULTRAMAFIESE GNEIS VAN DIE BANDELIERKOP-FORMASIE	133
<u>AFDELING VI</u>	SISTEMATIESE CHEMIESE MINERALOGIE	138
1.	DIE PELITIESE GNEIS	140
1.1	Kordiëriet	140
1.1.1	Chemiese formule	142
1.1.2	Die samestelling van kordiëriet in verskil- lende mineraalassosiasies	144
1.1.3	Sonering van kordiëriet	146
1.2	Granaat	150

1.2.1	Chemiese formule	150
1.2.2	Variasie in die samestelling van granaat in individuele monsters	156
1.2.3	Sonering van granaat	157
1.2.3.1	Bespreking	160
1.2.4	Verwantskap tussen die samestelling van granaat en die graad van metamorfose	165
1.3	Hipersteen	167
1.3.1	Chemiese samestelling	168
1.3.2	Die Al_2O_3 -inhoud van hipersteen	169
1.4	Biotiet	175
1.4.1	Chemiese formule van biotiet	175
1.4.2	Substitusie van Ti^{+4} in biotiet	179
1.4.3	Variasie in die samestelling van biotiet	182
1.4.3.1	X Mg (biot) as 'n funksie van X Mg (gest) en geassosieerde minerale	182
1.4.3.2	Die TiO_2 -inhoud van biotiet as 'n funksie van X Mg (biot)	185
1.4.3.3	Die samestelling van biotiet as 'n funksie van die graad van metamorfose	186
1.4.4	Bespreking	190
1.5	Antofilliet en gedriet	192
1.5.1	Chemiese klassifikasie van ortorombiese amfibool	197
1.5.2	Strukturformule van antofilliet en gedriet	198
1.5.3	Die antofilliet-gedrietreeks	200
1.5.4	Ontmengingslamelle in ortoamfibool	202
1.5.5	Die antofilliet-gedrietsolvus	204
1.5.6	Samebestaande ortoamfibole in die Pelitiese gneis van die Ortoamfiboolsone	206

1.5.6.1	Petrografiese aspekte van samebestaande ortoamfibole	207
1.5.6.2	Chemiese aspekte van samebestaande ortoamfibole	209
1.5.6.3	Bespreking	211
1.6	Aluminiumsilikate	213
1.7	Spinel	215
1.8	Veldspaat	216
2.	DIE MAFIESE GNEIS	219
2.1	Hornblende	219
2.1.1	Chemiese samestelling en nomenklatuur	219
2.1.2	Gekoppelde substitusies in hornblende	224
2.1.3	Die samestelling van hornblende as 'n funksie van die graad van metamorfose	227
2.1.3.1	Die Al_2O_3 - en SiO_2 -inhoud van hornblende	227
2.1.3.2	Substitusie van alkalies in die A-struktuurposisie van hornblende	229
2.1.3.3	Variasie in die TiO_2 -inhoud van hornblende	230
2.1.4	Bespreking	233
2.2	Piroksene	234
2.2.1	Chemiese samestelling	234
2.2.1.1	Klinopirokseen	234
2.2.1.2	Ortopirokseen	237
2.2.2	Die Al_2O_3 -inhoud van samebestaande piroksene as 'n funksie van die graad van metamorfose	238
2.3	Plagioklaas	242

<u>AFDELING VII</u>	CHEMIESE ONDERSOEK VAN DIE EWEWIGSVER- WANTSKAPPE VAN INDIVIDUELE MINERAALPARE	244
1.	ALGEMEEN	245
1.1	Inligting ten gunste van afwykings vanaf chemiese ewewig	246
1.2	Inligting ten gunste van chemiese ewewig	247
2.	DIE ELEMENTVERDELINGSTEDIE	248
2.1	Die verdeling van MgO en FeO tussen samebestaande kordiëriet+granaat+hipersteen+biotiet+ortoamfi-bool in die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie	251
2.1.1	Verdeling van MgO en FeO tussen samebestaande kordiëriet, granaat en hipersteen in die Pelitiese gneis van die Ortopirokseensone	252
2.1.1.1	Kordiëriet-granaat	252
	a. <u>Bespreking</u>	255
2.1.1.2	Kordiëriet-hipersteen	257
	a. <u>Bespreking</u>	259
2.1.1.3	Hipersteen-granaat	261
	a. <u>Bespreking</u>	262
2.1.1.4	Interpretasie van verdelingsgegewens vir samebestaande kordiëriet, granaat en hipersteen uit die Ortopirokseensone	262
2.1.2	Verdeling van MgO en FeO tussen biotiet, kordiëriet, hipersteen en granaat in die	264

Pelitiese gneis van beide die Ortopirokseen- en Ortoamfiboolsones	264
2.1.2.1 Biotiet-kordiëriet	264
2.1.2.2 Hipersteen-biotiet	267
2.1.2.3 Biotiet-granaat	269
a. <u>Invloed van Ca^{+2} en Mn^{+2} in granaat op Kd (biot-gran)</u>	273
b. <u>Kd $MgO-FeO$ (biot-gran) as 'n funksie van die TiO_2-inhoud in biotiet</u>	276
2.1.3 Verdeling van MgO en FeO tussen ortoamfibool, granaat en biotiet in die Pelitiese gneis van die Ortopirokseenisograad en uit die Ortoamfiboolsones	282
2.1.3.1 Antofilliet-gedriet	282
2.1.3.2 Ortoamfibool-biotiet en Ortoamfibool- granaat	284
2.2 Verdeling van MgO en FeO tussen hipersteen, ougiet en hornblende in die Mafiese gneis van die Orto- pirokseensone	287
2.2.1 Hipersteen-ougiet	287
2.2.2 Hipersteen-hornblende en ougiet-hornblende	289
2.2.2.1 Faktore wat Kd (Pirok-Hbl) moontlik kan beïnvloed	292
a. <u>Invloed van Al^{iv} en Ti^{vi} op die $MgO/$ FeO-verhouding van hornblende</u>	292
b. <u>Reaksie-verwantskappe tussen hornblende, ortopirokseen en klinopirokseen</u>	293
c. <u>Die samestelling van hornblende as 'n funksie van die samestelling van die moedergesteente</u>	297

d.	<u>Die onderlinge invloed van Al^{iv} in hornblende op die verdeling van MgO en FeO tussen ortopirokseen-hornblende en klinopirokseen-hornblende</u>	299
2.2.2.2	Bespreking	301
3.	EWEWIGSMODEL VIR HOË-GRAADSE METAMORFOSE IN DIE SUIDELIKE GRENSSONE VAN DIE LIMPOPO-METAMORFE-KOMPLEKS	303
3.1	Petrografiese inligting	304
3.2	Enkelmineraal-chemiese inligting	305
3.3	Voorgestelde ewewigsmodel	307
3.3.1	Model vir lokale (mosaïek) ewewig	307
3.3.2	Model vir retrograadewewig en wydverspreide ewewig	309
<u>AFDELING VIII</u>	FASE-PETROLOGIE VAN DIE PELITIESE GNEIS VAN DIE BANDELIERKOP-FORMASIE	311
1.	INLEIDING	312
1.1	Algemeen	312
1.2	Aspekte van die totale chemiese samestelling van die Pelitiese gneis	314
1.3	Konstruksie van die AFM-diagram	317
1.3.1	Die toepassing van die fasereël	317
1.3.1.1	Verwantskap tussen die fasereël en metamorfe diagramme	319
1.3.2	Identifikasie van ewewigsversamelings	322
1.3.3	Die keuse van komponente	322

2. GRAFIESE ONDERSOEK VAN FASEVERWANTSKAPPE IN DIE GRANAATGRANOLIET VAN DIE ORTOPIROKSEENSONE	326
2.1 Algemeen	326
2.2 Algemene faseverwantskappe	328
2.2.1 Die kordiërietvrye granaatgranoliete	328
2.2.2 Die kordiëriet-granaatgranoliete	329
2.2.2.1 Granaat-kordiëriet-hipersteen	330
2.2.2.2 Granaat-kordiëriet-biotiet	334
2.2.2.3 Granaat-hipersteen-biotiet	335
2.2.2.4 Kordiëriet-hipersteen-biotiet	336
2.2.3 Die granaatvrye kordiërietgranoliete	337
2.3 Bespreking van faseverwantskappe in die Ortopirokseensone	339
2.3.1 Algemeen	339
2.3.2 Invloed van totale chemie op die stabiliteitsverwantskappe van kordiëriet, granaat en hipersteen in die kordiëriet-granaatgranoliet	341
2.3.2.1 Die $Al_2O_3/MgO+FeO$ (mol %)-verhouding van die totale gesteente	342
2.3.2.2 Die $MgO/MgO+FeO$ (mol %)-verhouding van die totale gesteente	345
2.3.2.3 Bespreking	345
2.3.3 Die stabiliteit van biotiet in die granaatgranoliet	350
2.3.4 Die beweging van 3-fasevelde in die AFM-diagramme vir die kordiëriet-granaatgranoliet	354
2.3.4.1 Rigting van beweging	355
2.3.4.2 Rede vir verplasing van sub-driehoeke in die AFM-diagramme van figure 66a-f	356

a.	<u>Temperatuur as 'n moontlike eksterne veranderlike</u>	357
b.	<u>Die rol van druk as 'n eksterne veranderlike</u>	360
c.	<u>Die rol van H₂O as 'n eksterne veranderlike</u>	362
d.	<u>Die mobiele of inerte status van H₂O in die granaatgranoliet</u>	364
e.	<u>Bespreking</u>	368
2.4	Grafiese rekonstruksie van opeenvolgende mineraalversamelings en reaksieverwantskappe in die Ortopirokseensone	369
2.4.1	Fasetopologie tydens 'n vroeë stadium in die ontwikkeling van die kordiëriet-granaatgranoliete	370
2.4.2	Die oorgang van stadium 1 na stadium 2	371
2.4.3	Die oorgang van stadium 2 na stadium 3	373
2.4.4	Die oorgang van stadium 3 na stadium 4	374
2.4.5	Bespreking	376
3.	FASEVERWANTSKAPPE IN DIE ORTOAMFIBOOLGNEIS VAN DIE ORTOAMFIBOOLSONE	377
3.1	Algemene faseverwantskappe van ortoamfibool	379
3.2	Die stabiliteitsverwantskappe van granaat in die Ortoamfiboolgneis	383
3.2.1	Petrografiese inligting	383
3.2.2	Chemiese inligting	384
3.3	Stabiliteitsverwantskappe van antofilliet, gedriet en kianiet	386
3.4	Volledige fasetopologie vir die CaO- en K ₂ O-arme Ortoamfiboolgneisse van die Ortoamfiboolsone	387
3.5	Verplasing van die gedriet-antofilliet-kianiet 3-faseveld met oorgang vanaf die Ortopirokseenisograad na die Ortoamfiboolsone	389

<u>AFDELING IX</u>	CHEMIESE ONDERSOEK VAN KRITIESE METAMORFE REAKSIES IN DIE PELITIESE GNEIS VAN DIE BANDELIERKOP-FORMASIE	391
1.	INLEIDING	392
2.	DIE M ₂ -ORTOPIROKSEENSONE	392
2.1	Die reaksie granaat+kwarts \rightleftharpoons kordiëriet+ hipersteen	392
3.	DIE ORTOPIROKSEENREAKSIE-ISOGRAAD	399
3.1	Die reaksie kordiëriet+water \rightleftharpoons gedriet+ kianiet+kwarts	399
3.2	Die reaksie Hipersteen+water \rightleftharpoons antofilliet	404
<u>AFDELING X</u>	FISIESE TOESTANDE VAN METAMORFOSE IN DIE SUIDELIKE GRENSSONE VAN DIE LIMPOPO- METAMORFEKOMPLEKS	406
1.	INLEIDING	407
2.	DIE M ₂ -ORTOPIROKSEENSONE	408
2.1	Die Granaatgranoliete	408
2.1.1	Kordiëriet-granaat	408
2.1.2	Granaat-hipersteen	414
2.1.3	Bespreking van die berekende PT-toestande aan die hand van onafhanklike eksperimentele en veldinligting	418
2.2	Die Mafiese granoliet	424
2.3	Opsomming van PT-toestande in die M ₂ -Ortopirokseen- sone	430

3.	DIE M_3 -ORTOAMFIBOOLSONE	431
3.1	Geometriese analise van faseverwantskappe in die kordiëriet-granaatgranoliete langs die M_3 -Ortopirokseenreaksie-isograad	432
3.1.1	Die sisteem $MgO-FeO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$	433
3.1.2	Chemografiese verwantskappe	434
3.1.3	Konstruksie van een-veranderlike lyne	436
3.1.4	Konstruksie van die PT-diagram	438
3.2	Bespreking van die metamorfe toestande tydens die oorgang van M_2 na M_3 met verwysing na die teoretiese PT-diagram van figuur 80	441
3.2.1	Veld- en chemiese inligting	442
3.2.2	Eksperimentele inligting	444
3.3	Samevatting van die stabiliteitsverwantskappe van kritiese mineraalversamelings tydens die derde periode van metamorfose	448
3.3.1	Die versameling kordiëriet+hipersteen+antofilliet+gedriet+kianiet+kwarts	448
3.3.2	Die versameling antofilliet+gedriet+kianiet+kwarts	451
<u>AFDELING XI</u>	SAMEVATTENDE MODEL VIR DIE TEKTONO-METAMORFE GESKIEDENIS VAN DIE LIMPOPO-METAMORFEKOMPLEKS SUID VAN DIE SOUTPANSBERGE	452
2.	ASPEKTE VAN DIE METAMORFE ONTWIKKELING VAN DIE LIMPOPO-METAMORFEKOMPLEKS SUID VAN DIE SOUTPANSBERGE	453
2.1	Regionale verspreiding van metamorfe sones	453
2.2	Opeenvolgende periodes van metamorfose	454

2.2.1	Metamorfe reaksies in die Ortopirokseensone	455
2.2.1.1	Ewewigsaspekte en ooreenstemmende PT-toestand tydens M_2	456
2.2.2	Metamorfe reaksies langs die Ortopirokseenreaksie-isograad	458
2.2.2.1	Metamorfe karakter van die Ortopirokseenreaksie-isograad en die stabiliteitsverwantskappe van antofilliet+gedriet+kianiet in die Ortoamfiboolzone	459
2.3	Tydsverwantskappe van opeenvolgende periodes van metamorfose	461
3.	VERWANTSKAP TUSSEN METAMORFOSE EN DIE TEKTONIESE GESKIEDENIS VAN DIE SUIDELIKE GRENSSONE VAN DIE LIMPOPO-METAMORFEKOMPLEKS	463
3.1	Verskillende periodes van vervorming	463
3.2	Skuifskeursones	464
4.	KARAKTER VAN DIE OORGANG VANAF DIE LIMPOPO-METAMORFEKOMPLEKS NA DIE GRANIET-GROENSTEENTERREIN VAN DIE KAAPVAALKRATON	465
5.	VOORGESTELDE DEFINISIE VIR DIE SUIDELIKE GRENSSONE VAN DIE LIMPOPO-MOBIELEGORDEL	467
5.1	Litologie	467
5.2	Aspekte van metamorfose	468
5.3	Skuifskeurvervorming	468
5.4	Struktuur en tyd	468
6.	OPSOMMING	469

FIGURE EN TABELLE

'n Uitvoublad vir kruisverwysing na figure en tabelle in die teks word agter in die proefskrif voorsien.



UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG

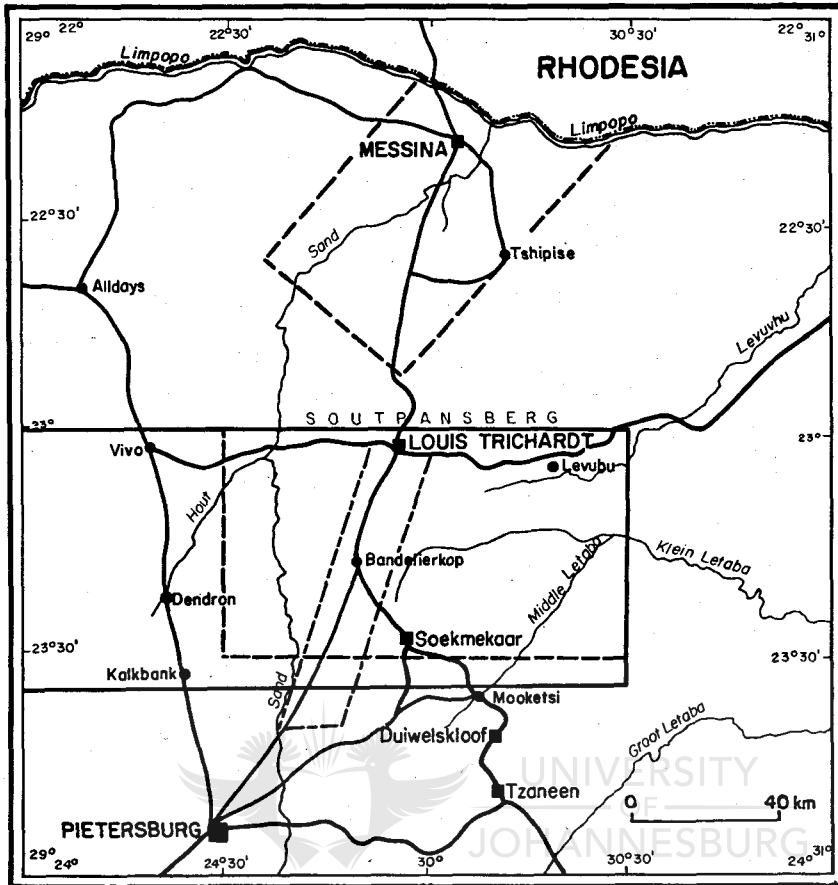


UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG

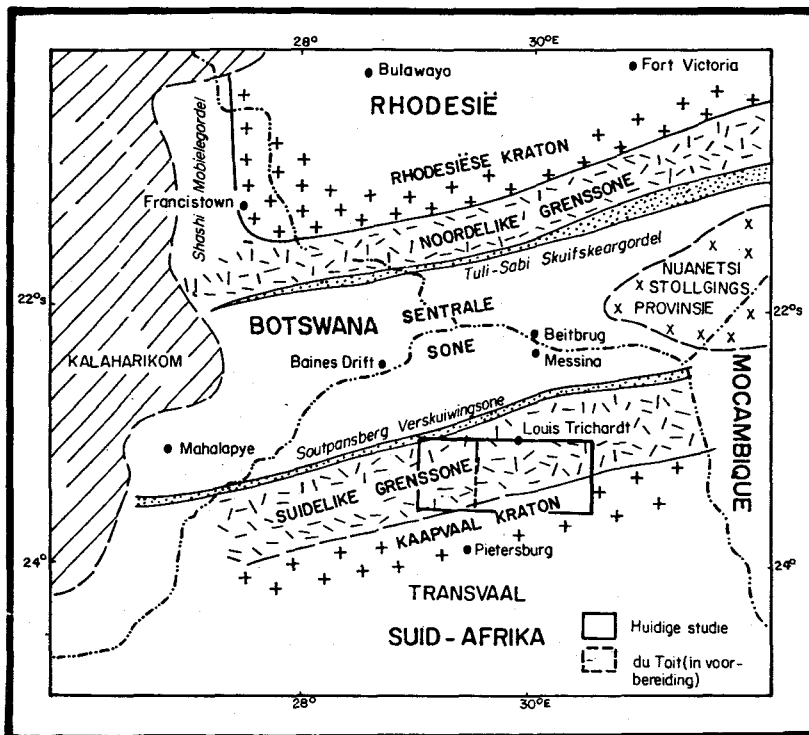
AFDELING 1

INLEIDING





Figuur: la Lokalisiteitskaart. Die studiegebied word deur soliede lyne omlyn, terwyl die gebied wat deur du Toit (in voorbereiding) gekarteer is deur stippellyne aangedui word. Die twee studiestroke (Afd. I-3) word ook op hierdie figuur aangedui.



Figuur Ib Tektoniese onderverdeling van die Limpopo-mobielelgordel (Mason 1973)

1. LIGGING VAN GEBIED

Die gebied wat deur hierdie ondersoek gedek word lê tussen lengtegrade 29° en $30^{\circ}30'$ en breedtegrade 23° en $23^{\circ}33'$, en beslaan 'n oppervlakte van ongeveer $9\,500\text{ km}^2$ in Noord-Transvaal suid van die Soutpansberge (Fig. 1a). Gesteentes van die Bosveldstollingskompleks vorm die westelike grens terwyl die Sutherlandgroensteengordel direk oos van die gebied geleë is. Louis Trichardt, in die noorde van die gebied, is deur middel van teerpaaië verbind met Pietersburg, Bandelierkop, Soekmekeer, Vivo, Sibasa en Dendron, terwyl die res van die gebied redelik goed bedien word deur goeie grondpaaië. Die morfologie, klimaat en dreinerings van die algemene omgewing word volledig deur Du Toit (in voorbereiding) beskryf. Die gebied wat deur Du Toit gekarteer is word ook in figuur 1a aangedui.

Die ondersoekgebied kan verder ook in terme van die sogenaamde Limpopo-mobiele gordel (Mason, 1970; 1973) beskryf word. Hierdie gordel verteenwoordig 'n sone van intense metamorfose en vervorming tussen die Kaapvaalkraton in die suide, en die Rhodesiese kraton in die noorde. 'n Voorgestelde tektoniese onderverdeling en ligging van hierdie gordel (Mason, 1973) word in figuur 1b gegee. Die gebied onder bespreking val grootliks binne die suidelike grens-sone in hierdie onderverdeling, en beslaan feitlik die hele blootgestelde gedeelte van die Limpopo-mobiele gordel suid van die Soutpansberge. Die benaming Limpopo-mobiele gordel, soos onder andere voorgestel deur Mason, word egter nie in hierdie ondersoek gebruik nie, en die term Limpopo-metamorfekompleks word as 'n alternatiewe benaming voorgestel (Du Toit en Van Reenen, 1978). Hierdie benaming is nie-geneties en verwys na een van die mees opvallende kenmerke van hierdie gebied, naamlik die hoë-gradse metamorfose.

2. VORIGE WERK

Detail geologiese waarnemings in die Limpopo-metamorfe-kompleks is hoofsaaklik beperk tot die omgewing van Messina, terwyl min soortgelyke inligting beskikbaar is vir die gebied suid van die Soutpansberge. Die enigste redelike sistematiese beskrywing van gesteentetipes in die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfe-kompleks voor die huidige ondersoek het hoofsaaklik betrekking op sekere ekonomiese aspekte van die gebied. Die belangrikste hiervan is die verslae wat deur Hall (1920) en Brand (1946) gepubliseer is in verband met korundvoorkomste in Noord- en Oos-Transvaal, en die beskrywing van apatietvoorkomste op die plase Spelonkwater 383 LS, Schaapkraal 387 LS en Mahilashoek 388 LS, oos van Bandelierkop, deur Janisch (1927) en Hall (1925). 'n Mineralogiese beskrywing van gesteentetipes van die Matok-granietplutoon word deur Brand (1939) gegee in 'n ongepubliseerde verslag van die Geologiese Opname van Suid-Afrika. Verdere beskikbare inligting is met enkele uitsonderings beperk tot verkenningsopnames en ongepubliseerde verslae deur die Geologiese Opname, en prospekteerverslae deur verskillende Mynmaatskappye. In hierdie opsig kan verwys word na die geologiese kaart, blad 2328 Pietersburg, op 'n skaal van 1:250 000, wat in 1959 deur die Geologiese Opname gepubliseer is, en die ongepubliseerde verslag van 'n verkenningsopname wat deur Schmidt-Eisenlohr (1969) vir die Geologiese Opname onderneem is met die doel om die ekonomiese potensiaal van nikkel in ultramafiese gesteentes in Noord-Transvaal te ondersoek. Meer onlangse verkenningsopnames in die gebied onder bespreking is deur Mason (1970; 1973) en Graham (1973; 1974) onderneem.

Mason het 'n wesentlike bydrae gelewer aangesien hy die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfe-kompleks as sulks geïdentifiseer het, en ook 'n tentatiewe suidelike grens vir hierdie kompleks, gebaseer op die verspreiding

van granuliete, voorgestel het (Fig. 1b). Hierdie werk is egter hoofsaaklik op fotogeologiese interpretasies gebaseer en geen sistematiese beskrywing van gesteentetipe of strukture word gegee nie. Graham (1973; 1974) se poging is ook tot 'n groot mate op fotogeologiese interpretasies gebaseer maar het geen bydrae gelewer tot die beskikbare kennis in verband met die tektoniese en metamorfe karakter van die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfekompleks nie. As voorbeeld kan hier genoem word dat Graham (1974; p. 69) die teenwoordigheid van granulite byvoorbeeld as lokale verskynsels in die omgewing van Bandelierkop beskou, terwyl hierdie gesteentes in werklikheid oor 'n oppervlakte van ten minste 4 500 km² dagsoom.



Die Departement Geologie aan die Randse Afrikaanse Universiteit is ingeskakel by Werkgroep 9 van die Internasionale Geodinamika-projek wat in Suid-Afrika deur die W.N.N.R. gefinansieer word. Die opdrag van hierdie werkgroep behels die detail geologiese ondersoek van die oorsprong en tydsverwantskappe van tektoniese, metamorfe en stollingsgebeurtenisse in die Limpopo-metamorfekompleks. Vir hierdie doel is twee studiestroke, een suid en een noord van die Soutpansberge, vir detail navorsing goedgekeur (Fig. 1a). Die navorsing in die suidelike studiestrook word deur die Departement Geologie aan die R.A.U. onderneem, terwyl die noordelike studiestrook deur die Departement Geologie aan die Universiteit van die Witwatersrand ondersoek word. Die Bernard Price Instituut vir Geofisiese Navorsing is verantwoordelik vir die insameling van geochronologiese inligting in beide studiestroke. Die bydrae van die Departement Geologie aan die R.A.U. is egter nie beperk tot die goedgekeurde studiestrook nie, maar behels ook die regionale ondersoek van die suidelike

grenssone van die Limpopo-metamorfekompleks. Die grootste gedeelte van hierdie gebied is reeds deur Du Toit (in voorbereiding) gekarteer, terwyl die kartering van die aangrensende gebiede na die ooste en weste op die huidige onderskeidelik deur C.J. Vorster en L. Wilsenach onder kontrak met die Geologiese Opname onderneem word.

D.J. Serfontein van die Departement Geologie aan die Universiteit van die Noorde onderneem ook tans 'n petrologiese ondersoek van die Matok-granietplutoon.

Die huidige ondersoek is onderneem met die doel om die metamorfe geskiedenis, en die tydsverwantskappe tussen opeenvolgende periodes van metamorfose en die tektoniese ontwikkeling van die suidelike grenssone van die Limpopo-Metamorfekompleks, in detail te ondersoek. Die metamorfe ondersoek is nie onafhanklik gedoen nie maar vorm 'n integrale deel van die regionale geologiese en strukturele ondersoek wat gelyktydig deur Du Toit (in voorbereiding) onderneem is. Die resultate van laasgenoemde ondersoek het uit die aard van die saak 'n baie belangrike rol in die huidige ondersoek gespeel. In die lig hiervan, en veral omdat die metamorfe studie beperk is tot enkele interessante gesteentetipes in die gebied, word die resultate van Du Toit se ondersoek kortliks in Afdeling II opgesom.

Die belangrikste aspekte wat by die ^e metamorfe ondersoek betrek is kan in 'n algemene vorm as volg opgesom word:

Petrografiese benadering

Die petrografiese en veldondersoek betrek die volgende aspekte:

- (i) Die regionale verspreiding van metamorfe sones en die identifikasie van metamorfe reaksie-isograde wat die oorgang van een sone na 'n ander definieer.

- (ii) Die identifikasie van metamorfe reaksies wat gekoppel is aan opeenvolgende periodes van metamorfose, en die petrografiese ondersoek van die ewewigsverwantskappe van die mineraalversamelings wat as gevolg van hierdie reaksies ontwikkel het.
- (iii) Die verwantskap tussen opeenvolgende periodes van metamorfose en die vervormingsgeskiedenis van die gebied.

Petrochemiese benadering

Die chemiese ondersoek van die proses van metamorfose betrek die volgende aspekte:

- (i) Die totale chemiese samestelling van pelitiese en mafiese gesteentes is as basis gebruik om vas te stel of die metamorfe ontwikkeling van die gebied in terme van isochemiese prosesse beskryf kan word, en of metasomatiese prosesse ook 'n rol gespeel het.
- (ii) Die chemiese kenmerke van diagnostiese metamorfe minerale, en die verwantskap tussen die samestelling van hierdie minerale en variasies in die graad van metamorfose.
- (iii) Die chemiese ondersoek van ewewig tydens opeenvolgende periodes van metamorfose.
- (iv) Die stabiliteitsverwantskappe van diagnostiese mineraalversamelings, en die rol en invloed van eksterne veranderlikes (temperatuur, druk en die chemiese potensiaal van water) op hierdie verwantskappe.
- (v) Die chemiese ondersoek van kritiese metamorfe reaksies.
- (vi) Die kwantitatiewe bepaling van temperatuur- en druktoestande tydens opeenvolgende periodes van metamorfose.

- (vii) Die interpretasie van bogenoemde resultate in die lig van die beskikbare petrografiese, veld en eksperimentele inligting.

Die metodes wat in hierdie ondersoek gebruik is word in Afdeling III opgesom.

4. BEDANKINGS

Hierdie ondersoek vorm deel van die Departement Geologie aan die Randse Afrikaanse Universiteit se bydrae tot die Internasionale Geodinamika Projek en is moontlik gemaak deur die finansiële ondersteuning van die W.N.N.R. Die skrywer se dank en waardering aan hierdie instansie.

Die voltooiing van die projek is verder moontlik gemaak deur die beskikbaarstelling van analitiese fasiliteite deur die Anglo American Navorsingslaboratoriums, die Nasionale Instituut vir Metallurgie en die Geologiese Opname. Die skrywer wil in hierdie opsig 'n besondere woord van dank rig aan drs. G.M. Koen en R. Danchin van die Anglo American Navorsingslaboratorium vir die mikrosonde fasiliteite waarsonder hierdie ondersoek nie voltooi kon word nie. Mnr. G. Hutchinson van dieselfde instansie word ook graag bedank vir die uitvoering van die mikrosonde analises.

Die skrywer spreek ook graag sy waardering uit teenoor dr. C. Roering wat as studieleier opgetree het en wat met sy besondere insig 'n groot rol gespeel het in die suksesvolle voltooiing van die ondersoek. Aan prof. W.J. van Biljon ook 'n woord van dank vir sy deurlopende belangstelling in hierdie ondersoek. 'n Spesiale woord van dank en waardering aan M.C. du Toit vir sy samewerking en waardevolle besprekings oor 'n periode van meer as ses jaar.

Die volgende persone se bydraes tot verskillende aspekte van die ondersoek word ook met dank erken: Dr. S.A. de Waal wat, ten tye van sy aanstelling in hierdie departement, altyd beskikbaar was vir die bespreking van probleme; mnr. J.J. Bensch wat deurgaans behulpzaam was met X-straal-identifikasie van minerale en die verwerking van chemiese gegewens en mnr. J. Markgraaf vir waardevolle kritiek in verband met verskillende aspekte van kristalchemie. Mej. A. Saitet word ook graag bedank vir die voorbereiding van die teksfigure, mev. M.C. Williams vir die tik van hierdie proefskrif en mnr. L. Scheepers van die departement Geografie vir hulp met die voorbereiding van plate vir foto's.

Laastens wil die skrywer graag sy eggenote Wilna bedank vir die morele steun tydens die tydperk waarin hierdie ondersoek afgehandel is.



UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG

AFDELING 11

ALGEMENE GEOLOGIE

EN

REGIONALE STRUKTUUR

UNIVERSITY
JOHANNESBURG

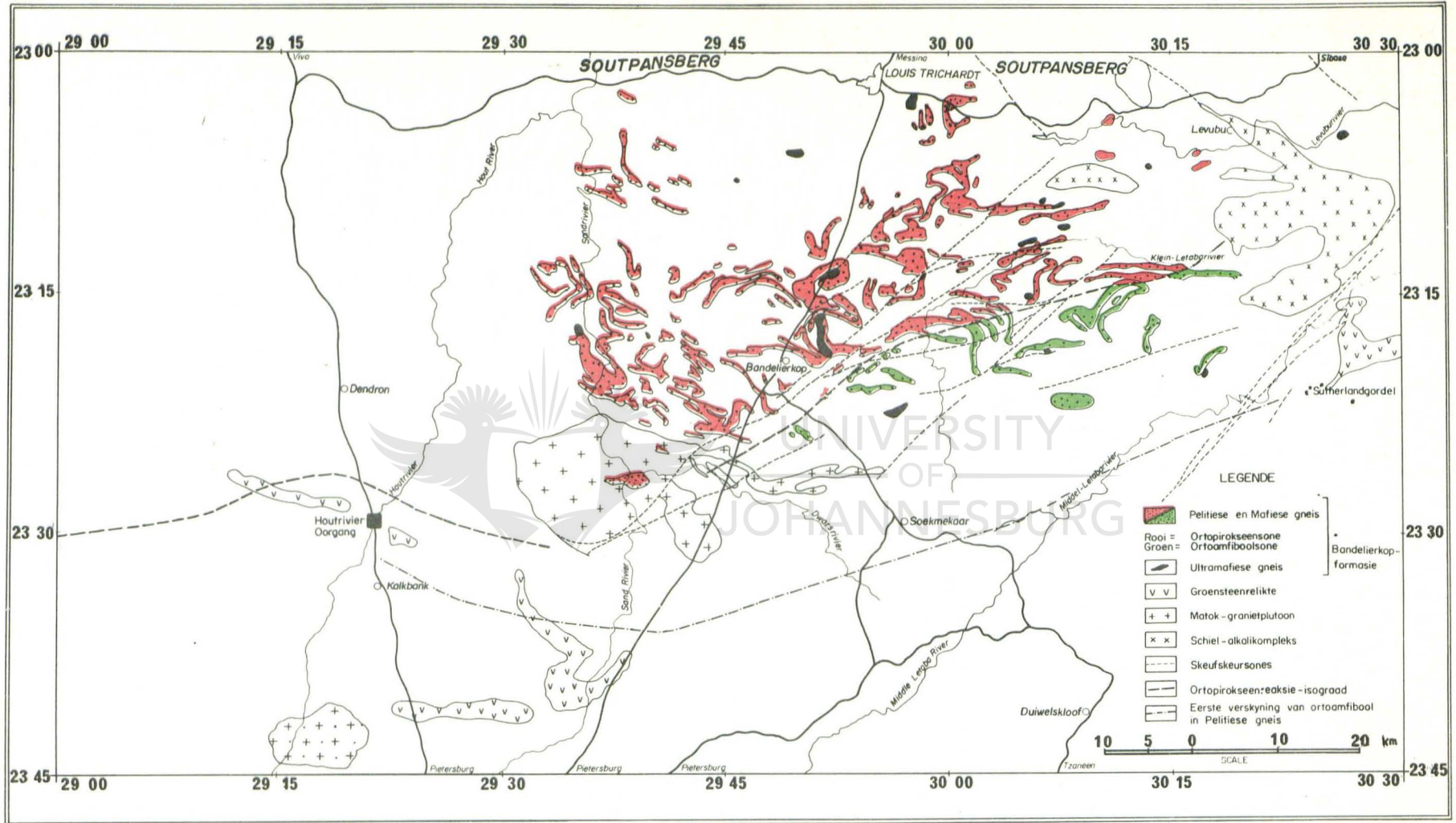
1. ALGEMEEN

In hierdie afdeling word 'n kort samevatting gegee van die belangrikste geologiese en strukturele kenmerke van die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfekompleks. Hierdie bespreking is gebaseer op die resultate van die regionale karteringsprojek wat deur Du Toit (in voorbereiding) onderneem is. Die gebied wat deur Du Toit gekarteer is beslaan 'n oppervlakte van nagenoeg 5 000 km² en lê tussen lengtegrade 29°30' en 30°30' en breedtegrade 23° en 23°30' (Fig. 1a en 2).

2. GEOLOGIE

Die belangrikste geologiese elemente van hierdie ondersoek kan kortliks as volg saamgevat word:

- (a) Behalwe vir die gesteentes van die Soutpansberg-Groep in die noorde word die grootste gedeelte van die ondersoekgebied onderlê deur tonalitiese graniet-gneisse (die Baviaanskloofgneis). In hierdie graniet-gneisterrein kom hoogs vervormde en gemetamorfoseerde relikte van gesteentes van vulkano-sedimentêre oorsprong voor wat deur Du Toit onder die algemene benaming van die Bandelierkop-Formasie beskryf word. Die makro-relikte van die Bandelierkop-Formasie word waargeneem as ingeplooiide sinklinale oorblyfsels wat altyd deur granitiese materiaal omring word. As gevolg van die intense tektoniek, hoë-gradse metamorfose en wydverspreide anatektiese gebeurtenisse is dit nie moontlik om sonder twyfel vas te stel of die Baviaanskloofgneis as die vloer van die Bandelierkop-Formasie beskou kan word nie.
- (b) Al die eenhede van die Bandelierkop-Formasie word nêrens in die karteringsgebied in kontak met mekaar



Figuur 2 : Geologiese sketskaart wat die verspreiding van die gesteentes van die Bandelierkop-Formasie illustreer. Die posisie van die Ortopirokseeneaksie-isograad en 'n tentatiewe lyn wat die eerste verskyning van ortoamfibool in die Pelitiese gneis definieer word ook in hierdie figuur aangedui.

waargeneem nie, en gevolglik is dit onmoontlik om 'n volledige stratigrafiese opeenvolging vir hierdie gesteentes te bepaal. Waargenome rotsverhoudings het Du Toit egter in staat gestel om die lede van die Bandelierkop-Formasie in 'n proto-opeenvolging in te deel met ultramafiese gesteentes aan die basis, gevolg deur mafiese en pelitiese gesteentes. Kwartsitiese gesteentes kom as lense in die verskillende lede van hierdie opeenvolging voor.

- (c) Die graad van metamorfose neem toe vanaf die Ortoamfiboolsone in die suide, deur die Ortopirokseenreaksie-isograad, tot in die Ortopirokseenzone in die noorde.

Die verspreiding van die verskillende lede van die Bandelierkop-Formasie word in figuur 2 aan die hand van 'n vereenvoudigde geologiese kaart geïllustreer. Die regionale verspreiding van die Ortoamfibool- en Ortopirokseenzones en die posisie van die Ortopirokseenreaksie-isograad word ook in dieselfde figuur geïllustreer.

2.1 DIE BAVIAANSKLOOFGNEIS

Die Bavianskloofgneis verteenwoordig die mees algemene gesteentetipe in die ondersoekgebied en kan in die veld baie maklik van die gesteentes van die Bandelierkop-Formasie onderskei word op grond van die kenmerkende migmatitiese gebandheid, grys tot donkergrys kleur en tipiese granitiese samestelling. Hierdie gneisse verteenwoordig waarskynlik die oudste gesteentes in die gebied en kan moontlik as die vloer van die Bandelierkop-Formasie beskou word. Hierdie voorstel is egter spekulatief en kan, soos reeds genoem, nie sonder twyfel op grond van die beskikbare veldinligting bewys word nie.

Die Baviaanskloofgneis bestaan hoofsaaklik uit kwarts, oligoklaas-andesien en biotiet met ondergeskikte hornblende en hipersteen. K-veldspaat (pertiet) is soms in klein hoeveelhede teenwoordig, behalwe in die gevalle waar die dagsome opvallend migmaties is. In laasgenoemde geval is hierdie mineraal beperk tot die leukosome, terwyl die melanosone uitsluitlik uit kwarts, plagioklaas, biotiet en hipersteen of hornblende bestaan. Die teenwoordigheid van hipersteen is beperk tot die Ortopirokseensone, terwyl hornblende in klein hoeveelhede in beide die Ortopirokseensone en Ortoamfiboolsones waargeneem is. Boen behalwe die teenwoordigheid of afwesigheid van ortopirokseensone bestaan daar geen mineralogiese of chemiese verskille tussen die dagsome van die Baviaanskloofgneis in die verskillende metamorfe sones nie.

2.2 DIE BANDELIERKOP-FORMASIE



UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG

Die naam Bandelierkop-Formasie word deur Du Toit (in voorbereiding) gebruik om 'n groep gesteentes te beskryf wat as makro-relikte in die Baviaanskloofgneis voorkom. Hierdie gesteentes verskil van die tonalitiese granietgniese waarin hulle voorkom ten opsigte van chemiese en mineralogiese samestelling en litologiese voorkoms. Die Bandelierkop-Formasie bestaan hoofsaaklik uit pelitiese, mafiese en ultramafiese gesteentes met ondergeskikte magnetiet-kwartsiete. Hierdie gesteentes is nagenoeg egalig versprei deur die gebied wat deur Du Toit gekarteer is, maar daar is 'n merkbare afname in dagsome na die ooste, weste en suidooste van die gebied. 'n Paar besonder groot relikte maak dit moontlik om sinvolle struktuurwaarnemings te doen, terwyl die swak dagsome en ingewikkelde tektoniese en metamorfe geskiedenis die opstel van 'n stratigrafiese kolom onmoontlik maak. Die Bandelierkop-Formasie kan in die volgende hoof-gesteentetipes onderverdeel word:

A



B



Figuur 3a en b : Algemene veldvoorkoms van die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie. Die teenwoordigheid van kon-kordante leukokratiese are en liggame in die groef oos van Bandelierkop word in Figuur b geïllustreer

- (i) Die Pelitiese gneis. Verteenwoordigende monsters in die Ortopirokseensone bestaan hoofsaaklik uit kwarts, biotiet, oligoklaas-andesien, almandiet, kordiëriet en hipersteen terwyl ortoamfibool en kianiet tot die Ortoamfiboolsone beperk is.
- (ii) Die Mafiese gneis. Verteenwoordigende monsters bestaan uit andesien-labradoriet, ougiet, hipersteen en hornblende, met ondergeskikte kwarts.
- (iii) Die Ultramafiese gneis. Verspreide liggame van pirokseniet en peridotiet wat in die meeste gevalle intens geserpentiniseerd is.
- (iv) Gebande magnetietryke kwartsiet wat soms met massiewe granaat-hipersteengesteentes geassosieer is.

Die Bandelierkop-Formasie verteenwoordig, uit 'n tektoniese en metamorfe oogpunt, die belangrikste groep gesteentes in die gebied onder bespreking. Dit is so omdat die lede van hierdie Formasie as merkerlae gebruik kan word om die vervormingspatrone in die gebied te ontrafel, terwyl die chemiese en mineralogiese samestelling van die Pelitiese- en Mafiese gneis by uitstek geskik is vir detail metamorfe studies. Die dagsome van veral die Pelitiese gneis kan ook deurlopend oor die Ortopirokseenreaksie-isograad in figuur 2 gevolg word.

2.2.1 Die Pelitiese gneis

Die Pelitiese gneis is die mees opvallende gesteentetipe in die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfekompleks en kan op litologiese gronde beswaarlik met enige ander gesteentes verwar word. Dagsome van die Pelitiese gneis word gekenmerk deur 'n bruin tot persbruin kleur en 'n onreëlmatige gneisagtige voorkoms wat beklemtoon word deur die byna alomteenwoordigheid van konkordante en diskordante

leukokratiese anatektiese materiaal wat aan die gesteentes 'n migmatiese voorkoms gee (Fig. 3a en b). Hierdie verskynsel is veral opvallend in die Bandelierkopgroef direk oos van Bandelierkopstasie waar Du Toit (in voorbereiding) verskeie anatektiese gebeurtenisse kon identifiseer.

Opaalagtige kwarts, biotiet en piroopryke almandiet is 'n baie opvallende eienskap in dagsome van hierdie gesteentes, terwyl hipersteen soms ook met die blote oog geïdentifiseer kan word. Kordiëriet is minder opvallend in dagsome en handmonsters, maar die teenwoordigheid van hierdie mineraal kan sporadies op verweerde oppervlakte as grysblou knolle waargeneem word. Die teenwoordigheid van hipersteen en kordiëriet is beperk tot die Ortopirokseensone, en hierdie twee minerale word in die Ortoamfiboolsonne deur ortoamfibool (antofilliet en gedriet) en kianiet vervang. Die dagsome van die Pelitiese gneis is litologies identies in beide metamorfe sonne, en die oorgang van die Ortopirokseensone na die Ortoamfiboolsonne kan in die veld slegs by nadere ondersoek aan die hand van die verskyning van prismatiese ambifoolkristalle waargeneem word. Die term Pelitiese gneis word dus gerieflikheidsonthou as 'n versamelnaam gebruik om die litologies en chemies soortgelyke aluminium-ryke gesteentes in beide metamorfe sonne te beskryf. Die gebruik van hierdie term is in ooreenstemming met die algemene gebruik wat in die literatuur vir soortgelyke metamorfe gesteentes gevolg word (Jackson, 1976; Hensen en Green, 1973).

Die veldverwantskappe van die Pelitiese gneis met ander lede van die Bandelierkop-Formasie word bemoeilik as gevolg van die swak dagsome en die teenwoordigheid van leukokratiese materiaal wat gewoonlik langs die kontakte ingedring het. Die Pelitiese en Mafiese gneis is egter intiem geassosieer en besit dieselfde dagsome verspreiding in die veld. In sommige gevalle is dagsome van die Pelitiese gneis oorheersend, terwyl die Mafiese gneis weer in ander gevalle oorheersend is. Klein liggame van die Pelitiese

gneis kom soms ook tussengelaagd met die Mafiese gneis voor. In geen geval kon die werklike kontak tussen hierdie twee gesteentetipes egter waargeneem word nie. As gevolg van die noue verwantskap in die veld word die Pelitiese en Mafiese gneis ook nie in die vereenvoudigde geologiese kaart van figuur 2 onderskei nie.

'n Baie algemene waarneming is die teenwoordigheid van lense van gebande ystersteen en magnetiet-kwartsiet in die Pelitiese gneis. Sommige van hierdie lense is tot 50 meter wyd en volg die foliasie van die Pelitiese gneis soms vir afstande van tot vier kilometer. Relikte van die Pelitiese gneis is ook 'n algemene verskynsel in die jonger plutone, soos byvoorbeeld baie duidelik in die geval van die Matok-granietplutoon geïllustreer word (Fig. 2).

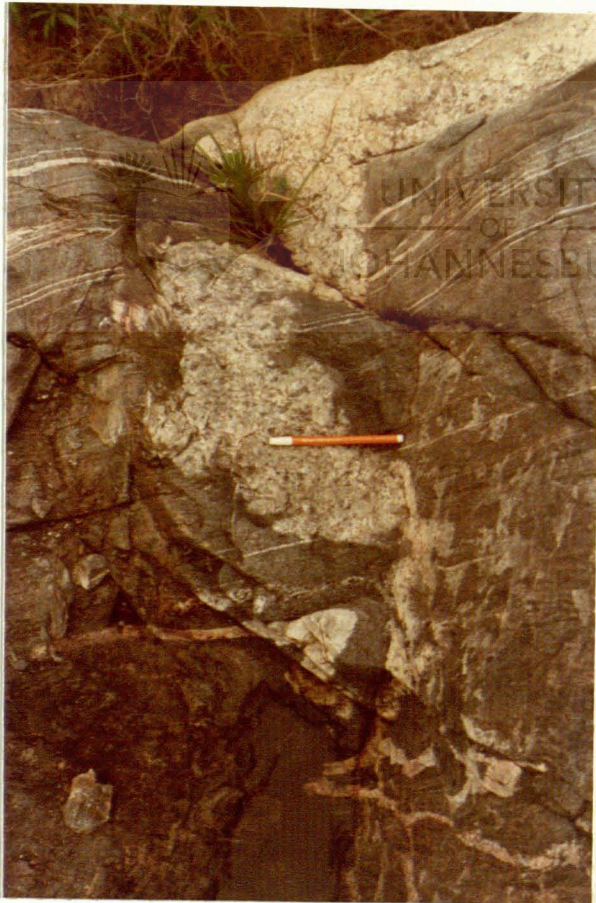
Die Pelitiese gneis vorm die basis vir die metamorfe ondersoek en die detail chemiese en mineralogiese samestelling van hierdie gesteentes word later volledig bespreek.

2.2.2 Die Mafiese gneis

Die term Mafiese gneis word as 'n versamelnaam gebruik om gesteentes van die Bandelierkop-Formasie met 'n basaltiese samestelling te beskryf. Hierdie gesteentes word in die Ortopirokseensone deur die teenwoordigheid van hipersteen, ougiet, andesien-labradoriet en hornblende, met ondergeskikte kwarts gekenmerk. Soortgelyke gesteentes in die Ortoamfiboolzone bestaan hoofsaaklik uit andesien en hornblende, met ondergeskikte diopsied en kwarts en kan hier as tipiese amfiboliete beskryf word.

Die Mafiese gneis verteenwoordig 'n maklik identifiseerbare en karteerbare eenheid in die veld. Dagsome van hierdie gesteentes is kenmerkend donkergroen tot swart in kleur en word soms ook gekenmerk deur 'n gebande voorkoms vergor-

saak deur afwisselende ligter en donker bande (Fig. 4). Die ligter bande bestaan uit kwarts en plagioklaas terwyl die ferromagnesiese minerale in die donker bande gekonsentreer is. Die gebandheid is veral 'n opvallende eienskap in die Ortoamfiboolsonne en word minder algemeen in die Ortopirokseensone waargeneem. Die teenwoordigheid van konkordante en diskordante leukokratiese are is soms ook baie opvallend en gee, net soos in die geval van die Pelitiese gneis, ook aanleiding tot dagsome met 'n migmatiese voorkoms.



Figuur 4 : Algemene veldvoorkoms van die Mafiese gneis van die Banderlierkop-Formasie. Let op die gebande voorkoms en die teenwoordigheid van 'n diskordante leukokratiese liggaam

Die veldverwantskappe van die Pelitiese en Mafiese gneis is reeds bespreek. Dit kan net hier genoem word dat lae van laasgenoemde gesteentetipe soms ook sporadies in die Pelitiese gneis waargeneem kan word. 'n Baie interessante assosiasie is egter dié van die Mafiese en Ultramafiese gneis. Konkordante lae en boudins van ultramafiese materiaal kom baie algemeen in die Mafiese gneis voor. Die kontakte is baie skerp en die twee tipes gesteentes het volgens Du Toit (in voorbereiding) saam ten minste aan een periode van vervorming deelgeneem. Die intieme assosiasie van ultramafiese en mafiese materiaal is 'n aanduiding dat hierdie twee gesteentes moontlik oorspronklik in tyd geassosieer is.

'n Verdere algemene verskynsel in die gebied is die voorkoms van lae van gebande ystersteen en magnetietkwartsiet in die Mafiese gneis. Hierdie lae wissel in wydte van minder as een meter tot meer as 50 meter en het 'n belangrike rol gespeel in die ontrafeling van die vervormingsgeskiedenis van die gebied.

Die Mafiese gneis het ook 'n belangrike rol by die metamorfe ondersoek gespeel en die detail chemiese en mineralogiese samestelling van hierdie gesteentes word later volledig bespreek.

2.2.3 Die Ultramafiese gneis

Die term Ultramafiese gneis word deur Du Toit (in voorbereiding) gebruik om alle gesteentes met 'n ultramafiese samestelling in die karteringsgebied te beskryf. Hierdie gesteentes kom as 'n menigte sferiese en onreëlmatige liggame verspreid deur die gebied voor. Die verspreiding van enkele van die groter liggame word in die vereenvoudigde geologiese kaart van figuur 2 aangedui.

Die Ultramafiese gneis vorm algemeen geïsoleerde liggame maar kom soms ook voor as lang reekse van liggame wat met die plooistruktuur in die gebied geassosieer is. Hierdie reeks liggame kan egter slegs in uitsonderlike gevalle vir enige afstand aaneenlopend langs strekking gevolg word, en verteenwoordig volgens Du Toit 'n tektonies verbrokkelde ultramafiese laag wat moontlik as die onderste lid van die Bandelierkop-Formasie beskou kan word.

Litologies word die Ultramafiese gneis in die veld baie maklik geïdentifiseer op grond van die swart tot appelgroen kleur in vars handmonsters, en die uitsers ruwe voorkoms in verweerde dagsome. Hierdie ruwe voorkoms word deur die verwering van olivien veroorsaak. Die gesteentes vertoon gewoonlik massief in dagsome en 'n foliasie is selde opvallend. Die ultramafiese gesteentes is baie algemeen intiem geassosieer met leukokratiese granitiese materiaal en kom ook as relikte in die Baviaanskloofgneis voor. In uitsonderlike gevalle, soos byvoorbeeld op die plaas Rietvlei 130 LT, ongeveer 17 km noord-noordoos van Soekmekaar, en in die uitloop van die Albasinidam, kan 'n duidelike oorgang van die Mafiese na die Ultramafiese gneis waargeneem word. Dit is 'n aanduiding dat hierdie twee gesteentetipes baie nou verwant is.

Sommige ultramafiese liggame is ook met gebande ystersteen geassosieer. Du Toit beskryf ook strukture in ultramafiese gesteentes op die plaas Garth 309 LS, ongeveer 18 km suidwes van Louis Trichardt, wat baie soos kussinglawas lyk. Hierdie strukture is 'n goeie aanduiding dat die Ultramafiese gneis oorspronklik moontlik 'n lawa verteenwoordig het. Verder is die Ultramafiese gneis ook baie algemeen met korundvoorkomste geassosieer. Die korund word gewoonlik in intrussiewe veldspatiese are in die ultramafiese gesteentes gevind. Die assosiasie van korund met ultramafiese gesteentes in Noord-Transvaal is volledig deur Hall (1920) en Brandt (1946) beskryf.

Die Ultramafiese gneis kan op mineralogiese gronde in pirokseniete, peridotiete en duniete onderverdeel word. Eersgenoemde twee tipes gesteentes besit die grootste verspreiding in die gebied, terwyl duniet slegs in enkele dagsome geïdentifiseer is. Die pirokseniet vertoon altyd vars, en is 'n grofkorrelrige gesteente wat soms deur die teenwoordigheid van pirokseenkristalle tot sewe sentimeter lank gekenmerk word. In teenstelling hiermee is die peridotiete meer fynkorrelrig en vertoon in die meeste gevalle gevorderde tekens van serpentinisasie.

Geen sistematiese mineralogiese ondersoek van die verskillende ultramafiese gesteentes is vir die doel van hierdie ondersoek onderneem nie. Die volgende is slegs 'n kort algemene beskrywing van die mees opvallende petrografiese kenmerke van hierdie gesteentes in die verskillende metamorfe sones.



Die mineralogiese samestelling van die verskillende ultramafiese gesteentes in die Ortopirokseensone is oor die algemeen eenvoudig. Die pirokseniete is monomineraliese gesteentes wat byna uitsluitlik uit ortopirokseen (enstatiet) met klein hoeveelhede donkergroen spinel bestaan. Die peridotiete bestaan weer hoofsaaklik uit enstatiet en geserpentiniseerde, of gedeeltelike geserpentiniseerde, olivien met ondergeskikte klinopirokseen en bykomstige spinel. Klinopirokseen is soms geheel en al afwesig. Die olivienryke gesteentes bevat soms ook klein hoeveelhede amfibool wat op grond van optiese eienskappe as beide antofilliet en kumingtoniet geïdentifiseer is. 'n Karbonaatmineraal (kalsiet) is ook algemeen in baie klein hoeveelhede waargeneem.

Die ultramafiese gesteentes in die Ortoamfiboolsone verskil in dagsome nie opvallend van die in die Ortopirokseensone nie. Eersgenoemde gesteentes vertoon egter soms 'n swak ontwikkelde foliasie wat selde in die Ortopirokseensone waargeneem is. Mineralogies verskil die gesteentes in die

Ortoamfiboolsonne egter opvallend van die in die Ortopirokseensone. Hierdie verskille word geïllustreer deur 'n opvallende toename in die hoeveelheid amfibool en 'n afname in die hoeveelheid pirokseen. Olivien is ook nie in sulke groot hoeveelhede as in die Ortopirokseensone teenwoordig nie.

Aspekte van die chemiese samestelling van die Ultramafiese gneis word in Afdeling V bespreek.

2.2.4 Kwartsitiese Gesteentes

Die kwartsitiese gesteentes sluit suiwer kwartsiete, gebande ystersteen en magnetietkwartsiete in, en besit 'n baie ondergeskikte verspreiding in die gebied onder bespreking. As gevolg hiervan word hierdie groep gesteentes nie op die vereenvoudigde geologiese kaart van figuur 2 onderskei nie. Die veldverwantskappe van hierdie groep gesteentes met die Pelitiese, Mafiese en Ultramafiese gneisse is reeds bespreek. Die suiwer kwartsiete kom algemeen as dun tussengelaagde liggame in die Pelitiese gneis voor, en bevat soms klein hoeveelhede piriet. Die tipiese gebande ystersteen en magnetietkwartsiet is suiwer gesteentes wat hoofsaaklik uit kwarts en magnetiet bestaan. Hipersteen of gruneriet is egter ook soms in klein hoeveelhede teenwoordig. Die teenwoordigheid van hipersteen is beperk tot die Ortopirokseensone en word in die Ortoamfiboolsonne deur gruneriet vervang. 'n Redelike algemene waarneming is dat hierdie gesteentes soms in kontak met die Pelitiese gneis progressief meer onsuier word en later oorgaan in massiewe gesteentes wat uit granaat, hipersteen, magnetiet en kwarts bestaan. Magnetiet is soms ook heeltemal afwesig.

2.3 DIE LEUKOKRATIESE GRANIET

Die term Leukokratiese graniet word deur Du Toit (in voorbereiding) gebruik om alle gesteentes in die gebied te beskryf wat hoofsaaklik uit kwarts en veldspaat bestaan, en wat minder as vyf persent ferromagnesiese minerale bevat. Hierdie gesteentes besit 'n wye verspreiding in die gebied suid van die Soutpansberge en kom voor as swak gedefinieerde massas sowel as klein segregasies en groter konkordante en diskordante liggame in die Baviaanskloofgneis, en in al die lede van die Bandelierkop-Formasie. Alhoewel hierdie gesteentes in groot volumes teenwoordig is, en wydverspreid deur die gebied voorkom, is dit as gevolg van die swak dagsoompatoon, en intieme assosiasie met die ander gesteentes, nie moontlik om die Leukokratiese graniet op geologiese kaarte te onderskei nie (Du Toit, in voorbereiding).

Die ontwikkeling van hierdie gesteentes word gesien as diskrete anatektiese gebeurtenisse wat oor 'n groot tydinterval plaasgevind het en wat intiem geassosieer is met die tektoniese en metamorfe ontwikkeling van die gebied. Die tektoniese geskiedenis en anatektiese oorsprong van die Leukokratiese graniet word veral duidelik geïllustreer in dagsome van die Pelitiese gneis wat in 'n groef 3 km oos van Bandelierkopstasie blootgestel is. In hierdie groef word ten minste twee, en moontlik selfs drie, diskrete anatektiese gebeurtenisse geïllustreer deur die teenwoordigheid van vervormde are en liggame van leukokratiese materiaal wat later deur onvervormde are ingedring is (Du Toit, in voorbereiding). Die volgende waarnemings in hierdie groef kan ook as bewys dien dat die leukokratiese materiaal in plek ontwikkel het as gevolg van die gedeeltelike smelting van die Pelitiese gneis onder toestande van hoë temperatuur en druk.



A

B

Figuur 5 : a. Relikte van die Pelitiese gneis in die Leukokratiese graniet
 b. Diskordante leukokratiese liggaam in die Pelitiese gneis in die groef oos van Bandelierkop.
 Die foliasie in die Leukokratiese graniet is in beide gevalle parallel aan dié van die omliggende Pelitiese gneis

- (i) Die teenwoordigheid van relikte, en stringe van relikte van pelitiese materiaal in leukokratiese segregasies. Die foliasie van hierdie relikte is parallel aan dié van die wandgesteentes (Fig. 5a).
- (ii) In baie gevalle word die oorspronklike karakter van die Pelitiese gneis slegs geïllustreer deur die teenwoordigheid van reste van minerale soos granaat en biotiet in die leukokratiese materiaal

wat 'n afgedrukte foliasie parallel aan dié van die wandgesteentes definieer (Fig. 5a en b).

- (iii) Pegmatitiese fases van die leukokratiese materiaal word gekenmerk deur die teenwoordigheid van groot kristalle van hipersteen, en soms ook granaat, wat meer grofkorrelrig is as granaat en hipersteen in die aanliggende Pelitiese gneis. Die moontlikheid bestaan dus dat hierdie minerale direk uit die anatektiese smelt gekristalliseer het onder soortgelyke PT-toestande as dié waarby dieselfde minerale in die Pelitiese gneis stabiel is. Die groot granaatkristalle word soms geheel of gedeeltelik deur 'n smal sone van kordieriet omring. Hierdie tekstuur is 'n aanduiding van 'n reaksie wat waarskynlik in 'n soliede, of semi-soliede, toestand plaasgevind het as gevolg van die metasomatiese toevoeging van veral magnesium. Dit is in hierdie opsig interessant om daarop te let dat soortgelyke reaksies baie algemeen in die aanliggende Pelitiese gneis waargeneem is (Afd. IV).
- (iv) Sillimaniet is soms ook 'n opvallende bestanddeel van die leukokratiese materiaal in hierdie groef. Die Pelitiese gneis bevat egter self geen sillimaniet nie, en hierdie mineraal verteenwoordig waarskynlik die oormaat aluminium wat gedurende die proses van anatekse in die smeltfase opgeneem is. Die sillimaniet kom voor as stringe van prismatiese kristalle wat parallel aan die foliasie van die Pelitiese gneis gerangskik is.
- (v) Die leukokratiese graniet word gekenmerk deur die teenwoordigheid van groot hoeveelhede K-veldspaat (pertiet), terwyl die Pelitiese gneis self baie min of geen K-veldspaat bevat (Afd. IV).
- (vi) 'n Verdere algemene kenmerk van die Leokokratiese graniet is die teenwoordigheid van grafiet en afgeplatte kwarts wat soms 'n opvallende maaksel aan die gesteentes gee.

Bogenoemde is slegs 'n oorsigtelike beskrywing van die mees opvallende mineralogiese en litologiese eienskappe van die Leukokratiese graniet wat met die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie geassosieer is. Die Leukokratiese graniet wat met die ander gesteentetipes in die gebied geassosieer is het presies dieselfde mineralogiese samestelling maar bevat geen granaat, hipersteen of sillimaniet nie.

Die detail chemiese en mineralogiese ondersoek van die oorsprong van hierdie gesteentes aan die hand van die proses van anatekse is egter een van die interessante aspekte van die metamorfe geskiedenis van die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfekompleks wat nog ondersoek moet word. Die verwantskap tussen verskillende anatektiese gebeurtenisse en die tektoniese ontwikkeling van die gebied word kortliks in 'n volgende afdeling bespreek.

2.4 JONGER PLUTONE

Die jonger plutoniese gesteentes in die gebied onder bespreking is glad nie by die metamorfe ondersoek betrek nie en word dus nie hier in enige detail bespreek nie. Du Toit (in voorbereiding) gee 'n meer volledige uiteensetting van die jonger plutoniese gebeurtenisse (die Matok-granietplutoon, Schiel-alkalikompleks en die Palmietfonteingraniete), terwyl D.J. Serfontein van die Departement Geologie aan die Universiteit van die Noorde op die oomblik besig is met 'n detail mineralogiese en chemiese ondersoek van die Matok-granietplutoon.

3. REGIONALE STRUKTUUR

3.1 ALGEMEEN

Die metamorfe ontwikkeling van 'n komplekse regionale metamorfe terrein kan slegs sinvol ontrafel word indien so 'n ondersoek geïntegreer word met 'n gepaardgaande studie van die vervormingsgeskiedenis van die gebied. In die geval van die huidige projek het die skrywer hom toegespits op die verskillende aspekte van metamorfose terwyl Du Toit (in voorbereiding) terselfdertyd 'n regionale karteringsprogram en struktuurondersoek onderneem het. Tydens die hele navorsingsprojek is daar op alle vlakke baie nou saamgewerk, en dit het uiteindelik duidelik geword dat die komplekse metamorfe geskiedenis van die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfe kompleks in verband gebring kan word met 'n ewe komplekse vervormingsgeskiedenis. In die afdeling wat volg word geen detail beskrywing van struktuurelemente en plooi morfologie gegee nie. Die doel van hierdie bespreking is slegs om die belangrikste resultate van Du Toit se struktuurondersoek kortliks op te som sodat hierdie inligting as basis vir latere terugverwysing gebruik kan word.

3.2 VERSKILLENDE PLOOI PERIODES

Du Toit (in voorbereiding) kon die teenwoordigheid van ten minste drie plooi periodes op grond van struktuurwaarnemings op beide 'n meso- en makroskaal bewys. Die vroegste periode van vervorming (bekend as F_1 -plooiing) word in dagsome waargeneem as baie toe isoklinale plooiing wat deur latere ko-aksiale vervorming (bekend as F_2 -plooiing) opgevolg is waartydens die vroeëre F_1 -plooi in 'n haakstruktuur omskep is. Die foliasie gekoppel aan die vroeëre periodes van

vervorming word baie moeilik in die veld onderskei, en gevolglik word na hierdie struktuur as die F_1/F_2 -foliasie verwys. Die beskikbare veldinligting is ook nie 'n aanduiding of F_1 en F_2 deel is van 'n aaneenlopende vervormingsgeskiedenis, en of dit as twee afsonderlike plooiperiodes beskou moet word nie. Die derde en laaste periode van vervorming (bekend as F_3) het aanleiding gegee tot oop dwarsplooing wat in 'n noord-westelike rigting oor die vorige strukture sny wat nagenoeg oos-wes georiënteer is. Die laaste periode van vervorming is nie oral deurdringend nie en F_3 -maaksels word selde in dagsome waargeneem.

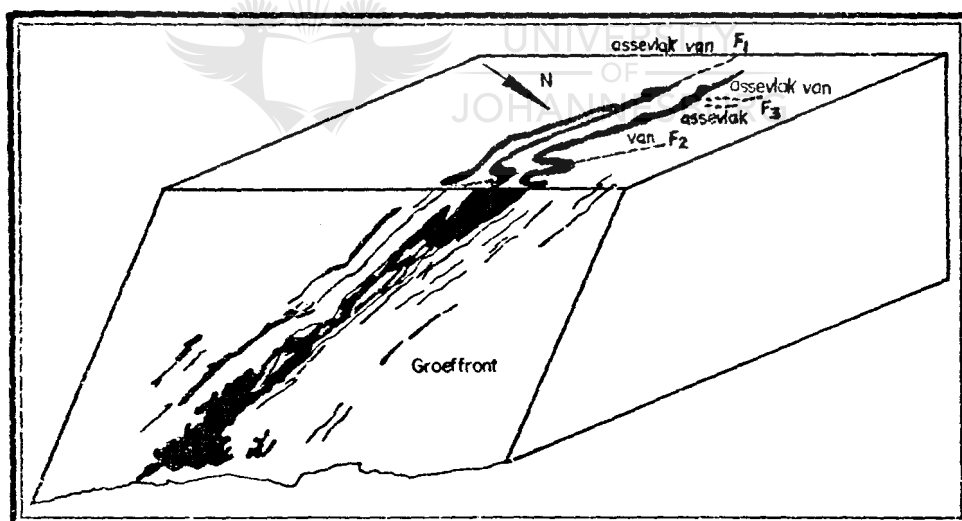
As gevolg van die interferensie van hierdie verskillende periodes van vervorming ontstaan ingewikkelde makroplooistrukture soos byvoorbeeld geïllustreer word deur die plooi patroon direk noord en noord-oos van Bandelierkopstasie (Fig. 2).

'n Verdere belangrike gevolgtrekking wat uit Du Toit se ondersoek geblyk het is dat die Ortopirokseen- en Ortoamfiboolsones aan presies dieselfde vervormingsgeskiedenis onderworpe was. Beide meso- en makroskopiese strukture kan onversteurd oor die Ortopirokseenreaksie-isograad gevolg word en dit lyk dus asof metamorfose die laaste periode van vervorming oorleef het.

3.3 VERWANTSKAP TUSSEN ANATEKTIESE GEBEURTENISSE EN VERSKILLENDE PLOOIPERIODES

Die verband tussen anatektiese gebeurtenisse en die struktuurgeskiedenis van die gebied word veral duidelik geïllustreer deur die dagsome van die Pelitiese gneis in die groef 3 km oos van Bandelierkopstasie. Hierdie groef is in detail deur Du Toit gekarteer wat verskeie anatektiese gebeurtenisse kon identifiseer. Die volgende verskillende leukokratiese anatektiese are en liggame is veral opvallend in hierdie groef.

- (i) Een van die oudste anatektiese gebeurtenisse word verteenwoordig deur leukokratiese are wat byna onherkenbaar in die hoofmaaksel (F_1/F_2 -foliasie) van die Pelitiese gneis opgefrommel is.
- (ii) Die mees opvallende kenmerk van hierdie dagsoom is egter die teenwoordigheid van leukokratiese bande in die westelike wand van die groef (Fig. 3b). Die drie-dimensionale verwantskap van hierdie leukokratiese bande tot die F_1/F_2 -periodes van vervorming word in figuur 6 geïllustreer. Dit is dus duidelik dat die ontwikkeling van hierdie leukokratiese anatektiet die F_2 -periode van vervorming voorafgegaan het en moontlik ook F_1 .



Figuur 6 Diagramatiese skets van A_2 -anatektieke deur F_1/F_2 -vervorm en met die latere F_3 daarop afgedruk. Vroeëre lineasies amper in vlak van groef-front. (Du Toit, in voorbereiding).

- (iii) Die dwarsnydende leukokratiese liggaam in die oostelike ingang van die groef is eweneens opvallend (Fig. 5b). Alhoewel dit nie uit die rotsverhoudings blyk nie is dit duidelik dat hierdie liggaam ook voor F_2 ingeplaas is. Dit word geïllustreer deur die teenwoordigheid van stringe

van granaat en biotiet in die leukokratiese liggaam wat 'n afgedrukte foliasie parallel aan die hoofmaaksel (F_1/F_2 -foliasie) van die aanliggende gesteentes definieer.

- (iv) Die laaste anatektiese gebeurtenis word geïllustreer deur die teenwoordigheid van onvervormde leukokratiese are in die assevlakke van F_3 -plooie. Hierdie anatektiese gebeurtenis is nie baie opvallend nie maar het duidelik na die F_3 -periode van vervorming plaasgevind.

Drie anatektiese gebeurtenisse kon dus duidelik in hierdie groef geïllustreer word. Die afgeplatte leukokratiese are in die hoofmaaksel van die Pelitiese gneis, en die leukokratiese bande in die westelike wand van die groef, verteenwoordig van die vroegste anatektiese gebeurtenisse, terwyl die dwarssnijdende liggaam in die oostelike ingang van die groef moontlik aan 'n latere anatektiese gebeurtenis gekoppel is. Die onvervormde anatektiese are wat in F_3 -assevlakke waargeneem word verteenwoordig dan die laaste anatektiese gebeurtenisse in die gebied.

Dit is uit hierdie bespreking dus duidelik dat die ontwikkeling van anatektiese smelte oor 'n baie groot tydinterval plaasgevind het. 'n Laaste opvallende waarneming wat in hierdie groef gemaak kon word is die goed ontwikkelde F_3 -maaksel wat in dagsome van die Pelitiese gneis in die suidelike gedeelte van die groef geïdentifiseer is. Hierdie maaksel word gedefinieer deur afwisselende donker en ligte bande. Die donker bande bestaan hoofsaaklik uit granaat, hipersteen, biotiet en kordiëriet, terwyl kwarts en plagioklaas in die ligte bande gekonsentreer is. Die belangrikste gevolgtrekking wat hier gemaak kan word is dat minerale soos granaat, kordiëriet en hipersteen gedurende of voor die laaste periode van vervorming (F_3) stabiel was. Hierdie waarneming is veral belangrik omdat F_3 -maaksels baie selde in dagsome geïdentifiseer kan word.

Die verwantskap tussen metamorfose en plooiing word in Afdeling XI bespreek.

3.4 REGIONALE SKUIFSKEURSONES

Verskeie skuifskeursones is in die gebied geïdentifiseer wat deur Du Toit gekarteer is (Fig. 2). Die belangrikste hiervan is die Ntabalala skuifskeursones en die Koedoesrivierlineament. Die Ntabalala skuifskeure begin in die suidwestelike gedeelte van die Matok-granietplutoon en strek in 'n noord-oostelike rigting (Fig. 2). Hierdie skuifskeursones wissel van 100 meter tot nagenoeg 300 meter in wydte, is linkslateraal van aard, en vertoon 'n horisontale verplasing van ongeveer 8 km op die Bandelierkop-Formasie. Die Ntabalala skuifskeursone sny deur die Matok-granietplutoon, terwyl die Palmietfonteingraniet weer intrussief in hierdie skuifskeursone is.

Die Koedoesrivierlineament is 'n 4 km wye sone suidoos van die Schiel-alkaliekompleks waardeur 'n swerm skuifskeursones loop (Fig. 2). Hierdie lineament is ongeveer parallel aan die Ntabalala skuifskeursone en vertoon ook 'n linkslaterale sin van horisontale beweging.

'n Belangrike waarneming wat op hierdie stadium gemaak kan word is dat skuifskeuring geen rol gespeel het in die regionale verspreiding van metamorfe sones in die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfekompleks nie. Die skuifskeursones sny deur, en verplaas, ouer strukture in beide die Ortopirokseen- en Ortoamfiboolsones en is duidelik later as die metamorfose. Hierdie waarneming is in direkte teenstelling met die voorstel van Mason (1973, p. 475 en p. 480) dat skuifskeurvervorming 'n hoofrol gespeel het in die metamorfe ontwikkeling van die gebied onder bespreking.

3.5 OUDERDOM

Die belangrikste geochronologiese gebeurtenisse in die gebied kan kortliks as volg opgesom word:

- (i) Die leukokratiese anatektiete en die Pelitiese gneis in die groef by Bandelierkop het 'n ouderdom van ongeveer 2 636 m.j. (Barton en Ryan, 1978). Hierdie ouderdom is dus waarskynlik verteenwoordigend van die laaste periode van hoë-gradse metamorfose in die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfekompleks.
- (ii) Naby die einde van hierdie tektono-metamorfe gebeurtenis word die Matok-granietplutoon as 'n laat-sintektoniese liggaam by ongeveer 2 655 m.j. (Barton en Ryan, 1978) langs die Ortopirokseenreaksie-isograad ingeplaas. Die volgende plutoniese gebeurtenis is die inplasing van die Schiel-siëniëplutoon by ongeveer 2 572 m.j. (Barton, persoonlike mededeling). Teen ongeveer 2 500 m.j. kom alle tektonisme tot 'n einde, en dit word gekenmerk deur die inplasing van die Palmietfonteingraniete (met 'n ouderdom van 2 500 m.j.; Barton, persoonlike mededeling) wat geen tekens van vervorming vertoon nie.
- (iii) Die Ntabalala skuifskeursone is jonger as die Matok-granietplutoon en word deur die Palmietfonteingraniet ingedring. Hierdie skuifskeursone het dus tussen 2 600 en 2 500 m.j. gelede ontwikkel. Die Koedoesrivierlineament het waarskynlik dieselfde ouderdom.
- (iv) Die laaste termiese gebeurtenis in die gebied het by ongeveer 2 000 m.j. plaasgevind en word weerspieël in die Rb-Sr verhouding van sekere minerale soos byvoorbeeld biotiet (Ryan, persoonlike mededeling). Hierdie termiese gebeurtenis het egter nie met vervorming gepaard gegaan nie.

AFDELING 111

METODES EN TERMINOLOGIE

WAT IN DIE METAMORFE

ONDERSOEK GEBRUIK IS

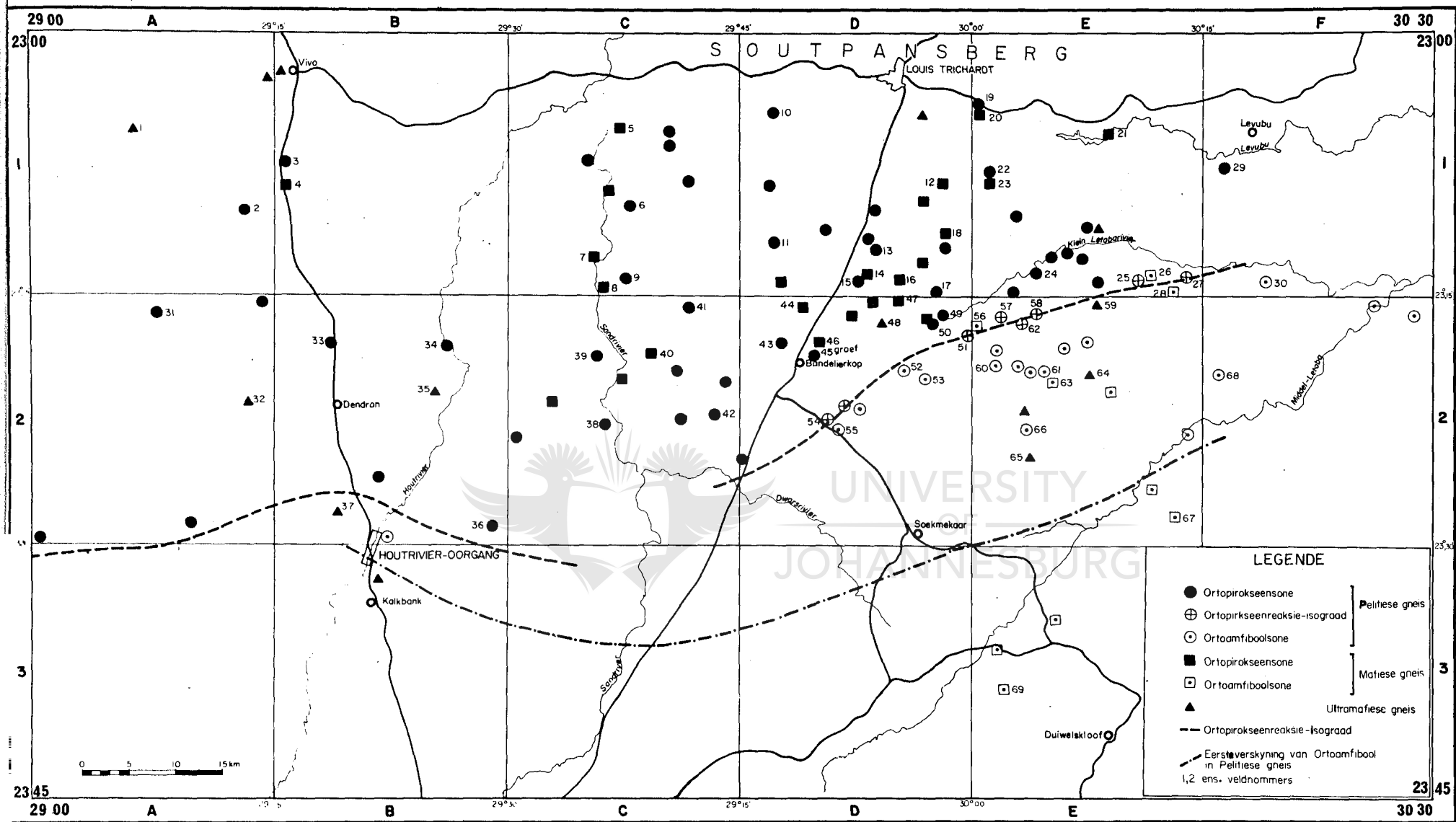


1. MONSTERVERSAMELING

Die benadering wat gedurende hierdie ondersoek gebruik is om verskillende aspekte van metamorfose te ondersoek kan in twee fases onderverdeel word. Gedurende die eerste stadium van ondersoek is monsters op 'n regionale basis versamel met die doel om regionale variasies in die graad van metamorfose te identifiseer, en om die verskillende metamorfe sones by benadering te omlin. Die voorlopige petrografiese en chemiese ondersoek van die regionale aspekte van metamorfose is opgevolg met 'n detail studie van die proses van metamorfose. Gedurende hierdie stadium is spesifieke lokaliteite uitgesonder met die doel om die oorgang van een metamorfe sone na 'n ander in detail te ondersoek, en ook om die metamorfe ontwikkeling van die gebied in verband te bring met die vervormingsgeskiedenis.

1.1 REGIONALE VERSAMELING VAN MONSTERS

Die metamorfe ondersoek het in Januarie 1973 'n aanvang geneem met die versameling van verteenwoordigende monsters van die Baviaanskloofgneis en die verskillende lede van die Bandelierkop-Formasie op 'n ruitnet van 10 X 10 km wat 'n oppervlakte van nagenoeg 9 500 km² gedek het. Hierdie benadering is genoodsaak omdat die regionale karteringsprojek, wat deur Du Toit (in voorbereiding) onderneem is, terselfdertyd 'n aanvang geneem het. Op daardie stadium was daar geen inligting beskikbaar in verband met die regionale verspreiding van gesteentetipes, of enige aspekte van regionale metamorfose nie. Die poging om verteenwoordigende monsters op 'n statistiese basis te versamel het egter gou onprakties blyk te wees as gevolg van die swak dagsome in die gebied. Deur gebruik te maak van lugfotos en 1:50 000 topokaarte is 160 lokaliteite egter uiteindelik oor die hele gebied besoek, en ongeveer 270 monsters is



Figuur 7 : Regionale verspreiding van monsters van die Pelitiese, Mafiese en Ultramafiese gneis. Veldnommers verwys na monsters waarvoor chemiese analiese beskikbaar is (Tabelle 7, 9 en 10).

versamel. Die regionale verspreiding van monsters van die Pelitiese, Mafiese en Ultramafiese gneis word in figuur 7 gegee. Die voorlopige petrografiese ondersoek van hierdie monsters was 'n aanduiding dat die grootste gedeelte van die Limpopo-metamorfekompleks suid van die Soutpansberge onderlê word deur metamorfe gesteentes van die granulietfasies van metamorfose, en dat die graad van metamorfose suidwaarts afneem. 'n Tentatiewe posisie vir 'n isograad, wat die verskyning (of verdwyning) van hipersteen in die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie definieer, kon ook op hierdie stadium geïdentifiseer word. Hierdie Ortopirokseenisograad skei die Ortopirokseensone in die noorde van die Ortoamfiboolsone na die suide (Fig. 2 en 7). 'n Verdere belangrike waarneming wat op grond van die regionale ondersoek gemaak kon word was dat die gesteentes van die Ortopirokseensone onderworpe was aan meer as een periode van hoë-graadse metamorfose.

1.2 DIE DETAIL ONDERSOEK VAN SPESIFIEKE LOKALITEITE

Spesifieke lokaliteite vir detail studies is in noue samewerking met Du Toit (in voorbereiding) uitgesonder. Hierdie lokaliteite is vir die volgende doeleindes uitgesoek:

- (i) om die werklike posisie van die Ortopirokseenisograad akkuraat te bepaal;
- (ii) om die reaksie te ondersoek wat aanleiding gegee het tot die verdwyning van hipersteen in die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie;
- (iii) om die verwantskap tussen opeenvolgende periodes van metamorfose en plooiing te ondersoek.

Vir hierdie doel is daar uitsluitlik gekonsentreer op dag-some van die Pelitiese en Mafiese gneis van die Bandelierkop-Formasie. Die rede hiervoor is tweeledig: In die

eerste plek verteenwoordig hierdie twee gesteentetipes die enigste lede van die Bandelierkop-Formasie wat redelik deurlopend oor die hele gebied dagsoom (Fig. 2). Die chemiese en mineralogiese samestelling van hierdie gesteentes stem in die tweede plek baie goed ooreen met dié van sintetiese sisteme waarvoor eksperimentele inligting by hoë temperatuur en druk beskikbaar is (Afd. V).

Die akkurate posisie van die Ortopirokseenisograad word in figuur 7 geïllustreer. In die sentrale en oostelike gedeelte van die gebied (d.w.s. oos van die Matok-granietplutoon in Fig. 2) is die posisie van die isograad op waargenome metamorfe reaksies gebaseer. Wes van die Matok-granietplutoon is dagsome uiters swak en hier is die posisie van die isograad gebaseer op die verdwyning van hipersteen in die Pelitiese gneis. Weens die goed gedefinieerde karakter van die Ortopirokseenisograad in figure 2 en 7 word hierdie oorgang vir die doeleindes van die res van die ondersoek as 'n spesifieke metamorfe sone beskou. Die gebied word dus uit 'n metamorfe oogpunt onderverdeel in 'n Ortopirokseensone, 'n Ortopirokseenisograad en 'n Ortoamfiboolsone (Fig. 7).

'n Lyn wat die eerste verskyning van ortoamfibool in die Pelitiese gneis definieer, word ook in figuur 7 aangedui. Die posisie van hierdie lyn is egter baie tentatief en kon nie akkuraat bepaal word nie as gevolg van die gebrek aan dagsome.

2. LABORATORIUMONDERSOEK

2.1 PETROGRAFIE

Monsters van die Pelitiese en Mafiese gneis van die Bandelierkop-Formasie is mikroskopies ondersoek deur gebruik te

maak van ten minste twee, en soms tot vier, slypplaatjies van dieselfde handmonster. Die afwesigheid van kordiëriet in sommige monsters van die Pelitiese gneis in die Ortopirokseensone, en in die meeste monsters van die Ortoamfiboolsonne, is in alle gevalle deur middel van X-straal-diffraksie bevestig. Dieselfde metode is gebruik om kianiet in sommige monsters van die Pelitiese gneis te identifiseer. Die Pelitiese gneis bevat min of geen K-veldspaat, en die teenwoordigheid of afwesigheid van hierdie mineraal is ook deurgaans bevestig deur gebruik te maak van ets- en vlektoetse.

Die samestelling van plagioklaas is konoskopies met behulp van 'n 4-assige universele draaitafel bepaal in gevalle waar mikrosonde analyses nie beskikbaar was nie. Dieselfde metode is gebruik om die optiese assehoek van antofilliet en gedriet te bepaal.

Die modale samestelling van verteenwoordigende monsters van die Pelitiese en Mafiese gneis is verkry deur van twee verskillende metodes gebruik te maak. Die Pelitiese gneis in die Ortopirokseensone word deur komplekse vergroeiings en reaksieteksture gekenmerk, en die modale samestelling van hierdie monsters kon slegs by benadering bepaal word deur van die Swift outomatiese punteteller gebruik te maak. Twee slypplaatjies per monster is vir die puntetellings gebruik. In die geval van die res van die monsters is die modale samestellings visueel geskat deur gebruik te maak van kaarte wat vir hierdie doel deur Terry en Chillingar (1955) opgestel is. Hierdie metode verseker 'n akkuraatheid van binne vyf persent, en het die voordeel dat 'n groot aantal modale analyses vinnig gedoen kan word. Ook in hierdie geval is twee slypplaatjies per handmonster gebruik.

2.2 TOTALE CHEMIESE ANALISES

Hoof- en spoorelement chemiese analises van verteenwoordigende monsters van die Pelitiese, Mafiese en Ultramafiese gneis is met behulp van X-straalfluoresensiemetodes bepaal. Hierdie analises is van die volgende instansies verkry: General Superintendance Company (South Africa) (Edms) Bpk., Die Nasionale Instituut vir Metallurgie, die privaatfirma Bergström en Bakker en die Geologiese Opname. Die totale aantal monsters waarvoor chemiese analises beskikbaar is kan as volg onderverdeel word:

Die Pelitiese gneis	: Ortopirokseensone	: 30 analises
	Ortopirokseenisograad	: 10 analises
	Ortoamfiboolsone	: 10 analises
Die Mafiese gneis	: Ortopirokseensone	: 15 analises
	Ortoamfiboolsone	: 6 analises
Die Ultramafiese gneis	:	: 8 analises

2.3 MIKROSONDE ANALISES

Granaat, kordiëriet, hipersteen, biotiet, plagioklaas, spinel, antofilliet en gedriet in die Pelitiese gneis, en plagioklaas in die Mafiese gneis, is geanaliseer met behulp van 'n rekenaarbeheerde ARL model SEMQ nege-spektrometer elektronmikrosonde by die Anglo American Navorsingslaboratoriums in Johannesburg. Die analises is deur Graham Hutchinson uitgevoer. Enkele analises van hipersteen en biotiet in dieselfde gesteentes is deur E.A. Viljoen op 'n ARL model EMX elektronmikrosonde by die Nasionale Instituut vir Metallurgie gedoen. Hipersteen, ougiet en hornblende in die Mafiese gneis is geanaliseer met 'n rekenaarbeheerde GEOL JXA-50 A elektronmikrosonde by die Geologiese Opname in Pretoria. Die analitikus is Len Esterhuizen. Die

prosedures wat gebruik is kan direk van bogenoemde instansies verkry word.

Die grootste gedeelte van hierdie detail chemiese ondersoek is beperk tot monsters van die Pelitiese gneis, terwyl relatief minder aandag geskenk is aan die Mafiese gneis. In beide gevalle is slegs gebruik gemaak van monsters waarin die minerale geen, of uiteraars min, tekens van verandering vertoon. Die monsters is verder uitgesoek om aan die volgende vereistes te voldoen:

- (i) Die monsters is verteenwoordigend van al die mineralogies verskillende variasies van die Pelitiese gneis in beide die Ortopirokseen- en Ortoamfiboolsones.
- (ii) Die monsters is uitgesoek om 'n maksimum verspreiding oor die hele gebied te probeer verseker.
- (iii) Die meeste analyses is verkry van monsters wat deur opvallende reaksieteksture gekenmerk is.

Elke geanaliseerde posisie is vooraf met behulp van 'n Polaroid mikrofotokamera gefotografeer om 'n goeie kontrole vir die analitiese punte te verseker. Hierdie punte is vooraf uitgesoek en op die foto's gemerk.

Dit kan laastens genoem word dat beide die totale chemiese analyses en mikrosonde analyses verkry is van dieselfde handmonsters wat ook vir die petrografiese ondersoek gebruik is.

2.4 TERMINOLOGIE EN AFKORTINGS

Die volgende terme word in hierdie ondersoek in 'n beperkte sin gebruik:

- Granuliet : Verwys na die granulietfasies van regionale metamorfose
- Granoliet : Verwys na spesifieke gesteentes wat kenmerkend is van die granulietfasies (Winkler, 1974, p. 248).
- Ortopirokseensone : Hierdie term word deurgaans in die plek van granulietfasies gebruik.
- Granaatgranoliet : 'n Versamelnaam wat gebruik word om al die mineralogies verskillende lede van die Pelitiese gneis in die Ortopirokseensone te beskryf.
- Hipersteen-ougiet-granoliet : 'n Versamelnaam wat gebruik word om monsters van die Mafiese gneis in die Ortopirokseensone te beskryf.
- Ortoamfiboolsone : Verwys na die metamorfe sone suid van die Ortopirokseenreaksie-isograad, en noord van die lyn wat die eerste verskyning van ortoamfibool in die Pelitiese gneis definieer (Fig. 7).
- Ortoamfiboolgneis : 'n Versamelnaam vir monsters van die Pelitiese gneis in die Ortoamfiboolsone.
- Amfiboliet : Versamelnaam vir monsters van die Mafiese gneis in die Ortoamfiboolsone.
- Ortopirokseenreaksie-isograad : Hierdie term word gebruik om die metamorfe oorgang van die Ortopirokseensone na die Ortoamfiboolsone te beskryf.
- Die term reaksie-isograad verwys na 'n isograad wat aan 'n spesifieke metamorfe reaksie gekoppel is. Hierdie reaksie-isograad definieer in werklikheid 'n reaksie wat aanleiding gee tot die verdwyning, en nie die eerste verskyning van hipersteen in die Pelitiese gneis, en behoort dus in werklikheid as die Ortoamfiboolreaksie-isograad bekend te staan. Die term Ortopirok-

seenreaksie-isograad word egter hier verkies om moontlike verwarring uit te skakel. Dit is so omdat hierdie isograad die granulietfasies van die ambibolietfasies skei. Die term Ortopirokseenisograad word soms ook gerieflikheidshalwe gebruik.

Koronatekstuur of reaksiekorona : Hierdie term word deurgans gebruik om 'n baie opvallende tekstuur in die granaatgranoliete te beskryf waarin granaat omring en vervang word deur 'n vergroeiing van kordiëriet en hipersteen.

M_1 , M_2 en M_3 : Hierdie notasie verwys onderskeidelik na die eerste, tweede en derde periodes van metamorfose wat in die gebied geïdentifiseer is.

Bo en behalwe standaard chemiese en fisiese (metries) simbole word die volgende ook gebruik:

P_s = totale druk

P_f = druk van die fluïde fase

P_{H_2O} = gedeeltelike waterdruk

μ_{H_2O} = chemiese potensiaal van H_2O

f_{O_2} = fugasiteit van suurstof

T = temperatuur in grade Kelvin

$T^\circ C$ = temperatuur in grade celsius

K_d = verdelingskoëffisiënt

K_b = Kilobar. Druk word in die geologiese literatuur selde in SI eenhede (Newton m^{-2} of Pa) gegee, maar altyd in bar of kbar (Wood en Fraser, 1976).
 $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Nm}^{-2}$.

Die volgende mineraalafkortings word ook gebruik:

Ab : Albiet

Alm : Almandiet
An : Anortiet
Ant : Antofilliet
Ap : Apatiet
Biot : Biotiet
Cpx : Klinopirokseen
Ged : Gedriet
Graf : Grafiet
Gran : Granaat
Gross : Grossulariet
Hbl : Hornblende
Hip : Hipersteen
Ilm : Ilmeniet
Kian : Kianiet
Kord : Kordiëriet
Mt : Magnetiet
Opx : Ortopirokseen
Pirok : Pirokseen
Pl : Plagioklaas
Py : Piroop
Qz : Kwarts
Sil : Sillimaniet
Sp : Spinel
Spess : Spessartiet
Sulf : Sulfiedes



AFDELING 1 V

PETROGRAFIESE ONDERSOEK

VAN DIE PROSES VAN

METAMORFOSE AAN DIE HAND

VAN DIE PELITIESE EN

MAFIESE GNEIS VAN DIE

BANDELIERKOP-FORMASIE



1. DIE PELITIESE GNEIS

Die Pelitiese gneis bestaan uit 'n groot verskeidenheid minerale wat aanleiding gee tot 'n groep gesteentes met grootliks verskillende mineralogiese samestellings. Die mees opvallende regionale variasies in mineralogie word geïllustreer deur die teenwoordigheid en/of afwesigheid van kordiëriet, hipersteen en ortoamfibool wat verband hou met variasies in die intensiteit van metamorfose. Die regionale verspreiding van metamorfe sones (Fig. 7) word uitstekend deur hierdie groep gesteentes gedefinieer, en in die lig hiervan is dit beide sinvol en prakties om die mineralogie van die Pelitiese gneis in die drie gedefinieerde sones afsonderlik te bespreek. Hierdie benadering word onderskryf deur die isochemiese karakter van die Pelitiese gneis in die verskillende sones, soos in figuur 18c (Afd. V) geïllustreer word.

Vir die doel van hierdie ondersoek word die petrografiese karakter van die Pelitiese gneis in die verskillende metamorfe sones eers uit 'n algemene oogpunt beskryf. Hierdie algemene beskrywing word dan opgevolg met 'n detail petrografiese ondersoek van die petrogeneties belangrike mineraalversamelings en reaksie-verwantskappe.

1.1 ALGEMENE PETROGRAFIESE EIENSKAPPE VAN DIE PELITIESE GNEIS IN DIE VERSKILLENDE METAMORFE SONES

1.1.1 Die Ortopirokseensone

Die term granaatgranoliet word gerieflikheidshalwe as 'n versamelnaam gebruik om die mineralogies verskillende variasies van die Pelitiese gneis in die Ortopirokseensone te beskryf. Sommige van hierdie gesteentes bevat wel geen granaat nie

(tabel 1), maar hierdie mineraal verteenwoordig steeds die mees opvallende metamorfe mineraal in die grootste volume dagsome van die Pelitiese gneis in hierdie metamorfe sone. Al hierdie gesteentes word egter deur die teenwoordigheid van hipersteen gekenmerk, en voldoen dus aan die vereistes wat gestel word vir die definisie van granoliete en die granulietfasies van metamorfose (Winkler, 1974; Winkler en Sen, 1973).

Die bruin tot persbruin, en middel- tot grofkorrelrige granaatgranoliete kan op grond van die detail mikroskopiese ondersoek van 80 verteenwoordigende monsters in vier groepe onderverdeel word. Die mineralogiese samestelling en benaming van elke groep word in tabel 1 gegee.

Tabel 1 Mineralogiese onderverdeling en benaming van die vier groepe granaatgranoliete in die Ortopirokseensone

Naam	Mineralogiese samestelling
1. Kordieriet-granaat granoliete	Kordieriet+granaat+hipersteen+biotiet+kwarts+plagioklaas+K-veldspaat+spinel+kianiet
2. Granaatvrye kordieriet-granoliete	Kordieriet+hipersteen+biotiet+kwarts+plagioklaas+spinel+kianiet
3. Kordierietvrye granaat-granoliete	Granaat+hipersteen+biotiet+kwarts+plagioklaas
4. Hipersteen-biotiet-granoliete	Hipersteen+biotiet+kwarts+plagioklaas

Die vier groepe gesteentes in tabel 1 is in volgorde van afnemende frekwensie van verspreiding gerangskik. Apatiet, sirkoon en grafiet is bykomstige minerale in elke groep, terwyl ertsminerale hoofsaaklik deur sulfiedes (chalcopiriet en pirrotiet) verteenwoordig word.

Die kordiëriet-granaatgranoliete verteenwoordig die belangrikste groep gesteentes terwyl die res 'n ondergeskikte ver-

spreiding in die gebied besit. Die granaatgranoliete vertoon dus as 'n groep redelik groot verskille in mineralogie alhoewel die litologiese karakter baie min van een dagsoom na 'n ander verskil. Dit is verder belangrik om daarop te let dat die verskillende groepe gesteentes intiem geassosieer is en algemeen tussengelaagd in dagsome voorkom.

Die granaatgranoliet word as 'n groep verder gekenmerk deur 'n onreëlmatige gebande en gneisagtige voorkoms, 'n groot variasie in tekstuur, en 'n heterogene verspreiding van die samestellende minerale. Die gebande voorkoms is nie altyd opvallend in handmonsters nie, maar word in dagsome sterk beklemtoon deur die teenwoordigheid van onreëlmatige bande, lensies en are van leukokratiese materiaal. Mikroskopies word die gneisagtige karakter gedefinieer deur 'n swak voorkeuroriëntasie van biotiet, en soms ook deur die verlengde voorkoms van minerale soos kwarts, hipersteen en granaat.

Die tekstuur van die meerderheid van hierdie gesteentes is baie wisselvallig en soms uiters kompleks as gevolg van groot variasies in korrelgrootte, die teenwoordigheid van verskillende porfiroblaste, reaksieteksture en wisselvallige korrelgrensverwantskappe. Die objektiewe beskrywing van mikroteksture word verder bemoeilik aangesien die meeste klassifikasiemodelle vir die teksture van veral granoliete 'n genetiese inslag het en moeilik prakties toegepas word (Katz, 1968; Moore, 1970 en Collerson, 1974). Om hierdie probleme te oorbrug word gebruik gemaak van 'n suiwer beskrywende benadering wat nie slegs eenvoudig is nie maar wat ook algemeen op die granoliete as 'n groep van toepassing is.

Collerson (1974) het 'n beskrywende model voorgestel op grond waarvan mikroteksture baie maklik in drie groepe onderverdeel kan word, naamlik granoblasties, granoblasties verleng en anastomeerteksture. Die term "granoblasties" beskryf hier 'n mikrotekstuur wat bestaan uit 'n mosaïek van onewekorrelrige kristalle. Elke groep kan verder omskryf word

in terme van absolute en relatiewe korrelgrootte en korrelgrensverwantskappe. Hierdie model het egter die nadeel dat die onderverdeling van korrelgrensverwantskappe in sewe verskillende klasse onprakties word in gevalle waar hierdie teksturele eienskap wisselvallig is in dieselfde slypplaatjie (Collerson, 1974, Fig. 1). Moore 1970, (Fig. 1) het in hierdie opsig 'n meer veralgemeende model voorgestel op grond waarvan korrelgrensverwantskappe in slegs drie groepe onderverdeel kan word, naamlik poligonaal, tussenlobvormig en amebvormig.

Die teksture van die middel- tot grofkorrelrige granaatgranoliete kan na aanleiding van Collerson (1974) en Moore (1970) se voorstelle beskryf word as wisselende vanaf porfiroblasties tot granoblasties onewekorrelrig en tussenlobvormig.

Die benamings in tabel 1 word deurgaans in die res van hierdie bespreking gebruik om die vier verskillende groepe granaatgranoliete te beskryf. Monsters van elke groep word nie individueel beskryf nie, alhoewel daar wel na individuele monsters verwys word indien van toepassing.

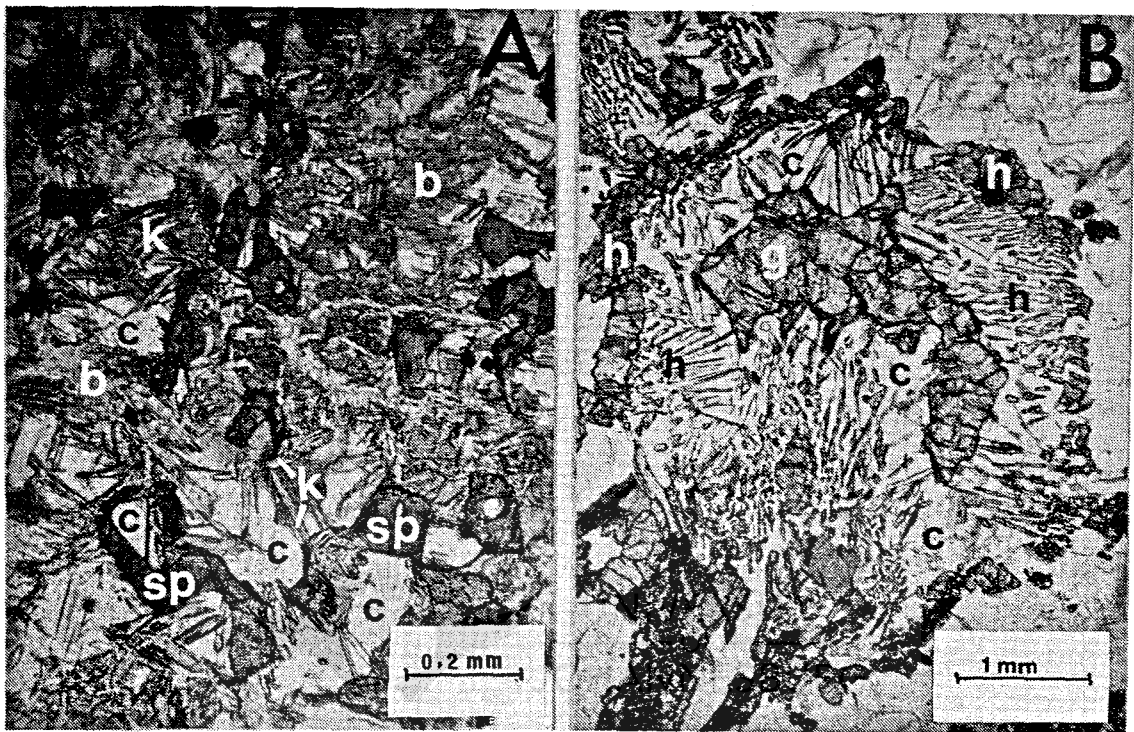
1.1.1.1 Kordiëriet-granaatgranoliete

Hierdie gesteentes besit 'n baie groot verspreiding in die Ortopirokseensone en verteenwoordig meer as 65 persent van die verskillende lede van die granaatgranoliet in tabel 1. Die kordiëriet-granaatgranoliete is mikroskopies baie kompleks en word deur die volgende opvallende teksturele eienskappe gekenmerk:

- (i) Onreëlmatige en nie-deurlopende sones (1-2 mm breed) wat hoofsaaklik uit kordiëriet en biotiet bestaan.
- (ii) Koronateksture waarin granaat, kordiëriet en hipersteen 'n opvallende reaksie-verwantskap

besit (Fig. 8b).

- (iii) 'n Onwekorrige en tussenlobvormige grondmassa wat uit kwarts, plagioklaas, hipersteen en biotiet, met ondergeskikte pertiet bestaan.



Figuur 8 : a. Insluitsels van spinel (sp) in kordieriet (c)-DR.19.
Let daarop dat spinel ook insluitsels van kordieriet
bevat en verder ook in kontak is met die vergroeiing
tussen biotiet (b) en kianiet (k)

b. Assosiasie van granaat, kordieriet en hipersteen in koronateksture van die kordieriet-granaatgranoliete. Die kern van die tekstuur bestaan uit granaat (g) wat deur 'n simplektitiese vergroeiing van kordieriet (c) en hipersteen (h) vervang word

Die verskillende teksturele omgewings is nie altyd kenmerkend van elke individuele monster in hierdie groep nie. Enkele monsters word byvoorbeeld deur al hierdie omgewings gekenmerk, maar in die algemeen is slegs die laaste twee teksturele omgewings in al die monsters geïdentifiseer wat ondersoek is. Die modale samestelling van die kordieriet-granaatgranoliete word in tabel 2 gegee.

Tabel 2 Modale samestelling (volumeperセント) van verteenwoordigende monsters van die granaatgranoliet.
Die persentasie anortiet in plagioklaas word in hakkiess gegee. m < 1%. Ertis = hoofsaaklik sulfiedes.

Klassifikasie	Monster	Granaat	Kordieriet	Hipersteen	Biotiet	Kwarts	Plagioklaas	K-veldspaat	Spinel	Kianiet	Ertis	Gratiel	
A. Kordieriet-granaat-granoliete	DR. 19	12	29	8	17	18	5(21,7)	10	1	m	m		
	DR. 54	10	12	20	10	25	22(29,6)	3		m	m	m	
	DR. 59	8	10	11	6	25	28(28,4)	12		m	m	m	
	DR. 73	1	15	9	8	40	25(27,5)	2			m	m	
	DR. 80	2	6	19	9	18	44(30)	2			m	m	
	DV. 11	7	9	19	18	27	17(30)	2		m		7	
	M.X.	5	19	16	17	23	18(32)	2				2	
	M. 309	9	10	19	16	24	21(33)	1		m		m	
	M. 333	21	15	18	14	19	9(24,3)	3	1	m	m	m	m
	R. 16	12	4	34	13	20	17				m	m	
DR. 45	19	5	11	6	7	52(28)				m			
B. Granaatvrye-kordierietgranoliete	DR. 10		43	27	10	12	7(26)		m	m	m		
	DR. 42-1		23	24	15	16	22(29,6)			m	m	m	
	M. 317		30	32	15	6	16(30)		1	m	m		
C. Kordierietvrye granaatgranoliete	DR. 42-2	10		5	11	29	45(34,3)				m		
	DV. 10	12		10	10	22	46(31)				m	m	
	DR. 124	26		20	14	16	24(33)				m		
	R. 29	8		14	36	14	28				m		
D. Hipersteen-biotietgranoliete	R. 9			60	10		30(29)		m		m		
	DR. 158			8	19	45	28(28)				m		

Kordiëriet besit 'n baie wye verspreiding in die ortopirokeensone en vertoon 'n groot variasie in korrelgrootte en voorkoms. Die mineraal wissel vanaf relatief klein en halfeievormige korrels in die biotietryke sones (0,6 mm), tot groot en onreëlmatige xenoblastiese korrels en porfiroblaste (5-6 mm) wat met hipersteen en granaat geassosieer is. Kordiëriet word redelik maklik onderskei op grond van vertweeling, lae dubbelbreking en die teenwoordigheid van geel pleochroïese ligkranses om klein sirkooninsluitels. Die vertweeling wissel grootliks in dieselfde slypplaatjie, en beide eenvoudige herhaalde vertweeling en komplekse deurdringingstweelinge is aanwesig. Die mineraal is oor die algemeen baie vars, en die kenmerkende geel-groen verweringsproduk, piniet, is slegs in enkele monsters waargeneem. Die mees algemene metamorfe veranderingsproduk van kordiëriet is 'n fynkorrelrige en matagtige vergroeiing van aluminiumsulfidaat en ortoamfibool wat later in meer detail beskryf word (Afd. IV-1.2.1.5). Die volgende assosiasies

is veral kenmerkend van die voorkomswyse van kordiëriet:

- (i) Die assosiasie met biotiet in onreëlmatige en nie-deurlopende sones. Kordiëriet in hierdie assosiasie word gekenmerk deur 'n ewekorrelrige tekstuur en deur die afwesigheid van komplekse deurdringings-tweelinge.
- (ii) Kordiëriet word soms gekenmerk deur die teenwoordigheid van talle insluitels van spinel. Die spinel vorm klein, druppelvormige en wurmagtige korrels wat geheel en al deur kordiëriet ingesluit word (Fig. 8a).
- (iii) Kordiëriet is in sommige monsters simplektities vergroei met kwarts in 'n assosiasie wat besig is om granaat en plagioklaas te vervang (Fig. 13a).
- (iv) Die mees opvallende voorkomswyse van kordiëriet is egter die assosiasie met granaat en hipersteen in komplekse koronateksture. Hierdie teksture illustreer die afbreek van granaat na 'n simplektitiese vergroeiing van kordiëriet en hipersteen (Fig. 8b).

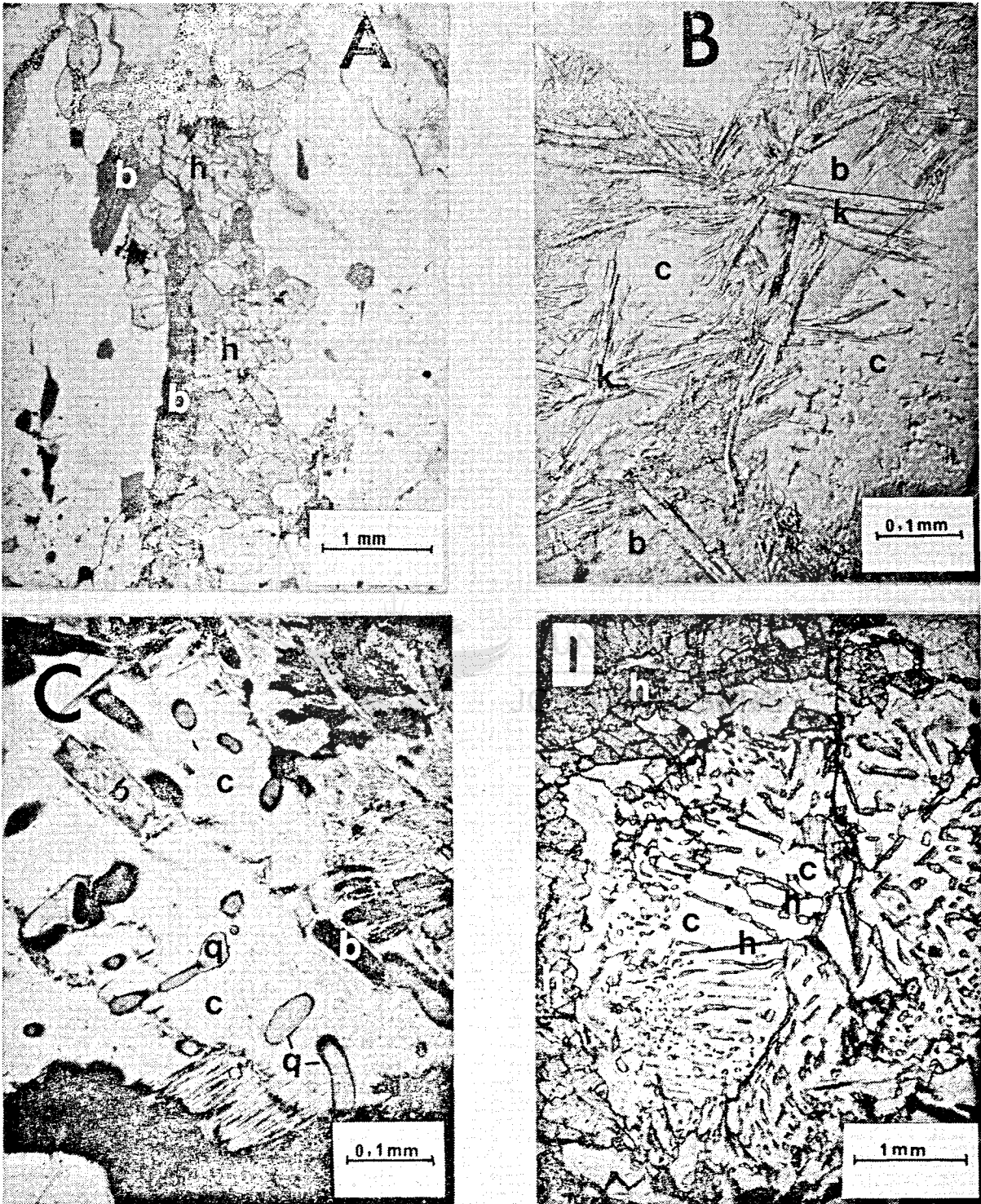
Granaat (almandiet-piroop) is die mees opvallende mineraal van die kordiëriet-granaatgranoliete en word in die meeste dagsome waargeneem as groot porfiroblaste tot 1 cm in deursnee. Mikroskopies wissel die mineraal grootliks in vorm vanaf redelik geronde tot onreëlmatige korrels wat soms in die foliasie verleng is. Die groot korrels is nooit poikiloblasties nie maar bevat soms insluitels van veral kwarts met ondergeskikte plagioklaas en biotiet. Kordiëriet kom soms ook as enkele insluitels in granaat voor, terwyl sillimaniet in 'n enkele monster (DR 19) as fyn, naaldagtige insluitels in granaat waargeneem is. Granaat word byna sonder uitsondering altyd geheel of gedeeltelik deur 'n sone van kordiëriet en wurmagtige hipersteen omring, maar is gewoonlik ook in klein hoeveelhede in die grondmassa teenwoordig, waar dit altyd met plagioklaas, en soms ook biotiet

geassosieer is. In sommige monsters (bv. DR 73) is die teenwoordigheid van granaat beperk tot enkele klein insluitels in kordiëriet.

Hipersteen is die mees kenmerkende mineraal van die granaat-granoliete en kan sonder 'n enkele uitsondering in al die monsters waargeneem word. Die mineraal is intens pleochroïes vanaf diep rooi-bruin tot bleek-groen en vertoon selde tekens van verandering. Die kenmerkende assosiasie van hipersteen is dié met kordiëriet en granaat in die koronateksture, maar hipersteen kom ook as verspreide korrels in die grondmassa voor waar dit soms intiem geassosieer is met biotiet (Fig. 9a). Hierdie assosiasie word ook soms deur die teenwoordigheid van pertiet gekenmerk. Hipersteen, biotiet en K-veldspaat verteenwoordig egter volgens Holdaway (1976, p. 303) nie 'n stabiele versameling nie, en hipersteen in hierdie versameling behoort af te breek om biotiet te vorm. Die tekstuur in figuur 9a mag moontlik 'n aanduiding van so 'n reaksie wees. Dit moet egter genoem word dat die vergroeiing tussen hipersteen en biotiet ook kenmerkend is van gesteentes wat geen K-veldspaat bevat nie. Hipersteen vertoon verder 'n groot variasie in beide vorm en korrelgrootte en kom voor as klein wurmagtige vergroeiings in kordiëriet en ook as groot, onreëlmatige en verlengde kristalle tot 1 cm in lengte. Die groter korrels bevat algemeen insluitels van kwarts en biotiet. Hipersteen in assosiasie met granaat en kordiëriet in die koronateksture vertoon die volgende verskillende voorkomsywe:

- (i) Wurmagtige korrels wat radiaal vanaf granaat in kordiëriet uitstraal (Fig. 8b).
- (ii) Meer grofkorrelrige sones wat bogenoemde assosiasies geheel of gedeeltelik van die res van die gesteente skei (Fig. 8b).

Biotiet is 'n algemene mineraal in al die granolite en kom voor in hoeveelhede wat wissel vanaf 6 tot 18 volumeperzent



Figuur 9 : a. Vergroeiing tussen biotiet (b) en hipersteen (h) DR.73
 b. Vergroeiing tussen biotiet (b) en kianiet (k) in kordieriet (c) DR.19
 c. Druppelvormige insluitels van kwarts (q) en van biotiet (b) in kordieriet (c) van 'n koronatekstuur (DR.19)
 d. Relikporfiroblaste van granaat in die granaatvrye kordieriet granoliet. Die porfiroblaste bestaan uit 'n vergroeiing van hipersteen (h) en kordieriet (c) - DR.10

van die gesteentes (Tabel 2). Die mineraal is sterk pleochroïes in skakerings van ligbruin tot rooibruin en vertoon redelike reëlmatige buitelyne, alhoewel biotiet in assosiasie met kordiëriet soms 'n toingrige voorkoms besit (Fig. 9b). Die oriëntasie van biotiet is ten dele verantwoordelik vir die gneisagtige voorkoms van die gesteentes. Die teenwoordigheid van twee generasies van biotiet word weerspieël deur twee rigtings van voorkeuroriëntasie. Die een rigting verteenwoordig die hoofmaaksel van die gesteente terwyl die tweede rigting swak ontwikkel is en 'n groot hoek met die eerste maak. Biotiet wat met kordiëriet geassosieer is word soms gekenmerk deur 'n vergroeiing met kianiet (Fig. 9b). Die kianiet vorm klein naaldagtige en stomp kristalle wat in alle moontlike oriëntasies met biotiet vergroei is. Die vergroeiing is beperk tot die assosiasie met kordiëriet en word selde of nooit in die res van die monster waargeneem nie. Die intensiteit van hierdie vergroeiing wissel baie van monster tot monster. In die meeste gevalle is die vergroeiing beperk tot klein hoeveelhede, of is geheel en al afwesig, terwyl enkele monster (bv. DR 19) gekenmerk word deur 'n intensiewe vergroeiing tussen hierdie twee minerale.

Spinel (hersiniet) is in enkele monsters, en in klein hoeveelhede, beperk tot insluitels in kordiëriet en word nooit in die res van die gesteente waargeneem nie.

Kianiet vorm nooit diskrete kristalle in die kordiëriet-granaatgranoliete nie en is altyd beperk tot die vergroeiing met biotiet (Fig. 9b). Sillimaniet is slegs in een monster (DR 19) as enkele naaldagtige insluitels in granaat waargeneem. Die identifikasie van kianiet het 'n probleem geskep, hoofsaaklik as gevolg van die fyn korrelgrootte en voorkomswyse. Die mineraal is oorspronklik as sillimaniet geïdentifiseer, maar 'n daaropvolgende identifikasie van twee enkel-kristalle, in twee verskillende monsters, met behulp van die Gandolfikamera en die ASTM-indeks, het die teenwoordigheid van kianiet, en nie sillimaniet nie, bevestig.

Kwarts vertoon veral groot verskille in korrelgrootte en wissel vanaf klein oneievormige korrels tot groot en onreëlmatige xenoblaste wat soms in die foliasie verleng is. Golwende uitdowing is kenmerkend, en die groter korrels bevat insluitels van plagioklaas, biotiet en hipersteen. Kwarts is selde of nooit in direkte kontak met granaat nie. In die koronatekstuur word kwarts soms as druppelvormige insluitels in kordiëriet waargeneem (Fig. 9c). Hierdie insluitels is soms in kontak met granaat, maar in die grondmassa word kwarts altyd deur 'n sone van plagioklaas vanaf granaat geskei.

Plagioklaas (An 22 - An 33) is altyd teenwoordig as half-eievormige tot oneievormige korrels wat algemeen polisinteties vertweeling is. Die individuele lamella is gewoonlik baie smal. Die kordiëriet-granaatgranoliete word gekenmerk deur die teenwoordigheid van beide antipertiet en plagioklaas in dieselfde monster. Die K-veldspaat komponent in die plagioklaas is teenwoordig as reëlmatige blokkige en onreëlmatige lensvormige vergroeiings. Vervormde tweelinglamella is 'n redelike algemene verskynsel van plagioklaas in die meeste monsters. Die mineraal bevat insluitels van biotiet, kwarts en soms ook hipersteen.

K-veldspaat is uitsluitlik as mikropertiet teenwoordig. Die meeste monsters bevat minder as 5 volume persent pertiet, en die mineraal is slegs in twee monsters (DR 19 en DR 59) in redelike groot hoeveelhede (tot 12 volume persent) teenwoordig (Tabel 2). Pertiet is relatief fynkorrelrig, en die oneievormige korrels kom verspreid in die grondmassa voor waar dit veral met plagioklaas geassosieer is. Hierdie assosiasie word soms gekenmerk deur die teenwoordigheid van smal sones van pertiet wat antipertiet geheel of gedeeltelik omsluit. Die K-veldspaat komponent van pertiet in hierdie sones is soms in optiese kontinuïteit met die K-veldspaat komponent van die antipertiet, en hierdie verskynsel mag moontlik 'n vervangingsmeganisme vir die ontwikkeling van die antipertiet illustreer. Die

kontak tussen pertiet en plagioklaas of antipertiet word ook in die meeste gevalle gekenmerk deur 'n smal mikroskopiese vergroeiingsone. Pertiet is in kontak met al die geassosieerde minerale met die uitsondering van granaat, en vorm ook nooit deel van die koronateksture nie.

Ertzminerale is in klein hoeveelhede in al die monsters geïdentifiseer. Hierdie minerale is hoofsaaklik sulfiedes soos chalcopiriet en pirrotiet, terwyl oksiedes, soos magnetiet en ilmeniet, ook soms in baie klein hoeveelhede teenwoordig is. Grafiet is soms ook 'n opvallende mineraal, en kom as enkele goed gevormde plaatagtige kristalle verspreid deur die gesteentes voor.

1.1.1.2 Granaatvrye kordiërietgranoliete

Die tweede groep granoliete is tekstureel en mineralogies in baie opsigte identies aan die eerste groep en die enigste opvallende verskil is die afwesigheid van granaat. Granaat is geheel en al deur kordiëriet en hipersteen vervang. Die oorspronklike porfiroblaste van granaat word egter steeds waargeneem as 'n komplekse simplektitiese vergroeiing van hipersteen en kordiëriet wat as verspreide en ineenskakelende relikporfiroblaste teenwoordig is (Fig. 9d). Die buitelyne van hierdie relikporfiroblaste word in baie gevalle steeds deur 'n smal sone van hipersteen omlyn. Die gesteentes verskil as 'n groep onderling slegs in die verhouding van die simplektitiese vergroeiings tot die res van die gesteente, en verder ook daarin dat die relikporfiroblastiese karakter nie altyd ewe opvallend is nie. Die granaatvrye kordiëriet-granolite bevat verder opvallend meer kordiëriet en hipersteen as die vorige groep (Tabel 2). Die assosiasie van spinel met kordiëriet, hipersteen met biotiet, en die vergroeiing tussen kianiet en biotiet is steeds opvallend. Die res van die gesteente is mineralogies en tekstureel identies aan die vorige

groep, met die belangrike verskil dat K-veldspaat afwesig is, en ook dat plagioklaas (An 26-30) selde of nooit antipertities is nie.

Herkristallisatie is in die meeste gevalle nie baie opvallend nie, met die uitsondering van enkele monsters wat gekenmerk word deur die afwesigheid van die simplektitiese vergroeiing van kordiëriet en hipersteen. Hierdie monsters besit 'n ewekorrelrige granoblastiese tekstuur waarin hipersteen en kordiëriet as individuele kristalle verspreid deur die gesteente voorkom (Fig. 11d). Die modale samestelling van die granaatvrye kordiërietgranoliete word in tabel 2 gegee.

1.1.1.3 Kordiërietvrye granaatgranoliete

Die derde groep granoliete bevat geen kordiëriet of K-veldspaat nie en kan baie maklik van die vorige twee groepe gesteentes onderskei word. Die gesteentes is ligter van kleur, mineralogies minder kompleks, en geen opvallende reaksieverhoudings kon waargeneem word nie. Die tekstuur van die groep as 'n geheel word gekenmerk deur verspreide porfiroblaste van granaat in 'n granoblastiese onewekorrelrige grondmassa van plagioklaas, kwarts, hipersteen en biotiet.

Die porfiroblaste van granaat is soms poikiloblasties met talle insluitels van veral kwarts en ondergeskikte plagioklaas en biotiet.

Hipersteen is in kleiner hoeveelhede as in die geval van die vorige twee groepe teenwoordig (Tabel 2), en vorm relatief fynkorrelrige kristalle met onreëlmatige buitelyne. Insluitels van kwarts, plagioklaas en biotiet is redelik opvallend, en dieselfde geld vir die vergroeiing tussen hipersteen en biotiet wat soortgelyk is as in die geval van

die vorige twee groepe granoliete.

Die res van die grondmassa is baie soortgelyk as in die geval van die vorige twee groepe granoliete. Kwarts word steeds gekenmerk deur groot verskille in korrelgrootte en die teenwoordigheid van groot xenoblastiese kristalle en verlengde korrels is steeds opvallend. 'n Baie opvallende verskil egter is dat kwarts baie algemeen in kontak is met granaat. Die voorkomswyse van plagioklaas (An 34) is ook soortgelyk aan die vorige gevalle, met die verskil dat hierdie mineraal in groter hoeveelhede teenwoordig is en ook nooit antipertities is nie. K-veldspaat is geheel en al afwesig. Biotiet is steeds 'n opvallende mineraal maar is nooit vergroei met kianiet nie - kianiet is geheel en al afwesig.

Die kordiërietvrye granaatgranoliete bevat ook klein hoeveelhede sulfiedes, terwyl grafiet soms ook in baie klein hoeveelhede teenwoordig is. Die modale samestelling van die kordiërietvrye granaatgranoliete word in tabel 2 gegee.

1.1.1.4 Hipersteen-biotietgranoliete

Die laaste groep granoliete besit 'n baie ondergeskikte verspreiding in die gebied, en die versameling hipersteen-biotiet is in werklikheid slegs in drie monsters geïdentifiseer. Twee van die drie monsters (DR 158 en DV 39) is baie soortgelyk terwyl die derde monster (R 9) grootliks in chemiese samestelling (Tabel 7b) en tekstuur verskil. Monsters DR 58 en DV 39 is middelkorrelrige gesteentes met 'n granoblasties ewekorrelrige tekstuur, en bestaan hoofsaaklik uit hipersteen, biotiet, kwarts en plagioklaas. Plagioklaas is nie antipertities nie, en K-veldspaat is afwesig. Die enigste opvallende teksturele kenmerk van hierdie gesteentes is die vergroeiing tussen biotiet en hipersteen. Kianiet is afwesig.

Die derde monsters (R 9) bevat geen kwarts of K-veldspaat nie, en bestaan hoofsaaklik uit groot porfiroblaste van hipersteen in 'n ewekorrelrige grondmassa van plagioklaas (An 29). Die plagioklaas bevat enkele insluitels van groen spinel en blou saffarien. Biotiet is in klein hoeveelhede met hipersteen geassosieerd. Die gesteente is donkergrys en massief, en vertoon geen tekens van foliasie nie. Die modale samestelling van monster R 9 en DR 158 word in tabel 2 gegee.

Die belangrikste gevolgtrekking wat op grond van hierdie voorlopige petrografiese ondersoek gemaak kan word is dat die granaatgranoliete opvallende tekens van meer as een periode van metamorfose vertoon. Dit word veral duidelik geïllustreer deur die teenwoordigheid van die reaksiekoronas wat die mees opvallende petrografiese kenmerk van beide die kordiëriet-granaatgranoliete en die granaatvrye kordiërietgranoliete is. Die petrogenetiese betekenis van hierdie reaksiekoronas word later volledig bespreek (Afd. IV-1.2.1.1).

1.1.2 Die Ortopirokseenreaksie-isograad

Die posisie van die Ortopirokseenreaksie-isograad in figure 2 en 7 word petrografies deur die teenwoordigheid van hipersteen en ortoamfibool in dieselfde gesteente gedefinieer. Die chemiese definisie van hierdie isograad op grond van die samestelling van granaat en biotiet (Afd. VI) betrek ook geassosieerde gesteentes wat geen pirokseen of amfibool bevat nie. Hierdie gesteentes sluit mineraalversamelings soos granaat+biotiet in, en kan nie petrografies van soortgelyke gesteentes in die Ortoamfiboolsone onderskei word nie. Die biotiet-granaatgneisse langs die Ortopirokseenreaksie-isograad word dus nie in hierdie afdeling bespreek nie.

Die isograadgesteentes besit litologiese eienskappe van beide die granaatgranoliete en die ortoamfiboolgneisse, en kan nie maklik in dagsome van bogenoemde twee gesteentetipes onderskei word nie. Die mineralogiese verskille is dus slegs onder die mikroskoop opvallend. Die regionale afname in die graad van metamorfose na die suide word egter baie duidelik geïllustreer deur die eerste verskyning van prismatiese amfiboolkristalle in die ortoamfiboolgneisse. Die akkurate bepaling van die werklike posisie van hierdie isograad word baie vergemaklik aangesien hierdie metamorfe struktuur oor die strekking van die gesteentes van die Bandelierkop-Formasie sny (Fig. 2). Die wydte van die isograad is in die orde van honderde meters, en kan selfs baie minder wees.

Die Pelitiese gneis langs die isograad word petrografies deur die volgende twee mineraalversamelings gedefinieer:

- (i) Granaat+hipersteen+antofilliet+biotiet.
- (ii) Granaat+hipersteen+antofilliet+kordiëriet+gedriet+biotiet+kianiet.

Kwarts, plagioklaas en ertsminerale (chalcopiriet, pirrotiet en grafiet) is kenmerkend van beide versamelings.

Die kordiërietryke versamelings besit die grootste verspreiding langs die isograad en kan mineralogies en tekstureel baie maklik met die kordiëriet-granaatgranoliete van die Ortopirokseensone gekorreleer word. Hierdie gesteentes vertoon al die opvallende eienskappe van die eerste groep granoliete, en 'n detail petrografiese beskrywing van al die samestellende minerale is dus grootliks oorbodig. Biotiet is steeds 'n kenmerkende mineraal, en die vergroeiing van kianiet met biotiet is ook opvallend. Die mineraal vertoon nie so 'n intense pleochroïsme as in die Ortopirokseensone nie, maar die verskille is slegs opvallend indien biotiet van beide sones gelyktydig onder die mikroskoop beskou word. Die gemiddelde samestelling van plagioklaas (An 30,4)

verskil ook baie min van dié in die kordiëriet-granaatgranoliete.

Die mees opvallende mineralogiese verskille tussen hierdie gesteentes en die ooreenstemmende granoliete van die Ortopirokseensone is natuurlik die teenwoordigheid van ortoamfibool terwyl kianiet ook in baie groter hoeveelhede teenwoordig is. Ortoamfibool en kianiet is vergroei met kordiëriet terwyl ortoamfibool ook mantels om hipersteen vorm. Hierdie twee minerale ontwikkel as gevolg van die hidrasie van kordiëriet en hipersteen, en hierdie hidrasie-reaksies kan van die aanvanklike tot finale stadiums gevolg word (Afd. IV-1.2.2). Die koronatekstuur van granaat, kordiëriet en hipersteen kan steeds in hierdie gesteentes geïdentifiseer word (Fig. 14c), en dit is belangrik om daarop te let dat beide kordiëriet en hipersteen in hierdie assosiasie besig is om af te breek na ortoamfibool (Afd. IV-1.2.2).

Die kordiërietvrye isograadgesteentes besit 'n beperkte verspreiding langs die isograad en is in baie opsigte identies aan die kordiërietvrye-granaatgranoliete. Die mineralogie is presies dieselfde, met die verskil dat hipersteen duidelik besig is om af te breek na antofilliet (Afd. IV-1.2.2). 'n Verdere verskil is dat biotiet algemeen om granaat vou, en ook dat granaat opvallend poikiloblasties is en meer reëlmatige buitelyne vertoon. Die insluitels in granaat is hoofsaaklik kwarts, met ondergeskikte plagioklaas en biotiet. Die gemiddelde samestelling van plagioklaas in die grondmassa is An 30,9. Die vergroeiing tussen kianiet en biotiet is, net soos in die geval van die kordiërietvrye granaatgranoliete, ook in hierdie gesteentes afwesig. Antofilliet is in kontak met al die ander minerale in die gesteente, insluitende granaat.

1.1.3 Die Ortoamfiboolsonne

Die Pelitiese gneis in die Ortoamfiboolsonne bestaan hoofsaaklik uit 'n groep geassosieerde gesteentes wat deur die afwesigheid van hipersteen en die teenwoordigheid van ortoamfibool (antofilliet en gedriet) gekenmerk word. Kordiëriet is ook nie 'n stabiele mineraal in hierdie gesteentes nie, maar word in enkele monsters waargeneem as onstabiele relikte wat altyd met ortoamfibool en kianiet vergroei is. Die enigste stabiele voorkomsywyse van kordiëriet in hierdie metamorfe sone is beperk tot twee ortoamfiboolvrye monsters waarin dit met granaat, biotiet en sillimaniet geassosieer is.

Die ortoamfiboolgneisse verskil op litologiese gronde baie min van die granaatgranoliete van die Ortopirokseensone. Die teenwoordigheid van ortoamfibool kan gewoonlik slegs by nadere ondersoek bevestig word. Hierdie gesteentes word in dagsome ook deur 'n onreëlmatige gebande voorkoms gekenmerk wat net soos in die geval van die granaatgranoliete ook deur die teenwoordigheid van konkordante en diskordante lense en liggame van leukokratiese materiaal veroorsaak word. Die gneisagtige voorkoms van hierdie gesteentes is egter baie beter ontwikkel as in die geval van die granaatgranoliete. Met 'n toename in die ortoamfiboolinhoud gaan hierdie struktuur oor in 'n nematoblastiese tekstuur wat deur die voorkeuroriëntasie van lang prismatiese amfiboolkristalle gedefinieer word.

Vir die doeleindes van die res van hierdie bespreking kan die Pelitiese gneis in die Ortoamfiboolsonne in drie hoofgesteentetipes onderverdeel word. Hierdie onderverdeling, en die ooreenstemmende mineraalversamelings, word in tabel 3 gegee.

Tabel 3 Mineralogiese onderverdeling van die Pelitiese gneis
in die Ortoamfiboolsone

Naam	Mineralogiese samestelling
1. Ortoamfiboolgneis	(i) Granaat+ortoamfibool+kianiet +biotiet+kwarts+plagioklaas
	(ii) Ortoamfibool+biotiet+kianiet +kwarts+plagioklaas
	(iii) Ortoamfibool+kwarts+plagioklaas
	(iv) Granaat+ortoamfibool+kwarts
2. Granaat-biotietgneis	Granaat+biotiet+kwarts+plagioklaas +kianiet
3. Granaat-kordieriet- sillimaniet	Granaat+kordieriet+sillimaniet+ biotiet+kwarts+plagioklaas

Die verskillende groepe gesteentes in tabel 3 is in volgorde van afnemende frekwensie van verspreiding gerangskik. Al hierdie gesteentes bevat verder ook klein hoeveelhede chalcopiriet, pirrotiet, grafiet, apatiet en sirkoon. Die modale samestelling van verteenwoordigende monsters van elke groep word in tabel 4 gegee.

1.1.3.1 Die Ortoamfiboolgneisse

Die ortoamfiboolgneisse word in tabel 3 in vier verskillende gesteentetipes onderverdeel. Die eerste twee groepe ortoamfiboolgneisse besit die grootste verspreiding in die Ortoamfiboolsone en kan slegs van mekaar onderskei word op grond van die teenwoordigheid of afwesigheid van granaat. Hierdie twee gesteentetipes word dus vir die doeleindes van die ondersoek as een groep beskryf. Die laaste twee tipes ortoamfiboolgneisse in tabel 3 verskil egter opvallend van die vorige twee groepe. Hierdie verskille word in die een geval veroorsaak deur die afwesigheid van granaat, biotiet

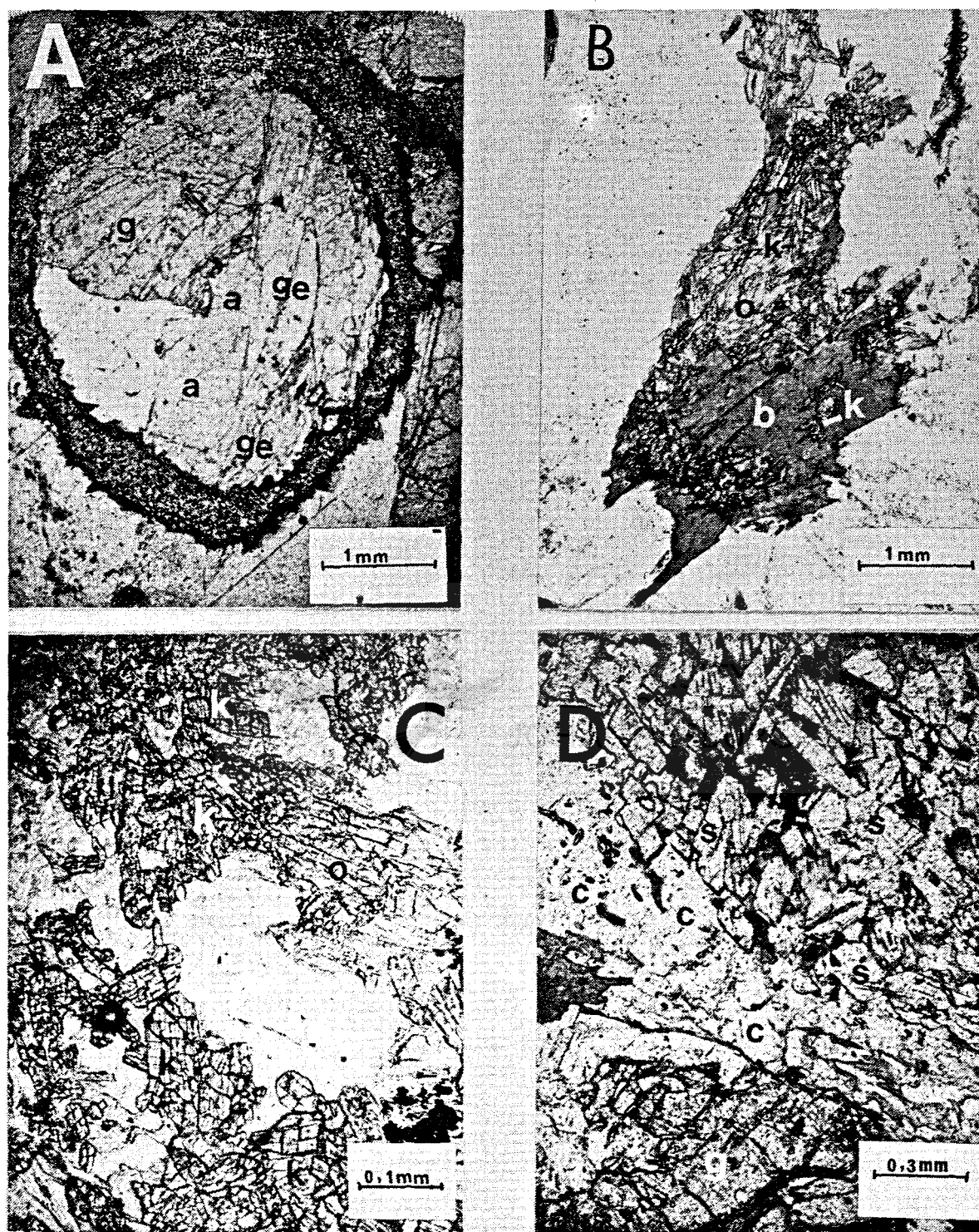
en kianiet, en in die ander geval deur die afwesigheid van biotiet, kianiet en plagioklaas.

Tabel 4 Modale samestelling (volumeperzent) van verteenwoordigende monsters van die Ortoamfiboolgneis, granaat-biotietgneis en granaat-kordiëriet-sillimanietgneis. Die persentasie anortiet in plagioklaas word in hakkieë gegee. $m < 1\%$. 1 = antofilliet en/of gedriet. 2 = vergroeiing van ortoamfibool+kianiet+kordiëriet. Erts = hoofsaaklik sulfiedes.

Klassifikasie	Monster	Granaat	Ortoamfibool ¹	Biotiet	Kianiet	Sillimaniet	Kwarts	Plagioklaas	K-veldepaat	Kordiëriet	Hiperstreen	Erts	Grafaet
A. Ortoamfiboolgneis	OV. 23	18	19	17	5		24	20(33)				m	
	OV. 43	2	12	30	6		31	25(30)					m
	DV. 53	5	23	17	7		31	24(26)					m
	OV. 2	12	35	25	11		5	23(37.6)					m
	DV. 26	12	25 ²	7			55				m		m
	M. 447	9	23	13			26	29(29)			m		m
	DV. 47	8	20	19			27	26(30.4)			m		m
	DV. 49		30	m			31	38			m		m
	DR. 184	32	20				48				m		m
	DV. 22		45	3	9		18	32(31.5)			m		m
	DV. 1		48	15	10		12	25(34)		m			m
	M. 215		37	17	13		14	19			m		m
B. Granaat-biotietgneis	DR. 150	32		26			18	24(24.7)	m				
	DR. 156	17		25			36	22(20)				m	
	DV. 29	10		38			37	17(28)				m	
	DV. 5	16		33			21	30(30)	m			m	
C. Granaat-kordiëriet-sillimanietgneis	DV. 45	13	35			6	18	7		16		m	

In die bespreking wat volg word daar slegs na ortoamfibool verwys en nie na antofilliet of gedriet nie. Beide minerale is chemies in dieselfde gesteentes geïdentifiseer (Afd. VI-1.5) maar word petrografies baie moeilik van mekaar onderskei. Die petrografiese kenmerke van die samebestaande ortoamfibole word dus later volledig bespreek (Afd. VI-1.5).

Die eerste twee groepe ortoamfiboolryke gesteentes in tabel 3 word soms gekenmerk deur die teenwoordigheid van relikporfiroblaste wat hoofsaaklik uit 'n vergroeiing van kordiëriet, ortoamfibool, kianiet en kwarts bestaan. Hierdie tekstuur is identies aan die hidrasiereaksie wat langs die Ortopirokseenreaksie-isograad beskryf is (Fig. 14a). 'n Belangrike waarneming is dat hierdie vergroeiing tussen kordiëriet, ortoamfibool en kianiet in enkele gevalle ook



Figuur 10 : a. Ewewigsverwantskap tussen gedriet (ge), Al-antofilliet (a) en granaat (g) in die biotiet- en plagioklaasvrye ortoamfiboolgneis (DR.184)
 b. Vergroeiing van biotiet (b), kianiet (k) en ortoamfibool (o) in die ortoamfiboolgneis (DV.52)
 c. Grofkorrelige kianiet (k) in die ortoamfiboolgneis (M.215)
 d. Koronas van sillimaniet (s) en kordieriet (c) om granaat (g) in die granaat-kordieriet-sillimanietgneis (DV.45)

deur die teenwoordigheid van klein relikte van hipersteen gekenmerk word. Dit is 'n aanduiding dat hierdie mineraal oorspronklik 'n groter verspreiding in die gebied besit het as wat huidig die geval is.

Granaat verskil grootliks in voorkoms van een monster na 'n ander. In die meeste monsters is granaat teenwoordig as klein verspreide korrels of as enkele groter porfiroblaste. Die mineraal vertoon altyd onreëlmatige en ingevrete buitelyste en die groot kristalle is byna altyd poikiloblasties met talle insluitels van kwarts en ondergeskikte plagioklaas en biotiet. In sommige monsters kan granaat slegs as enkele relikte waargeneem word. Die mees opvallende kenmerk van die voorkomsywyse van granaat is egter dat dit nooit, of uiteraars selde, in direkte kontak met ortoamfibool waargeneem word. Dit lyk dus asof granaat en ortoamfibool nie 'n stabiele assosiasie in hierdie gesteentes vorm nie.

Ortoamfibool is die mees kenmerkende mineraal van hierdie gesteentes en kom voor as lang prismaatiese kristalle wat in die meeste gevalle baie goed georiënteer is. Sommige van hierdie kristalle is tot 2 cm lank. Die groter kristalle bevat talle insluitels van kwarts en plagioklaas en is ook baie algemeen vergroei met kianiet en biotiet (Fig. 10b). Die meeste gesteentes bevat beide antofilliet en gedriet. Petrografies word hierdie twee minerale egter baie moeilik van mekaar onderskei, en die onderskeid kan werklik slegs positief gemaak word indien chemiese inligting beskikbaar is. So en behalwe die teenwoordigheid of afwesigheid van granaat is dit verder ook interessant om daarop te let dat die granaatvrye gesteentes opvallend meer ortoamfibool as die granaatryke gesteentes bevat (Tabel 4).

Biotiet is 'n algemene mineraal in beide die granaatryke en granaatvrye ortoamfiboolgneisse. Die mineraal wissel egter grootliks in hoeveelheid en voorkoms van een monster na 'n ander. Sommige monsters bevat so min as drie volumeperzent biotiet, terwyl ander monsters weer tot soveel as dertig

volumepersent biotiet bevat (Tabel 4). In die eersgenoemde geval is die teenwoordigheid van biotiet byna uitsluitlik beperk tot insluitels in, en vergroeiings met ortoamfibool. Die meeste monsters word egter gekenmerk deur verspreide biotietkristalle met 'n goeie voorkeuroriëntasie. Enkele monsters word ook gekenmerk deur bande wat, bo en behalwe kwarts en plagioklaas, afwisselend uit biotiet en ortoamfibool bestaan. Biotiet is nie so intens pleochroïes as in die Ortopirokseensone nie, en die pleochroïese kleure wissel vanaf ligbruin na donkerbruin.

Kianiet is nooit opvallend in handmonsters nie, en is ook selde in aansienlike hoeveelhede in die gesteentes teenwoordig (Tabel 4). Kianiet kom voor as stringe van klein stomp kristalle wat veral met ortoamfibool geassosieer is en ook baie algemeen met hierdie mineraal vergroei is (Fig. 10b). Die mineraal is slegs in een monster (M 215) as redelike groot prismatiese kristalle waargeneem (Fig. 10c). In die meeste ander gesteentes is kianiet baie fynkorrelrig en kon slegs positief met behulp van X-straaldiffraksie geïdentifiseer word. Op grond van die X-straaldiffraksie-analises kan daar met 'n groot mate van vertroue aangeneem word dat kianiet die enigste aluminiumsilikaat in hierdie gesteentes is. Enkele monsters (bv. M 447 en DV 47, Tabel 4) bevat geen kianiet nie.

Plagioklaas (An 26-37,6) is in redelike groot hoeveelhede in al die gesteentes teenwoordig. Die mineraal is byna altyd polisinteties vertweeling, maar die individuele lamella is gewoonlik baie smal. K-veldspaat is geheel en al afwesig en plagioklaas is ook nie antipertities nie.

Kwarts is 'n algemene mineraal in al hierdie gesteentes en is altyd in redelike groot hoeveelhede teenwoordig (Tabel 4). Die mineraal verskil grootliks in korrelgrootte en vorm soms lensagtige kristalle. Die groter korrels vertoon altyd opvallende tekens van golwende uitdowing.

Die ortoamfibool-kwarts-plagioklaasgneis in tabel 3 (DV 49) besit 'n baie eenvoudige mineralogiese samestelling, en die tekstuur van hierdie gesteente word oorheers deur die teenwoordigheid van prismatiese ortoamfiboolkristalle wat 'n byna perfekte voorkeuroriëntasie definieer. Die granaat-kwarts-ortoamfiboolgneis in tabel 4 (DR 184) word weer gekenmerk deur die teenwoordigheid van reëlmatig geronde porfiroblaste van granaat wat duidelik in kontak is met ortoamfibool (Fig. 10a). Die ortoamfibool vou soms om granaat, en die twee minerale verteenwoordig 'n stabiele assosiasie. Kwarts vorm redelike growwe en ewekorrelrige kristalle wat ook in kontak is met beide ortoamfibool en granaat. Hierdie gesteente is belangrik in die opsig dat dit die enigste monster in die Ortoamfiboolsone verteenwoordig waarin granaat en ortoamfibool opvallend in ewewig met mekaar is.

1.1.3.2 Die granaat-biotietgneisse



Hierdie groep gesteentes (Tabel 4) besit 'n eenvoudige mineralogiese samestelling en bestaan hoofsaaklik uit kwarts, plagioklaas, biotiet en granaat. Die granaat-biotietgneisse is nie beperk tot die Ortoamfiboolsone nie maar kom ook algemeen langs die isograad voor. Die gesteentes langs die isograad het presies dieselfde samestelling as dié in die Ortoamfiboolsone, en die enigste verskil is die pleochroïsme van biotiet. Biotiet in die Ortoamfiboolsone is minder intense pleochroïes as langs die isograad. Die meeste monsters het 'n gneisagtige voorkoms, maar met 'n toename in biotiet en 'n afname in plagioklaas ontwikkel skisagtige (lepidoblastiese) teksture.

Granaat is die mees opvallende mineraal en kom voor as verspreide porfiroblaste met 'n reëlmatige geronde voorkoms. Die mineraal is selde poikiloblasties maar bevat insluitings van kwarts en soms ook 'n bietjie plagioklaas en biotiet.

Biotiet is in redelike groot hoeveelheid teenwoordig (Tabel 4) en die voorkeuroriëntasie van hierdie mineraal is soms verantwoordelik vir die ontwikkeling van 'n lepidoblastiese tekstuur. Kianiet is in enkele monsters en in baie klein hoeveelhede met biotiet vergroei. Laasgenoemde mineraal vou algemeen om granaat wat veral 'n opvallende verskynsel in die biotietryke gesteentes is.

Die plagioklaasinhoud (An 24-29) verskil nie baie van een monster na 'n ander nie. Polisintetiese vertweeling is opvallend en word ook gekenmerk deur die teenwoordigheid van smal individuele lamella. Antipertiet is afwesig terwyl K-veldspaat (pertiet) soms in baie klein hoeveelhede teenwoordig is (Tabel 4).

Die voorkoms van kwarts is tot 'n groot mate afhanklik van die relatiewe hoeveelheid. Fynkorrelrige kristalle is verteenwoordigend van monsters waarin kwarts in klein hoeveelhede teenwoordig is. Met 'n toename in die kwartsinhoud word die mineraal meer grofkorrelrig en vertoon ook groot variasies in korrelgrootte. Golwende uitdowing is veral opvallend in die groter kristalle.

1.1.3.3 Die granaat-kordiëriet-sillimanietgneis

Sillimaniet is nie 'n kenmerkende mineraal van die metamorfe gesteentes in die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfekompleks nie. Die mineraal is heeltemal afwesig in die granaatgranoliet, maar kom in klein hoeveelhede in die Leukokratiese graniet in die groef naby Bandelierkop voor. Die Bantoemynboukorporasie noem die teenwoordigheid van klein hoeveelhede sillimaniet op die plaas Klipkraal 176 LT, noordoos van Soekmekaar, maar beskryf nie die geassosieerde gesteentes nie. In die huidige ondersoek is sillimaniet slegs in twee monsters van die Pelitiese gneis geïdentifiseer. Die een monster (DV 45) is uit die Ortoam-

fibroolsons terwyl die ander monster (DV 36) met die gesteentes langs die Ortopirokseenisograad geassosieer is. Beide monsters het 'n soortgelyke mineralogiese samestelling.

Granaat vorm opvallende porfiroblaste met onreëlmatige en ingevrete buitelyne en word altyd geheel of gedeeltelik deur 'n smal sone van kordiëriet omring (Fig. 10d).

Kordiëriet bevat insluitels van biotiet en sillimaniet en is duidelik besig om granaat te vervang. Dit word ook geïllustreer deur die teenwoordigheid van relikte van granaat in kordiëriet. Kordiëriet is nie beperk tot die assosiasie met granaat nie maar kom ook in onreëlmatige sone in die res van die gesteente voor waar dit veral met biotiet geassosieer is.

Sillimaniet is in klein hoeveelhede beperk tot insluitels in die sone van kordiëriet om granaat maar is nooit in kontak met granaat nie. Kianiet is ook in baie klein hoeveelhede as insluitels in kordiëriet geïdentifiseer. Kianiet en sillimaniet is egter nooit in kontak met mekaar nie, en daar bestaan geen petrografiese bewyse dat die een mineraal moontlik uit die ander ontwikkel het nie. Dit is egter opvallend dat sillimaniet as goed ontwikkelde prismaatiese kristalle teenwoordig is (Fig. 10d), terwyl kianiet baie fynkorrelrig is en altyd 'n relikagtige voorkoms het.

Kwarts en plagioklaas is algemene bestanddele van die granaat-kordiëriet-sillimanietgneis terwyl K-veldspaat geheel en al afwesig is.

1.2 PETROGRAFIESE BESKRYWING VAN PETROGENETIES BELANGRIKE MINERAALVERSAMELINGS EN REAKSIEVERWANTSKAPPE IN DIE PELITIESE GNEIS

Die petrografiese karakter van die Pelitiese gneis is in die vorige afdeling uit 'n baie algemene oogpunt beskryf.

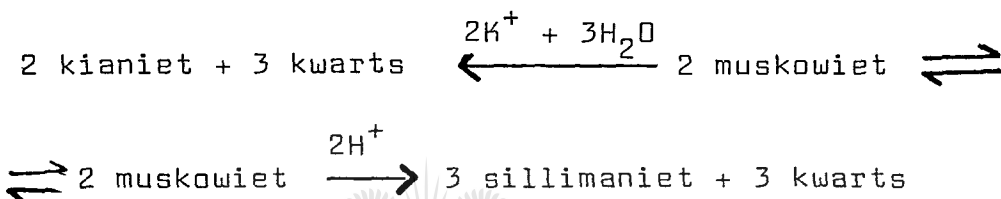
Die doel van hierdie benadering was om die belangrikste teksturele kenmerke van hierdie gesteentes op te som om sodoende as basis te dien vir 'n detail bespreking van die petrogenetiese belangrike mineraalversamelings en reaksieverwantskappe. Die komplekse mineralogiese en teksturele karakter van die Pelitiese gneis in die Ortopirokseensone is 'n aanduiding dat die Bandelierkop-Formasie onderhewig was aan meer as een periode van metamorfose. Die fisiese veranderlikes (temperatuur, druk en die chemiese potensiaal van die mobiele fases) wat hiermee gepaard gegaan het kan slegs afgelei word indien dit moontlik is om al die ewewigsmineraalversamelings en reaksieverwantskappe akkuraat te identifiseer.

Die petrogenetiese studie van die proses van metamorfose betrek drie onderling afhanklike aspekte, naamlik die mineraalversamelings, die totale chemiese samestelling van die gesteentes en die verdeling van elemente tussen mineraalpare. Die detail chemiese ondersoek van metamorfe gesteentes dien egter 'n baie twyfelagtige doel indien so 'n ondersoek nie in verband gebring kan word met die waargenome mineralogiese en teksturele eienskappe van die gesteentes nie.

Vir die doeleindes van hierdie bespreking word daar aanvaar dat 'n ewewigsmineraalversameling slegs verteenwoordig word deur 'n assosiasie van minerale wat onderling in kontak met mekaar is (Winkler, 1974, p. 27). In die identifikasie van ewewigsversamelings behoort daar egter met die volgende beperkings rekening gehou word: In die eerste plek is dit geometries moeilik of onwaarskynlik om meer as drie fases gelyktydig in onderlinge kontak in 'n slypplaatjie waar te neem. Tweedens moet daar in gedagte gehou word dat 'n handmonster, of slypplaatjie, deur meer as een mineraalversameling verteenwoordig kan word. Die probleem is dus om 'n mineraalversameling te identifiseer wat verteenwoordigend is van die hoof-ewewig in die gesteente.

Die identifikasie en beskrywing van realistiese metamorfe reaksies verteenwoordig egter gewoonlik die grootste enkele probleem in die studie van die proses van metamorfose. Die hoofrede hiervoor is te wyte aan die feit dat al die oorspronklike minerale en die produkte van 'n spesifieke reaksie selde sonder twyfel in dieselfde gesteente geïdentifiseer kan word.

Carmichael (1969, p. 253) beklemtoon dit dat selfs die sogenaamde eenvoudige reaksies 'n baie komplekse meganisme mag hê. As voorbeeld stel hy die volgende meganisme vir die ontwikkeling van sillimaniet uit kianiet voor:



Chinner (1965, p. 141) maak weer die volgende stelling in verband met die reaksie, A stourioliet + B kwarts = C granaat + D kianiet + (E water), wat baie algemeen as verwysing in die literatuur gebruik word: "The frequency of its invocation seems to be due more to the elegance of its simplicity than to any indication of its occurrence". Kwak (1974, p. 58) en Vernon (1976, p. 96) kom tot die gevolgtrekking dat detail teksturele studies, gekoppel met chemiese analyses van individuele korrels, of gedeeltes van korrels, die enigste betroubare metode is om realistiese metamorfe reaksies af te lei. Vernon (1976, p. 57) beklemtoon dit verder dat die interpretasie van mikroteksture gewoonlik subjektief is en slegs betroubaar is indien beide die oorspronklike minerale en produkte aanwesig is. Dit is selde die geval in prograad-metamorfose van pelitiese gesteentes omdat al die fases in so 'n geval neig om te reageer en die reaksies verloop gewoonlik volledig. Prograadreaksie word dus algemeen afgelei deur mineraalversamelings in soortgelyke gesteentes aan weerskante van 'n

isograad te vergelyk. Retrograadreaksies is in hierdie opsig potensieel meer belowend aangesien die oorspronklike mikroteksture algemeen behoue bly, byvoorbeeld as reaksie-koronas, en ook omdat al die oorspronklike minerale gewoonlik nie by so 'n reaksie betrek word nie (Vernon, 1976, p. 122).

Die Pelitiese gneis is potensieel uiters geskik vir 'n detail ondersoek van hoë-gradse metamorfe reaksies aangesien beide die produkte en uitgangstowwe van hierdie reaksies steeds in dieselfde monsters geïdentifiseer kan word. Die meeste, en moontlik al, hierdie waargenome reaksies kan waarskynlik as retrograadprosesse beskou word. Die term retrograad (of retrogressiewe) metamorfose word egter nie konsekwent in die literatuur gebruik nie. Turner en Verhoogen (1960, p. 452) definieer retrograadmetamorfose byvoorbeeld as die proses waarby 'n hoë temperatuur mineraalversameling afgebreek word na 'n versameling (gewoonlik meer waterryk) wat stabiel is by laer temperature. Hierdie definisie is natuurlik onbevredigend en bied geen verklaring vir die oorsprong van die laer temperatuur nie. Die laer temperatuur-mineraalversameling kan byvoorbeeld die gevolg wees van 'n daling in temperatuur wat gekoppel is aan die hoofperiode van metamorfose, of kan gekoppel wees aan 'n latere onafhanklike periode van laer-gradse metamorfose. Die algemene gebruik van die term "graad van metamorfose" is net so onbevredigend aangesien hierdie term klassiek gekoppel word aan temperatuur, terwyl temperatuur natuurlik nie die enigste veranderlike is wat die proses van metamorfose beheer nie (Vernon, 1976, p. 25). Die term retrograad metamorfose behoort dus slegs gebruik te word indien dit moontlik is om die proses volledig te omskryf in terme van die fisiese veranderlikes wat verantwoordelik was vir die ontwikkeling van die nuwe (en laer-gradse) versamelings. Vir die doeleindes van hierdie ondersoek word die term retrograadmetamorfose voorlopig gebruik om alle prosesse te beskryf wat moontlik met 'n afname in temperatuur en/of druk gepaard gegaan het.

1.2.1 Mineraalversamelings en reaksieverwantskappe in die Ortopirokseensone

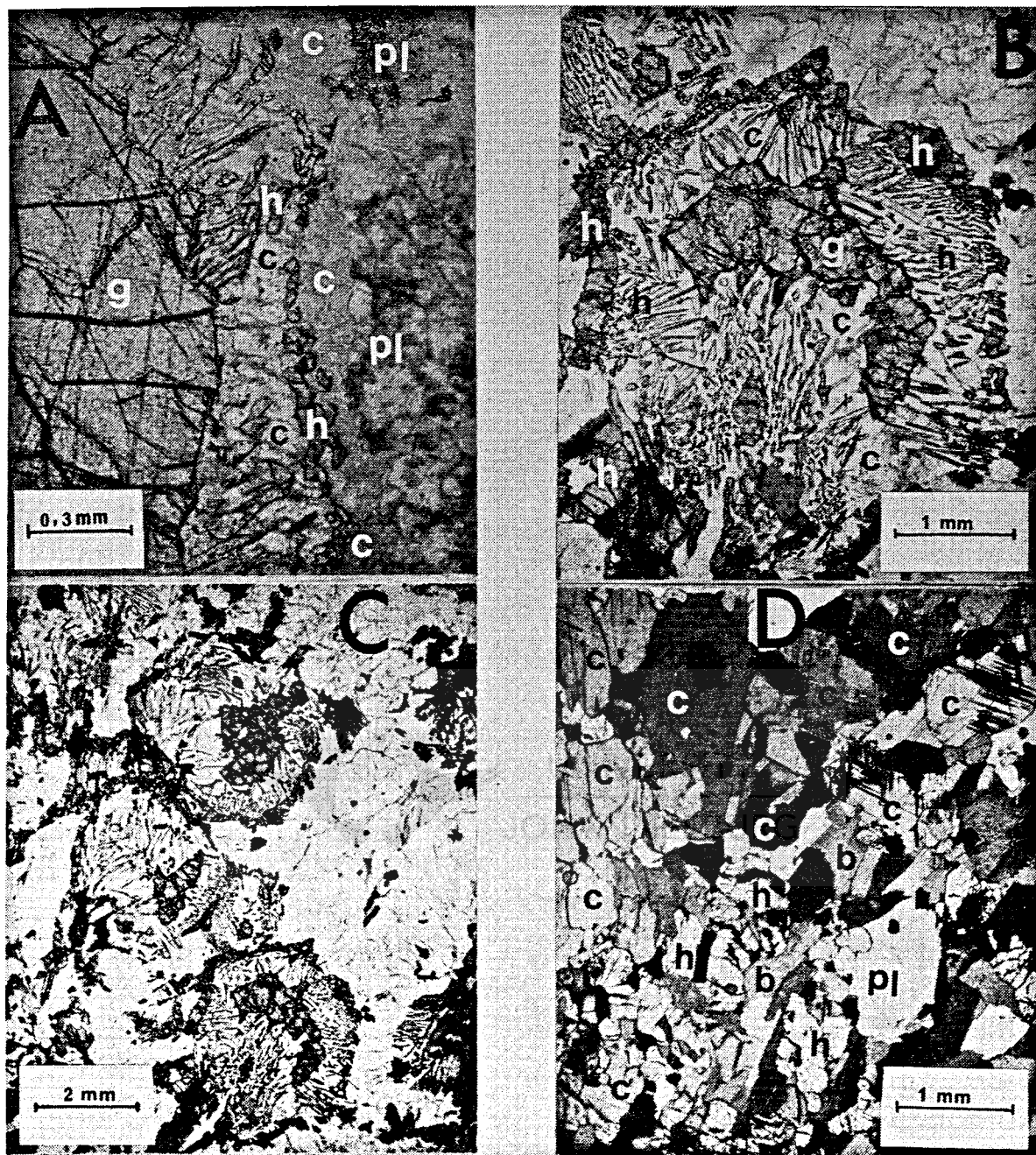
Die kordiërietvrye granaatgranoliete en die hipersteen-biotietgranoliete (Tabelle 1 en 2) besit 'n eenvoudige mineralogiese samestelling en word deur die afwesigheid van opvallende reaksieverhoudings gekenmerk. Al die samestellende minerale is onderling in kontak met mekaar, en hierdie twee tipe gesteentes word dus elk volledig deur die volgende ewewigsversamelings beskryf:

Die kordiërietvrye granaatgranoliete :
granaat + hipersteen + biotiet + kwarts + plagioklaas

Die hipersteen-biotietgranoliete :
hipersteen + biotiet + kwarts + plagioklaas

Die kordiëriet-granaatgranoliete en die granaatvrye kordiërietgranoliete is egter mineralogies en tekstureel baie meer kompleks en kan nooit volledig in terme van slegs een ewewigsversameling beskryf word nie. Hierdie twee gesteentetipes is aan mekaar gekoppel deur middel van 'n reaksieverwantskap waarin granaat verdwyn, en word vir die doeleindes van hierdie bespreking as een groep beskou. Die volgende petrografiese kenmerke bevestig die moontlikheid van komplekse reaksieverwantskappe in hierdie twee groepe granoliete:

- (i) Simplektitiese vergroeiings van hipersteen met kordiëriet wat koronas om granaat vorm (Fig. 11).
- (ii) Spinel wat beperk is tot insluitels in kordiëriet (Fig. 8a).
- (iii) Vergroeiings van kianiet met biotiet wat beperk is tot die onmiddellike teenwoordigheid van kordiëriet (Fig. 9b).
- (iv) Simplektitiese vergroeiings van kordiëriet en



Figuur 11 : Die ontwikkeling van koronateksture in die kordieriet-granaat-granoliet van die Ortopirokseensone

- Beginstadium van die reaksie $\text{Gran} + \text{Qz} \rightleftharpoons \text{kord} + \text{Hip}$ (DR.45)
Kordieriet is beperk tot die smal korona om granaat terwyl hipersteen ook as groot verspreide korrels in die res van die gesteente teenwoordig is
 - 'n Meer gevorderde stadium van bogenoemde reaksie (DV.56).
Let op die teenwoordigheid van meer grofkorrelige hipersteen wat die oorspronklike buitelyne van die granaatkristal definieer
 - DV.56 word deur talle goedgedefinieerde koronateksture gekenmerk
 - Volledige verloop van bogenoemde reaksie (DR.22). Granaat is afwesig en die gesteente het 'n hergekristalliseerde voorkoms.
- Granaat = g; kordieriet = c; hipersteen = h; biotiet = b; plagioklaas = pl

kwarts wat granaat en plagioklaas vervang (Fig. 13a).

Hierdie opvallende reaksieverwantskappe kan vervolgens in meer detail bespreek word.

1.2.1.1 Die assosiasie van granaat, hipersteen en kordiëriet in koronateksture

Hierdie assosiasie verteenwoordig die mees opvallende en wydverspreide teksturele eienskap van die kordiëriet-granaatgranoliete en die granaatvrye kordiërietgranoliete, en word in een of ander vorm in meer as 95 persent van al die monsters waargeneem.

(a) Teksturele kenmerke van die reaksiekoronas

Die reaksiekoronas word deur die volgende opvallende eienskappe gekenmerk. Die geassosieerde teksture word in figure 8, 9 en 11 geïllustreer.

- (i) Die koronas van kordiëriet en hipersteen om granaat wissel in wyde vanaf minder as 1 mm tot meer as 1 cm. Hierdie sones is nie altyd deurlopend nie, en granaat word soms geheel en soms gedeeltelik deur 'n vergroeiing van kordiëriet en hipersteen omsluit.
- (ii) Kordiëriet is soms beperk tot hierdie koronas om granaat (Fig. 11a).
- (iii) Die koronas word almal gekenmerk deur 'n simplektiese vergroeiing van wurmagtige hipersteen met kordiëriet. Hipersteen straal gewoonlik radiaal uit vanaf granaat en word geheel en al deur kordiëriet ingesluit (Fig. 11b).

- (iv) Die simplektitiese hipersteen is altyd meer fynkorrelrig as hipersteen in die res van die gesteente.
- (v) Die reaksiekoronas word in al die gevalle gedeeltelik, en soms ook geheel, deur 'n smal sone van meer grofkorrelrige hipersteen van die res van die gesteente geskei (Fig. 11b). Die wurmagtige hipersteen is soms duidelik in optiese kontinuïteit met hierdie growwer sones.
- (vi) Die assosiasie word soms gekenmerk deur druppelvormige insluitels van kwarts in kordiëriet (Fig. 9c). In enkele gevalle (monster DR 19) kom beide kwarts en plagioklaas as groter insluitels in hierdie assosiasie voor.
- (vii) Druppelvormige en wurmagtige insluitels van spinel in kordiëriet is soms opvallend (Fig. 8a). Die spinel is egter nooit in kontak met granaat of hipersteen nie.
- (viii) Biotiet is die enigste ander mineraal wat altyd deel vorm van hierdie assosiasie. Die mineraal kom in klein hoeveelhede as insluitels in kordiëriet voor, en is altyd meer fynkorrelrig as biotiet in die res van die gesteente. Die biotiet het in die meeste gevalle 'n toingrige voorkoms (Fig. 9b en Fig. 12c) maar vertoon soms ook redelik reëlmatige buitelyne.
- (ix) Plagioklaas (behalwe as enkele insluitels) en K-veldspaat vorm nooit deel van hierdie assosiasie nie.

Die mineralogie van die koronas is dus oor die algemeen baie eenvoudig, en die oorgrote meerderheid van die reaksiekoronas bestaan slegs uit kordiëriet, granaat en hipersteen met ondergeskikte biotiet. Kwarts, plagioklaas en spinel is die enigste ander minerale wat soms teenwoordig is, en dan ook slegs in klein hoeveelhede en in enkele koronas. Sewe monsters (DR 19, DR 54, DR 59, DR 80, MX, M 309 en

M 333) met duidelike omlynde reaksiekoronas is chemies in detail ondersoek (Afd. VII), en in slegs een van hierdie monsters (DR 19) is die teenwoordigheid van kwarts, plagio-klaas en spinel waargeneem. Monster DV 56 is veral 'n uitstekende voorbeeld van 'n gesteente wat deur talle (tot soveel as vyftien in 'n enkele slypplaatjie) aaneenskakekende en geïsoleerde reaksiekoronas gekenmerk word (Fig. 11c). Dit is dus duidelik dat slegs kordiëriet, granaat, hipersteen, en moontlik ook biotiet, 'n opvallende rol in die ontwikkeling van die koronateksture gespeel het.

(b) Petrogenetiese betekenis van die koronateksture

Die ontwikkeling van die koronateksture is baie duidelik gekoppel aan 'n reaksie waarin granaat afbreek om kordiëriet en hipersteen te vorm. Die rigting waarin hierdie reaksie verloop kan aan die hand van figuur 11 geïllustreer word. In figuur 11a is die reaksie beperk tot smal sones (< 1 mm in wydte) van kordiëriet en wurmagtige hipersteen om granaat in 'n monsters (DR 45) wat verder geen kordiëriet bevat nie. 'n Meer gevorderde stadium van dieselfde reaksie word in figure 11b en c deur die teenwoordigheid van talle goed gedefinieerde koronateksture in monster DV 56 geïllustreer. Die finale verloop van hierdie reaksie word geïllustreer deur die totale verdwyning van granaat. In die meeste gevalle (dit wil sê, die granaatvrye kordiërietgranoliete) kan die oorspronklike granaatkristalle steeds waargeneem word as relikporfiroblaste waarin hipersteen intiem vergroei is met kordiëriet (Fig. 9d). In enkele gevalle, egter, het totale herkristallisering aanleiding gegee tot die ontwikkeling van 'n granoblastiese ewekorrelrige tekstuur (Fig. 11d) in gesteentes wat hoofsaaklik uit kordiëriet, hipersteen, biotiet, kwarts en veldspaat bestaan.

Die teenwoordigheid van twee generasies van hipersteen word aangedui deur die groot verskil in korrelgrootte van hiper-

steen in dieselfde monster. Hipersteen wat met kordiëriet in die koronateksture vergroei is, is nie slegs altyd meer fynkorrelrig as hipersteen in die res van die gesteente nie, maar vertoon ook nooit enige tekens van verandering nie. Hierdie verskille in korrelgrootte is veral opvallend in die geval van monster DR 45 wat die beginstadium van die reaksie illustreer (Fig. 11a). Hipersteen in hierdie monster is nie beperk tot die klein wurmagtige vergroeiings met kordiëriet nie, maar kom ook as groot, en effens veranderde, kristalle verspreid deur die gesteente voor. Die teenwoordigheid van twee generasies van hipersteen word verder ook bevestig deur die stabiele assosiasie van hipersteen en granaat in die chemies effens verskillende kordiërietvrye granaatgranoliete (Afd. V, Fig. 18a-c).

Dit is dus duidelik dat die granaatgranoliete onderworpe was aan twee periodes van granuliet-graad van metamorfose. Die eerste periode van metamorfose was verantwoordelik vir die eerste verskyning van hipersteen in die suidelike grensone van die Limpopo-metamorfekompleks, en het aanleiding gegee tot die stabiele assosiasie van granaat en hipersteen in gesteentes wat geen kordiëriet bevat het nie. Die ontwikkeling van kordiëriet (en tweede generasie hipersteen) is gekoppel om 'n daaropvolgende periode van hoë-gradse metamorfose ander fisiese toestande waartydens granaat onstabiel geraak het. Die reaksie waarin granaat afbreek om kordiëriet en hipersteen te vorm het egter slegs in enkele gevalle (die granaatvrye kordiërietgranoliete) volledig verloop. Die tweede periode van granuliet-graad van metamorfose word dus gekenmerk deur die teenwoordigheid van samebestaande kordiëriet, granaat en hipersteen in die Ortopirokseensone wat 'n oppervlakte van ten minste 4 500 km² beslaan (Fig. 2 en 7).

Die ontwikkeling van die koronateksture kan dus petrografies aan die hand van die volgende algemene reaksie geïllustreer word:

Granaat+kwarts \rightleftharpoons kordiëriet+hipersteen

Die stabiliteitsverwantskappe van granaat, kordiëriet en hipersteen word volledig in Afdelings VII en VIII ondersoek, terwyl 'n moontlike meganisme vir hierdie reaksie in Afdeling IX bespreek word. Dit is egter op hierdie stadium interessant om daarop te let dat 'n identiese reaksie in chemies soortgelyke gesteentes eksperimenteel deur Hensen en Green (1970 en 1973) ondersoek is. Hulle het tot die gevolgtrekking gekom dat hierdie reaksie hoofsaaklik deur 'n afname in druk by konstante temperatuur beheer word.

Die tekstuur van die reaksiekoronas is verder baie belangrik in terme van die tektono-metamorfe ontwikkeling van die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfekompleks. Die hoofmaaksel van die kordiëriet-granaatgranoliete word, soos reeds genoem, gekenmerk deur 'n onreëlmatige gneisseuse tekstuur wat veroorsaak word deur die voorkeuroriëntasie van biotiet, en die verlengde voorkoms van minerale soos kwarts, hipersteen en granaat. Die reaksiekoronas word egter in teenstelling hiermee deur 'n kruisgewyse tekstuur gekenmerk. Hierdie tekstuur word veroorsaak deur wurmagtige hipersteen wat radiaal vanaf granaat in alle rigtings in kordiëriet uitstraal (Fig. 11b). Hierdie isotrope tekstuur is 'n aanduiding dat die ooreenstemmende reaksie na-tektonies is, en dus verteenwoordigend is van 'n laat stadium in die metamorfe ontwikkeling van die gebied. 'n Ander moontlikheid is dat die ontwikkeling van kordiëriet en hipersteen verband hou met 'n stadium tussen twee fases van vervorming. Die verwantskap tussen die metamorfe ontwikkeling en die vervormingsgeskiedenis van die gebied word volledig in Afdeling XI bespreek.



Figuur 12 : Teksturele kenmerke van die vergroeiing tussen biotiet en kyaniet in die kordierietryke granoliete

- a. Assosiasie van biotiet (b), pertiet (p), kordieriet (c) en kianiet (k) in 'n matriks van plagioklaas (DR.19)
- b. Soortgelyke assosiasie in 'n kordieriet-biotietryke sone. Antipertiet (ap) word hier ook betrek (DR.19)
- c. Mirmikitiese vergroeiing tussen biotiet (b) en kordieriet (c) is beperk tot die gedeelte van biotiet wat deur kordieriet ingesluit word (DR.19). Plagioklaas = pl.
- d. Vergroeiing van kordieriet (c), spinel (sp), biotiet (b) en kianiet (k) wat as insluitsels in granaat (g) voorkom. Die granaat word self deur 'n korona van kordieriet en hipersteen omring (R.13)

1.2.1.2 Die assosiasie kordiëriet+biotiet+kianiet+K-veldspaat

Sommige monsters van die kordiëriet-granaatgranoliete word gekenmerk deur 'n vergroeiing van biotiet en kianiet wat byna uitsluitlik met kordiëriet geassosieer is (Fig. 9b). Hierdie assosiasie is egter afwesig in monsters waarin die ontwikkeling van die koronateksture baie duidelik geïllustreer word (bv. monsters DR 45 en DV 56, Fig. 13a en b). Die assosiasie kordiëriet+biotiet+kianiet is veral opvallend in monster DR 19, en gevolglik word die petrogenetiese betekenis van hierdie assosiasie grootliks met verwysing na hierdie monster bespreek.

Die mees opvallende teksturele eienskappe van die vergroeiing tussen biotiet en kianiet word in figuur 12 geïllustreer. Figuur 12a illustreer die verwantskap tussen kordiëriet, biotiet, kianiet en pertiet in 'n assosiasie wat deur die volgende eienskappe gekenmerk word:

- (i) Die assosiasie kom voor in 'n matriks van plagioklaas en betrek nie granaat en hipersteen nie.
- (ii) Biotiet is vergroei met kianiet en is besig om af te breek na kordiëriet en K-veldspaat. Die mikroskopiese mirmekitiese vergroeiing van biotiet met kordiëriet is ook opvallend.

Figuur 12b illustreer 'n soortgelyke assosiasie in 'n kordiëriet-biotietryke sone met die verskil dat antipertiet ook hier betrek word. Die antipertiet is moontlik ook besig om biotiet te vervang.

Die rol van biotiet word die beste met verwysing na figuur 12c geïllustreer. Die volgende waarnemings is hier veral opvallend:

- (i) Biotiet was 'n stabiele fase voor die verskyning van

kordiëriet, soos geïllustreer word deur die waarneming dat biotiet gedeeltelik deur kordiëriet ingesluit word.

- (ii) Die mirmikitiese vergroeiing tussen biotiet en kordiëriet is beperk tot die gedeelte van biotiet wat deur kordiëriet ingesluit word, en is afwesig in die gedeelte wat deur plagioklaas ingesluit word.

Dit wil dus voorkom asof kordiëriet, pertiet en moontlik ook antipertiet reaksieprodukte van biotiet is. Die moontlike rol wat kianiet in hierdie reaksie gespeel het is egter problematies en kan vervolgens in groter detail bespreek word.

- (a) Probleme gekoppel aan die interpretasie van die vergroeiingstekstuur tussen biotiet en kianiet

Die moontlike rol van kianiet in die reaksie waarin biotiet afbreek om kordiëriet en K-veldspaat te vorm verdien spesiale aandag. Die vergroeiing tussen biotiet en 'n aluminiumsilikaat is 'n redelike algemene verskynsel in pelitiese metamorfe gesteentes en is reeds by verskeie geleenthede in die literatuur beskryf (Chinner, 1961; Pitcher en Read, 1963; Carmichael, 1969; Harte en Johnson, 1969). Daar bestaan egter min eenstemmigheid in verband met die oorsprong van die aluminiumsilikaat (gewoonlik sillimaniet) in hierdie vergroeiingstekstuur. Chinner (1961) stel byvoorbeeld voor dat die vergroeiing van sillimaniet met biotiet slegs die illusie van 'n reaksie skep, en dat biotiet bloot as 'n nukleus vir die groei van sillimaniet optree.

Carmichael (1969) stel weer 'n komplekse gekoppelde reaksiemeganisme voor waarin beide biotiet en sillimaniet produkte van 'n reaksie verteenwoordig. Pitcher en Read (1963), en Harte en Johnson (1969) beskryf die algemene "geblykte" voorkoms van biotiet in hierdie assosiasie as verteenwoor-

digend van 'n gevorderde reaksie waarin biotiet deur sillimaniet vervang word. Vernon en Flood (1977) gee 'n volledige uiteensetting van teksturele inligting wat gebruik kan word om vas te stel of fibrolitiese sillimaniet 'n latere fase verteenwoordig, en of hierdie sillimaniet in teksturele ewewig is met die geassosieerde fases. Die teksturele inligting is egter nie altyd objektief nie, en verskillende alternatiewe verklarings is gewoonlik moontlik (Vernon en Flood, 1977, p. 234).

Die probleem van kianiet in die kordiëriet-granaatgranoliete word verder gekompliseer deur die teenwoordigheid van meer as een generasie van hierdie mineraal. Kianiet is in die een geval beperk tot die vergroeiing met biotiet maar is ook teenwoordig as 'n baie fynkorrelrige en matagtige vergroeiing met ortoamfibool wat die aanvanklike hidrasie van kordiëriet in die Ortopirokseensone definieer (Afd. IV-1.2.1.5). Hierdie twee voorkomswyses van kianiet word algemeen in dieselfde monster waargeneem. In die meeste gevalle bestaan daar egter 'n duidelike verskil in korrelgrootte (Fig. 13b).

Die volgende teksturele inligting is in ooreenstemming met 'n voorstel dat die vergroeiing van biotiet met kianiet 'n reliktekstuur verteenwoordig van 'n reaksie waarin hierdie twee minerale afbreek om kordiëriet en K-veldspaat te vorm:

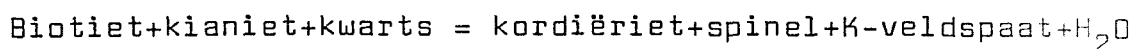
- (i) Die vergroeiing is beperk tot die kordiërietryke granoliete en word nooit in die kordiërietvrye granoliete waargeneem nie. Laasgenoemde gesteentes bevat ook geen K-veldspaat of antipertiet nie.
- (ii) Kianiet in die kordiërietryke granoliete is verder beperk tot die onmiddellike omgewing van kordiëriet en word selde of nooit in die res van die gesteente waargeneem nie.
- (iii) Kianiet is altyd vergroei met biotiet en kom nooit as diskrete kristalle voor nie.

- (iv) Dit is verder opvallend dat hierdie vergroeiing beperk is tot die kordiëriet-granaatgranoliete wat ook K-veldspaat bevat. In die gevalle waar K-veldspaat (en ook antipertiet) afwesig is (bv. DR 45, DV 56) is kianiet ook afwesig.
- (v) Die vergroeiing is verder ook baie wisselvallig. In enkele monsters (bv. DR 19, DR 42-1) is hierdie tekstuur redelik opvallend, terwyl dit in die meeste monsters in baie klein hoeveelhede teenwoordig is.
- (vi) Kianiet word selde geheel en al deur biotiet ingesluit. In die meeste gevalle word die mineraal ook gedeeltelik deur kordiëriet ingesluit (Fig. 9b), en soms ook deur K-veldspaat en antipertiet.

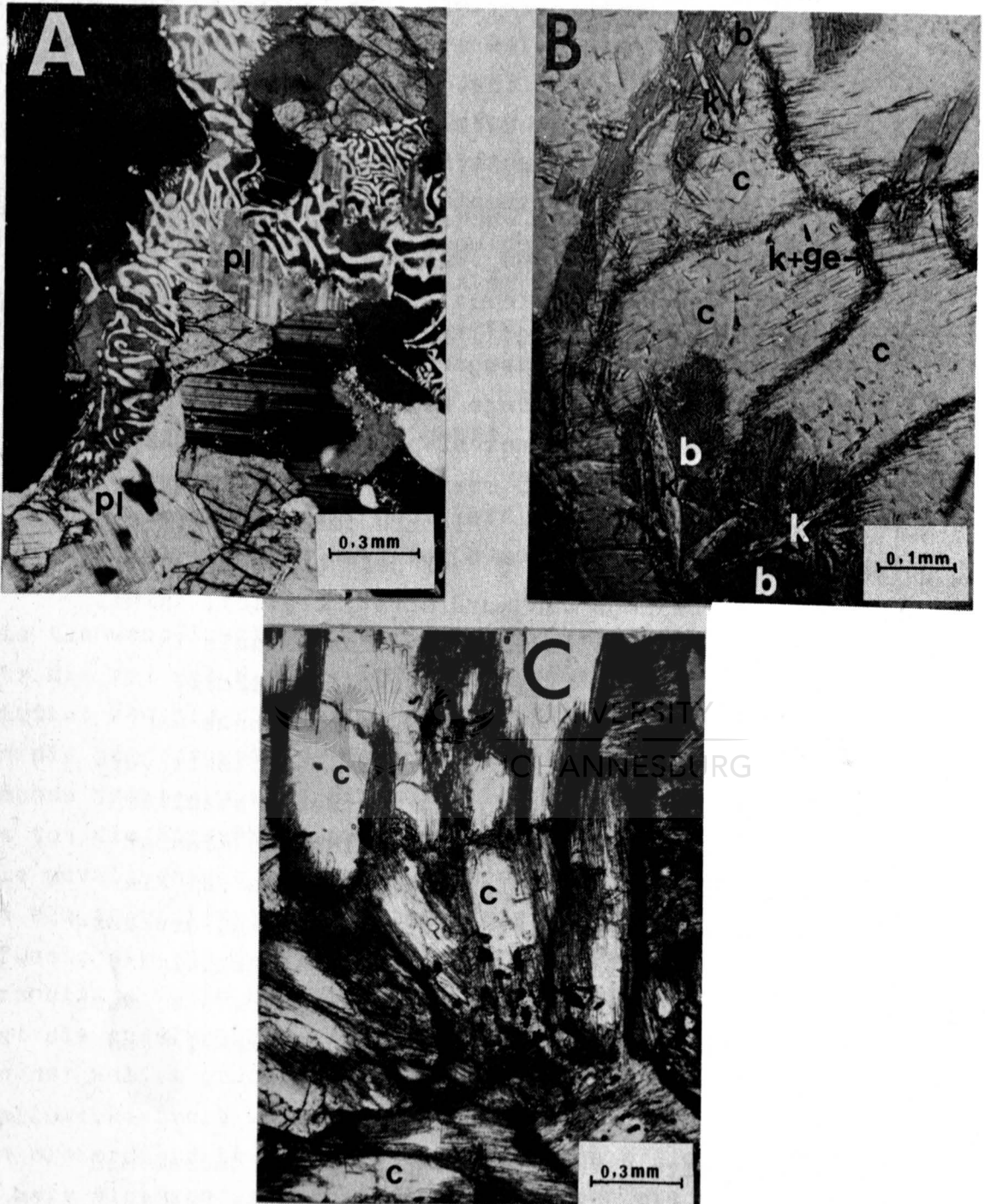
Die teenwoordigheid van pertiet is 'n verdere bevestiging vir die rol wat biotiet in hierdie reaksie gespeel het. Biotiet kan nie reageer sonder om kaliumvry te stel nie, en die teenoorgestelde geld natuurlik ook. Uit die voorafgaande besprekings is dit duidelik dat K-veldspaat beperk is tot die kordiëriet-granaatgranoliete, en afwesig is in die geval van die granaatvrye kordiërietgranoliete, asook in die ander twee groepe granoliete (Tabelle 1 en 2). Die afwesigheid van K-veldspaat in die granaatvrye kordiërietgranoliete is in hierdie opsig 'n aanduiding dat die reaksie met die ontwikkeling van 'n smeltfase gepaard gegaan het, en dat kalium grootliks in die smelt opgeneem is. Hierdie kaliumryke smelt word verteenwoordig deur die konkordante en diskordante leukokratiese anatektiese are en liggame wat 'n baie algemeen verskynsel in dagsome van die Pelitiese gneis is (Fig. 3 en 5). Bewyse vir die ontwikkeling van hierdie anatektiese materiaal as gevolg van die gedeeltelike smelting van die Pelitiese gneis is reeds bespreek (Afd. II-2.3).

1.2.1.3 Die assosiasie kordiëriet+spinel

Hierdie assosiasie is slegs in enkele monsters van die kordiërietryke granoliete geïdentifiseer. Die teenwoordigheid van spinel in hierdie gesteente is beperk tot insluit-sels in kordiëriet (Fig. 8a), en word slegs in kontak met die vergroeiing tussen biotiet en kianiet waargeneem. Die petrogenetiese betekenis van hierdie assosiasie kan moeilik op grond van die beskikbare petrografiese inligting afgelei word. Twee belangrike waarnemings kan egter gemaak word: Dit is eerstens opvallend dat spinel nie slegs as insluit-sels in kordiëriet voorkom nie, maar self ook insluit-sels van kordiëriet bevat (Fig. 8a). Hierdie twee minerale kon dus gelyktydig ontwikkel het. 'n Meer belangrike waarneming, egter, is dat vergroeiings van kordiëriet, biotiet, spinel en kianiet ook in een monster (R 13) as insluit-sels in groot granaatporfiroblaste waargeneem is (Fig. 12d). Dieselfde porfiroblaste word egter ook deur koronas van kordiëriet en hipersteen omring. Hierdie insluit-sels verteenwoordig dus moontlike relikte van 'n vroeëre stabiele assosiasie waarby kordiëriet, biotiet, spinel en kianiet betrek is. Die belangrike gevolgtrekking is dus dat die eerste verskyning van kordiëriet in die kordiëriet-granaat-granoliete nie gekoppel is aan die reaksie wat aanleiding gegee het tot die ontwikkeling van koronateksture nie, maar wel aan 'n voorafgaande reaksie. Die volgende reaksie kan moontlik hier ter sprake wees:



'n Soortgelyke reaksie is deur Loomis (1976) beskryf in hoë-gradse pelitiese hornfelse in die kontakouereool van die Rhonda ultramafiese kompleks in suidelike Spanje.



Figuur 13 : a. Simplektitiese vergroeiing van kordieriet (liggrys) en kwarts (wit) wat granaat (donker) en plagioklaas (pl) vervang (DR.54)

b. Twee generasies van kianiet (k) in die kordierietryke granoliete van die Ortopyroksone. Die grofkorrelrige vergroeiing van kianiet met biotiet (b) verteenwoordig 'n relik-assosiasie, terwyl die fynkorrelrige vergroeiing van kianiet en ortoamfibool (gedriet-ge) langs kordierietkorrelgrense die daaropvolgende hidrasie van kordieriet (c) verteenwoordig (DR.19)

c. Meer gevorderde stadium in die hidrasie van kordieriet (c) in die Ortopyroksone (R.13). Die matagtige vergroeiing bestaan uit kianiet en gedriet

1.2.1.4 Vervanging van granaat en plagioklaas deur 'n simplektitiese vergroeiing van kordiëriet en kwarts

Hierdie reaksie betrek slegs granaat, plagioklaas, kordiëriet en kwarts, en is in twee monsters (R 16 en DR 54) waargeneem. Figuur 13a (monster DR 54) illustreer duidelik dat granaat en plagioklaas gelyktydig deur 'n simplektiet van kordiëriet en kwarts vervang word. Dieselfde slypplaatjie illustreer ook die ontwikkeling van die reaksiekoronas om granaat. Hierdie twee reaksieteksture is egter nie met mekaar geassosieer nie. Op petrografiese gronde is dit dus nie duidelik of twee reaksies gekoppel is, en of hulle onafhanklik van mekaar verloop nie.

1.2.1.5 Die hidrasie van kordiëriet



Hierdie bespreking word beperk tot hidrasiereaksies wat moontlik lig kan werp op die metamorfe ontwikkeling van die gebied. Lokale verskynsels soos byvoorbeeld die serisitisasie van plagioklaas en die penitisasie van kordiëriet word hierby uitgesluit omdat hierdie verskynsels nie uit 'n petrogenetiese oogpunt belangrik is nie.

Kordiëriet is die enigste mineraal wat duidelik by 'n petrogenetiese belangrike hidrasiereaksie betrek word. Die moontlike rol van hipersteen in hierdie reaksie is nie so duidelik nie omdat laasgenoemde mineraal slegs tekens van hidrasie in kontak met kordiëriet vertoon. Hipersteen wat nie in kontak met kordiëriet is nie toon geen tekens van vervanging nie. Die hidrasie van kordiëriet is nie 'n lokale verskynsel in die Ortopirokseensone nie, maar is slegs in enkele monsters opvallend. Die hidrasieprodukte is 'n fynkorrelrige en matagtige vergroeiing van 'n aluminiumsiliikaat en ortoamfibool.

Die intensiteit van die hidrasiereaksie wissel grootliks van monster tot monster en ook in dieselfde monster. In die meeste monsters is die proses aanvanklik, en die uiters fynkorrelrige hidrasieprodukte kom voor as aggregate van sub-parallele matagtige vesels wat vanaf kordiëriet/kordiëriet-korrelgrense in kordiëriet projekteer (Fig. 13b). In die meer gevorderde stadium van die proses word kordiëriet soms geheel en al deur die matagtige hidrasieprodukte vervang (Fig. 13c). Dit is dus duidelik dat die hidrasieproses langs korrelgrense begin, en kordiëriet word sistematies van buite na binne vervang.

Die hidrasieprodukte van kordiëriet is in die meeste gevalle te fynkorrelrig vir optiese identifikasie. In enkele monsters is die produkte egter meer grofkorrelrig en kan hier geïdentifiseer word as 'n mengsel van 'n aluminium-silikaat en 'n ortoamfibool. Die teenwoordigheid van dieselfde twee minerale in die fyn vergroeiings is later ook met behulp van X-straaldiffraksie bevestig.

Die hidrasie van kordiëriet in die Ortopirokseensone is identies aan die reaksies wat die Ortopirokseenreaksie-isograad definieer (Afd. IV-1.2.2). Die enigste verskil is dat die hidrasieprodukte langs hierdie isograad baie meer grofkorrelrig is as in die Ortopirokseensone. Die volgende algemene reaksie is hier van toepassing (Vernon, 1972):



Die tydsverwantskappe van hierdie reaksie word deur die volgende waarnemings geïllustreer:

- (i) Kordiëriet word duidelik deur aluminiumsilikaat en ortoamfibool vervang, en die hidrasieproses is dus later as die reaksie wat aanleiding gegee het tot die ontwikkeling van kordiëriet in die koronateksture.

- (ii) Die hidrasieprodukte is baie meer fynkorrelrig as kianiet wat met biotiet vergroei is (Fig. 13b).
- (iii) Die hidrasieprodukte besit 'n willekeurige oriëntasie (Fig. 13c) wat 'n aanduiding is dat hierdie reaksie verteenwoordigend is van 'n laat-stadium in die metamorfe ontwikkeling van die gebied, en moontlik na-tektonies is.

1.2.1.6 Samevatting van reaksieverwantskappe in die Ortopirokseensone

Die petrografiese ondersoek van die kordiëriet-granaatgranoliete is 'n aanduiding dat hierdie gesteentes onderworpe was aan 'n komplekse metamorfe geskiedenis. Hierdie geskiedenis kan kortliks as volg opgesom word:

- (i) Die ontwikkeling van kordiëriet en hipersteen in die koronateksture tydens die tweede periode van metamorfose verteenwoordig die hoof-ewewig in hierdie gesteentes, en hierdie reaksieteksture kan petrografies baie duidelik gedefinieer word.
- (ii) Die petrogenetiese interpretasie van die reaksies waarby biotiet, kianiet, spinel, kordiëriet en K-veldspaat betrek word skep egter 'n probleem. Dit is duidelik dat die vergroeiing tussen biotiet, kianiet, kordiëriet en spinel 'n relikversameling van 'n vroeëre stadium in die metamorfe ontwikkeling van hierdie gesteentes definieer. Die probleem is egter of die voorgestelde reaksie waarin biotiet en kianiet reageer om kordiëriet, K-veldspaat en spinel te vorm ook verband hou met die soortgelyke reaksie waarby spinel nie betrek is nie. Hierdie probleem kan nie maklik op grond van die beperkte petrografiese inligting opgelos word nie. Die vergroeiing tussen biotiet en kianiet is in beide

assosiasies (d.w.s. met of sonder spinel) egter identies, en daar kan dus met 'n redelike mate van sekerheid aanvaar word dat die assosiasie biotiet+kianiet+kordiëriet+K-veldspaat ook verteenwoordigend is van 'n vroeëre stadium in die metamorfe geskiedenis van hierdie gesteentes.

- (iii) Die hidrasie van kordiëriet skep nie 'n probleem nie, en is duidelik later as die ontwikkeling van die koronateksture.

Die petrografiese aspekte van die metamorfe ontwikkeling van die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfekompleks word later meer volledig opgesom (Afd. IV-3).

1.2.2 Mineraalversamelings en reaksieverwantskappe langs die Ortopirokseenreaksie-isograad

Die Ortopirokseenreaksie-isograad verteenwoordig die mees opvallende regionale metamorfe struktuur in die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfekompleks en kan oor 'n afstand van meer as 140 km van die weste na die ooste gevolg word (Fig. 7). Die ontwikkeling van hierdie isograad is gekoppel aan die hidrasie van kordiëriet en hipersteen. Hierdie reaksies gee aanleiding tot die teenwoordigheid van kordiëriet, hipersteen, antofilliet, gedriet en kianiet in gesteentes met 'n geskikte chemiese samestelling binne 'n baie beperkte PT-interval.

1.2.2.1 Die Hidrasie van Kordiëriet

Kordiëriet vertoon altyd tekens van totale of gedeeltelike verandering na 'n redelike grofkorrelrige vergroeiing van minerale wat chemies (Afd. VI-1.5) en met behulp van X-straaldiffraksie as kianiet en gedriet geïdentifiseer is.

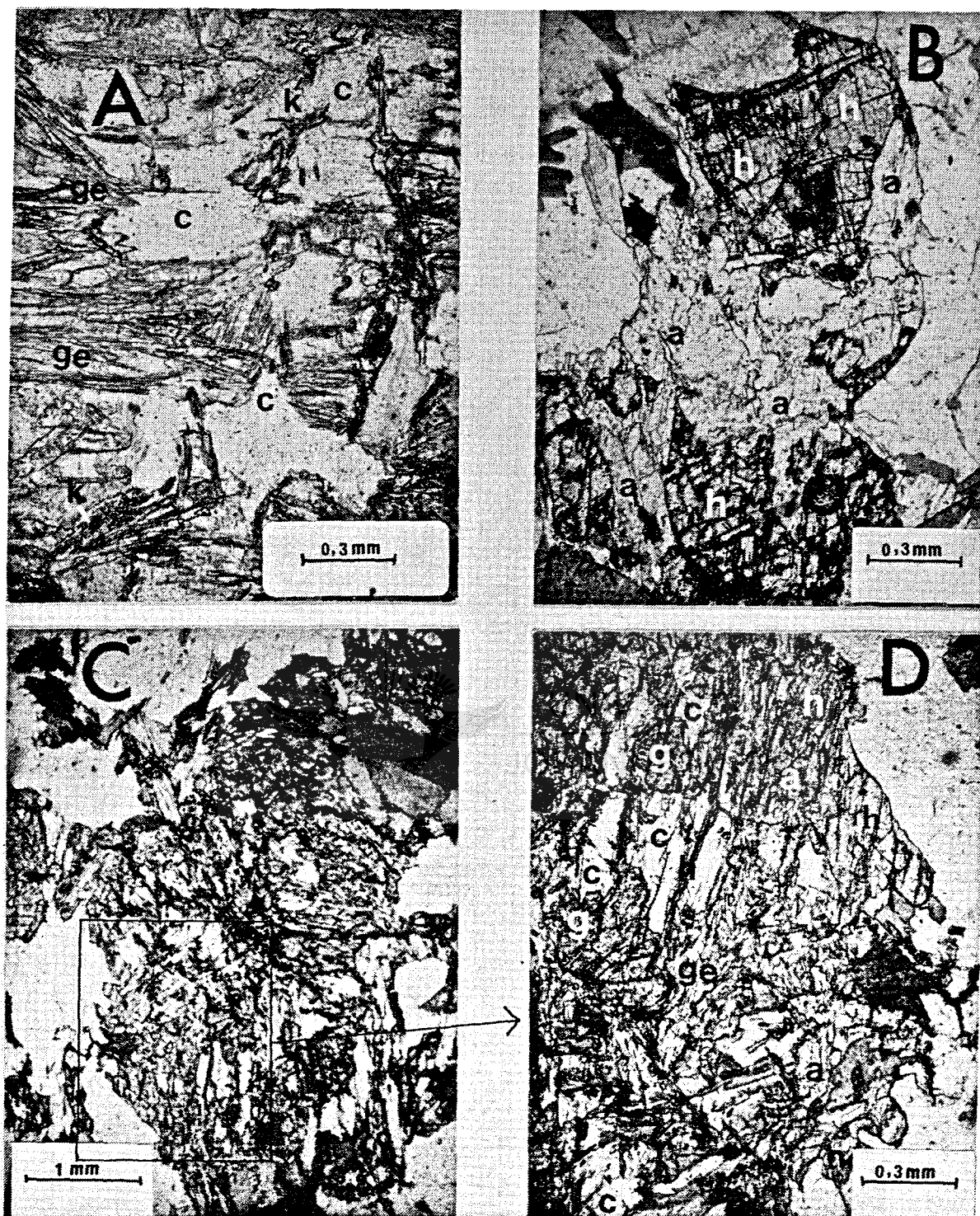
Kianiet en gedriet is in die aanvanklike stadium van die reaksie langs kordiëriet-korrelgrense gekonsentreer, en met verdere verloop van die reaksie word kordiëriet van buite na binne vervang. Gedriet vorm lang primatiese kristalle terwyl kianiet neig om kort prismatiese naalde en onreëlmatige korrels te vorm (Fig. 14a).

1.2.2.2 Die Hidrasie van Hipersteen

Hipersteen is selde vars en vertoon altyd tekens van verandering na 'n ortoamfibool wat chemies as antofilliet geïdentifiseer is (Afd. VI-1.5). Die verandering vind soms langs krakies in die pirokseen plaas, maar in die meeste gevalle kom antofilliet voor as sones wat hipersteen geheel of gedeeltelik omring (Fig. 14b). Hierdie reaksie word beide in die kordiërietryke en kordiërietvrye gesteentes waargeneem.

Die hidrasieproses wissel grootliks in intensiteit van monster tot monster, en selfs in dieselfde monster. Kordiëriet vertoon altyd 'n redelike gevorderde stadium van verandering, maar dieselfde geld nie vir hipersteen nie. Hierdie mineraal vertoon soms in een posisie in 'n slypplaatjie byna geen tekens van verandering nie, terwyl dit in 'n ander posisie in dieselfde slypplaatjie weer geheel en al deur antofilliet vervang is.

Die vervanging van hipersteen deur antofilliet in die kordiërietvrye gesteentes is 'n aanduiding dat die hidrasie van kordiëriet en hipersteen onafhanklik kan verloop. Hierdie voorstel is in ooreenstemming met die waarneming dat hipersteen blykbaar nie altyd betrek is by die aanvanklike hidrasie van kordiëriet in die Ortopirokseensone nie (Afd. IV-1.2.1.5). Die kordiërietryke gesteentes langs die Ortopirokseenisograad is egter chemies identies aan die kordiëriet-granaatgranoliete (Afd. V) en in baie gevalle



Figuur 14 : Hidrasiereaksies langs die Ortopirokseenreaksie-isograad

- a. Hidrasie van kordieriet (c) in die kordieriet-granaat-granooliet. Die hidrasie produkte is gedriet (ge) en kianiet (k) - DR.157
- b. Hidrasie van hipersteen (h) in die kordierietvrye granaat-granooliet. Antofilliet (a) vorm mantels om en vervang hipersteen (DV.38)
- c. Hidrasie van kordieriet (c) en hipersteen (h) in 'n koronatekstuur langs die isograad (DV.51). Granaat = g; antofilliet = a; Gedriet = ge
- d. Vergroting van 'n gedeelte van bogenoemde koronatekstuur

kan die koronateksture van laasgenoemde gesteentes steeds duidelik waargeneem word (Fig. 14c en d). As gevolg van die intieme vergroeiing van kordiëriet en hipersteen in hierdie reaksiekoronas is dit egter moeilik om vas te stel of die hidrasie van kordiëriet en hipersteen in die kordiërietryke gesteentes ook onafhanklik verloop het. Hierdie probleem word in Afdeling IX in meer detail uit 'n chemiese oogpunt ondersoek.

Die petrografiese inligting is 'n duidelike bewys dat slegs hipersteen en antofilliet in die kordiërietvrye gesteentes by die hidrasiereaksie betrek is (Fig. 14b). In die geval van die kordiërietryke gesteentes is die situasie egter meer kompleks. In baie gevalle word die vergroeiing tussen kordiëriet, hipersteen, ortoamfibool en kianiet in die koronateksture byvoorbeeld gekenmerk deur die teenwoordigheid van biotiet wat self met kianiet vergroei is. In die petrografiese beskrywing van die kordiëriet-granaatgranoliete is bewyse egter aangevoer vir die teenwoordigheid van twee generasies van kianiet (Fig. 13b), en ook dat die vergroeiing tussen biotiet en kianiet gekoppel is aan reaksies wat die hidrasie van kordiëriet voorafgegaan het. Biotiet is verder ook in baie gevalle glad nie met die vergroeiing tussen kordiëriet, gedriet en kianiet geassosieer nie, en daar word dus aanvaar dat hierdie mineraal nie 'n rol in die hidrasiereaksies gespeel het nie. Granaat kan ook as 'n moontlike kandidaat by die hidrasiereaksies uitgeskakel word, en wel as gevolg van die volgende redes: Die hidrasiereaksies is baie duidelik afgedruk op die koronateksture. Hierdie teksture verteenwoordig 'n onvolledige reaksie waarin granaat afbreek om kordiëriet en hipersteen te vorm. Met die volledige verloop van hierdie reaksie sou granaat dus verdwyn het voordat die hidrasiereaksies 'n aanvang geneem het. Dit word byvoorbeeld geïllustreer deur die teenwoordigheid van laer-graadse ekwiwalente van die granaatvrye kordiërietgranoliete in die Ortoamfiboolsone waarin enkele relikte van die vergroeiing tussen kordiëriet, gedriet en kianiet steeds waargeneem kan word (Afd. IV-1.1.3.1).

kan die koronateksture van laasgenoemde gesteentes steeds duidelik waargeneem word (Fig. 14c en d). As gevolg van die intieme vergroeiing van kordiëriet en hipersteen in hierdie reaksiekoronas is dit egter moeilik om vas te stel of die hidrasie van kordiëriet en hipersteen in die kordiërietryke gesteentes ook onafhanklik verloop het. Hierdie probleem word in Afdeling IX in meer detail uit 'n chemiese oogpunt ondersoek.

Die petrografiese inligting is 'n duidelike bewys dat slegs hipersteen en antofilliet in die kordiërietvrye gesteentes by die hidrasiereaksie betrek is (Fig. 14b). In die geval van die kordiërietryke gesteentes is die situasie egter meer kompleks. In baie gevalle word die vergroeiing tussen kordiëriet, hipersteen, ortoamfibool en kianiet in die koronateksture byvoorbeeld gekenmerk deur die teenwoordigheid van biotiet wat self met kianiet vergroei is. In die petrografiese beskrywing van die kordiëriet-granaatgranoliete is bewyse egter aangevoer vir die teenwoordigheid van twee generasies van kianiet (Fig. 13b), en ook dat die vergroeiing tussen biotiet en kianiet gekoppel is aan reaksies wat die hidrasie van kordiëriet voorafgegaan het. Biotiet is verder ook in baie gevalle glad nie met die vergroeiing tussen kordiëriet, gedriet en kianiet geassosieër nie, en daar word dus aanvaar dat hierdie mineraal nie 'n rol in die hidrasiereaksies gespeel het nie. Granaat kan ook as 'n moontlike kandidaat by die hidrasiereaksies uitgeskakel word, en wel as gevolg van die volgende redes: Die hidrasiereaksies is baie duidelik afgedruk op die koronateksture. Hierdie teksture verteenwoordig 'n onvolledige reaksie waarin granaat afbreek om kordiëriet en hipersteen te vorm. Met die volledige verloop van hierdie reaksie sou granaat dus verdwyn het voordat die hidrasiereaksies 'n aanvang geneem het. Dit word byvoorbeeld geïllustreer deur die teenwoordigheid van laer-graadse ekwiwalente van die granaatvrye kordiërietgranoliete in die Ortoamfiboolsone waarin enkele relikte van die vergroeiing tussen kordiëriet, gedriet en kianiet steeds waargeneem kan word (Afd. IV-1.1.3.1).

1.2.2.3 Interpretasie van die hidrasiereaksies

Die hidrasieprodukte van kordiëriet en hipersteen kan petrografies op twee maniere geïnterpreteer word: Die eerste interpretasie is dat ortoamfibool (en kianiet) besig is om die meer grofkorrelrige watervrye minerale te vervang. Dit is egter ook moontlik dat ortoamfibool en kianiet vroeg gevormde residuele kristalle verteenwoordig wat nie opgebruik is tydens die groei van die watervrye minerale nie. Die eerste interpretasie is in ooreenstemming met die petrografiese inligting wat kortliks as volg opgesom kan word:

- (i) Antofilliet vorm altyd mantels om hipersteen, en die teenoorgestelde is nooit waargeneem nie (Fig. 14b). Die wydte van hierdie sones verskil grootliks, en in baie gevalle is hipersteen slegs as klein relikte in antofilliet aanwesig.
- (ii) Die aanvanklike hidrasie van kordiëriet in die kordiëriet-granaatgranoliete van die Ortopirokseen-sone is duidelik later as die reaksie wat aanleiding gegee het tot die ontwikkeling van kordiëriet in die koronateksture.
- (iii) Die koronateksture in die kordiëriet-granaatgranoliete kan steeds in die isograadgesteentes geïdentifiseer word. Beide hipersteen en kordiëriet word gelyktydig deur ortoamfibool (en kianiet) in hierdie teksture vervang (Fig. 14c en d).

Die algemene gevolgtrekking is dus dat hipersteen met water gereageer het om antofilliet te vorm, en dat kordiëriet met water gereageer het om gedriet, kianiet en kwarts te vorm.

Vernon (1972, p. 127) beskryf identiese reaksies in hoëgraadse metamorfe gesteentes van die Arunta kompleks in sentraal Australië, en interpreteer hierdie reaksies ook as hidrasie, en nie as dehidrasieprosesse nie.

Die volgende algemene reaksies kan gebruik word om die hidrasie van kordiëriet en hipersteen te beskryf (Vernon, 1972, p. 131):

- (i) Kordiëriet+water = gedriet+kianiet+kwarts
- (ii) Hipersteen+water = antofilliet

Hierdie reaksies word uit 'n chemiese oogpunt volledig in Afdeling IX ondersoek.

Die interpretasie van die reaksies langs die Ortopirokseens-reaksie-isograad as hidrasie- en nie as dehidrasieprosesse nie het natuurlik 'n baie belangrike implikasie in soverre dit die metamorfe ontwikkeling van die suidelike grensone van die Limpopo-metamorfekompleks betref. Hierdie isograad definieer nie die eerste verskyning van hipersteen, soos in die geval van normale prograad-metamorfose nie, maar wel die verdwyning van hipersteen. Uit 'n petrogenetiese oogpunt behoort hierdie isograad dus as 'n ortoamfiboolreaksie-isograad beskryf te word (Winkler, 1970, 1974). 'n Baie belangriker gevolgtrekking is egter dat die hidrasiereaksies langs die isograad later is as die reaksie wat in die Ortopirokseensone aanleiding gegee het tot die ontwikkeling van die koronateksture in die kordiëriet-granaatgranoliete. Die ontwikkeling van kordiëriet en hipersteen in hierdie koronateksture is gekoppel aan 'n tweede periode van metamorfose (Afd. IV-1.2.1.6), en gevolglik beteken dit dus dat die hidrasiereaksies gekoppel is aan 'n daaropvolgende periode van metamorfose.

1.2.3 Mineraalversamelings en reaksieverwantskappe in die Ortoamfiboolsone

Die petrografiese karakter van die ortoamfiboolgneisse kan direk in verband gebring word met die reaksies wat langs die Ortopirokseensreaksie-isograad beskryf is. Hierdie

gesteentes verteenwoordig dus die laer-graadse ekwivalente van die granaatgranoliete in die Ortopirokseensone. Die ortoamfiboolgneisse is mineralogies en tekstureel baie minder kompleks as die granaatgranoliete, en word deur die volgende opvallende eienskappe gekenmerk:

- (i) Hipersteen is slegs as enkele relikte geïdentifiseer en is vir alle praktiese doeleindes afwesig. Kordiëriet is ook nie 'n stabiele mineraal in assosiasie met ortoamfibool nie, en word waargeneem as relikte wat met ortoamfibool en kianiet vergroei is. Hierdie vergroeiingsteksture is identies aan dié wat langs die Ortopirokseenisograad beskryf is. 'n Belangrike gevolgtrekking in terme van die metamorfe ontwikkeling van die gebied is dus dat kordiëriet en hipersteen oorspronklik 'n groter verspreiding besit het as wat huidig die geval is.
- (ii) Granaat en ortoamfibool vorm blykbaar nie 'n stabiele assosiasie in die teenwoordigheid van plagioklaas en biotiet nie. Dit word geïllustreer deur die waarneming dat granaat en ortoamfibool slegs in direkte kontak waargeneem is in gesteentes wat geen plagioklaas en biotiet bevat nie (Fig. 10a).
- (iii) Die mees opvallende kenmerk van die ortoamfiboolgneisse is egter die teenwoordigheid van meer as een tipe ortoamfibool in dieselfde gesteente. Die eerste beskrywing van samebestaande antofilliet en gedriet word deur Stout (1971) gegee. Hy beskryf die teenwoordigheid van antofilliet, gedriet, hornblende en kummingtoniet in gesteentes van suidelike Noorweë, en kom tot die gevolgtrekking dat bogenoemde minerale twee ewewigsversamelings definieer, naamlik antofilliet+gedriet+hornblende en antofilliet+gedriet+kummingtoniet. Die ewewigsaspekte van hierdie twee minerale in die ortoamfiboolgneisse

word later volledig bespreek (Afd. VI-1.5).

Die volgende ewewigsversamelings is dus kenmerkend van die ortoamfiboolgneisse as 'n groep. Die verskillende ortoamfiboole word hier nie onderskei nie, en dit moet in gedagte gehou word dat antofilliet en gedriet moontlik deel is van elke versameling:

- (i) Ortoamfibool+kianiet+biotiet+kwarts+plagioklaas.
- (ii) Ortoamfibool+biotiet+kwarts+plagioklaas.
- (iii) Ortoamfibool+kwarts+plagioklaas.
- (iv) Granaat+ortoamfibool+kwarts.

Die amfiboolvrye granaat-biotietgneisse besit 'n baie eenvoudige mineralogiese samestelling wat volledig deur die volgende mineraalversameling beskryf word:

granaat+biotiet+kwarts+plagioklaas

Die granaat-kordiëriet-sillimanietgneis besit 'n baie beperkte verspreiding in die gebied maar is van petrogenetiese belang, veral in soverre dit die stabiliteitsverwantskappe van kordiëriet betref. Die petrografiese ondersoek van die twee kordiërietryke monsters illustreer 'n opvallende reaksieverwantskap tussen granaat, kordiëriet en sillimaniet (Fig. 10d). Die volgende veralgemeende reaksie is moontlik petrografies van toepassing (Hensen en Green, 1973; Currie, 1971):

$2 \text{ granaat} + 5 \text{ kwarts} + 4 \text{ sillimaniet} = 3 \text{ kordiëriet}$

Biotiet het waarskynlik geen rol in hierdie reaksie gespeel nie. Dit word eerstens aangedui deur die groot hoeveelheid biotiet in monster DV 45 (Tabel 4), en tweedens deur die totale afwesigheid van K-veldspaat. Die rigting waarin hierdie reaksie verloop word aangedui deur die waarneming dat kordiëriet altyd koronas om granaat vorm, terwyl sillimaniet en granaat nooit in kontak met mekaar is nie.

2. DIE MAFIESE GNEIS

Die term Mafiese gneis word uitsluitlik gebruik om gesteentes van die Bandelierkop-Formasie te beskryf wat meer as 30 persent ferromagnesiese minerale bevat. Hierdie gesteentes is waarskynlik van stollingsoorsprong (Afd. V) en geen mafiese gesteentes van sedimentêre oorsprong is in die gebied geïdentifiseer nie.

Die Mafiese gneis van die Bandelierkop-Formasie besit 'n eenvoudige mineralogiese samestelling wat grootliks varieer met variasies in die graad van metamorfose. Die hipersteen-ougietgranoliete is beperk tot die Ortopirokseensone en word gekenmerk deur die teenwoordigheid van hipersteen. Die amfiboliete bestaan hoofsaaklik uit hornblende en plagioklaas en is beperk tot die Ortoamfiboolsones. Die verspreiding van hierdie twee metamorfe sones word in figure 2 en 7 geïllustreer.

UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG

2.1 DIE HIPERSTEEN-UGIETGRANOLIETE

Die granoliete is massiewe donkergrys tot swart gesteentes en dagsoom oor groot gebiede in die Ortopirokseensone. Die gesteentes vertoon algemeen 'n gebande voorkoms wat veroorsaak word deur die teenwoordigheid van talle segregasies van kwarts en veldspaat. Gebandheid word egter selde of nooit deur variasies in die ferromagnesiese minerale veroorsaak nie.

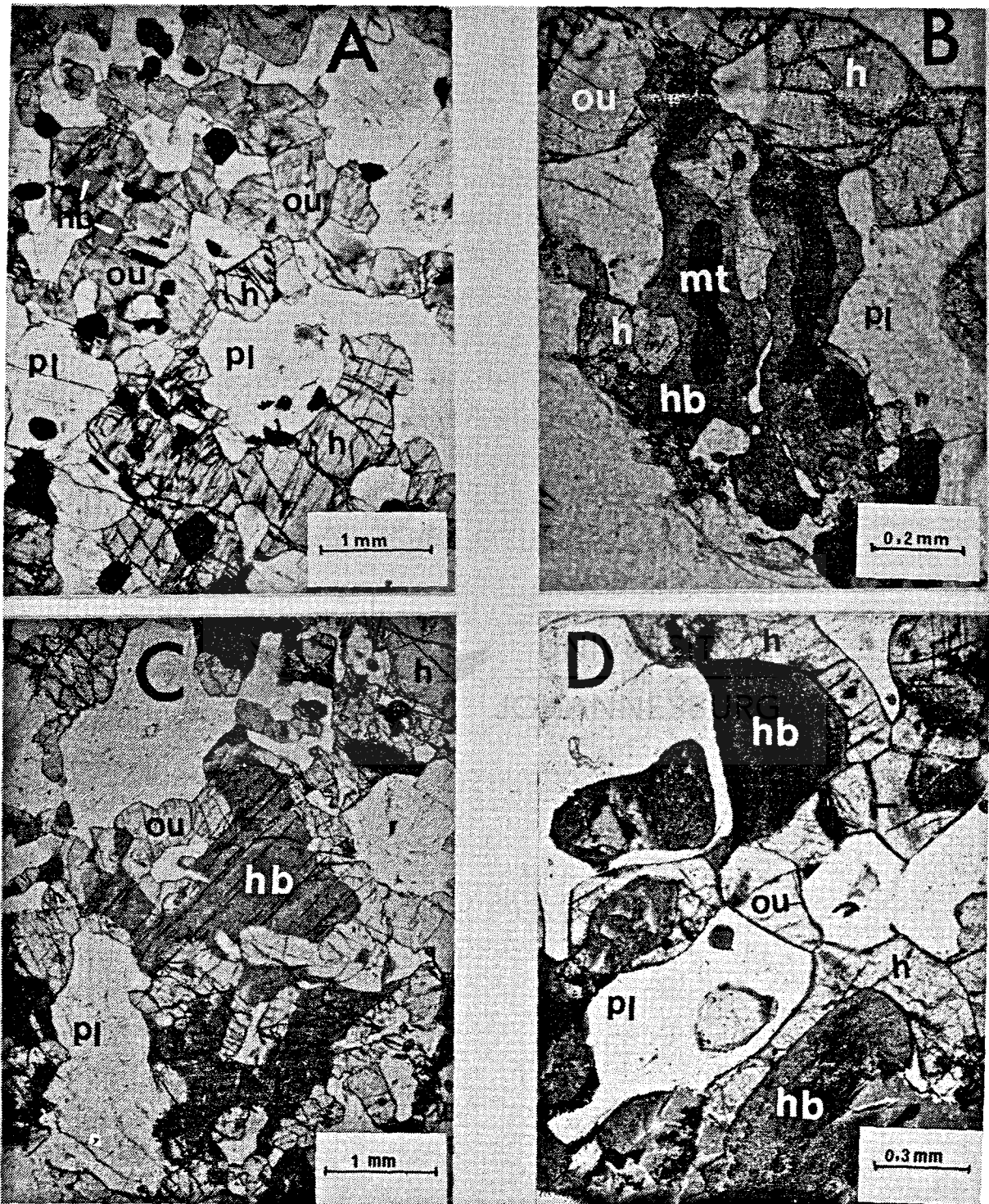
Die volumetriese samestelling van verteenwoordigende monsters van die hipersteen-ougietgranoliete word in tabel 5 opgesom. Die gesteentes bestaan hoofsaaklik uit wisselende hoeveelhede hipersteen, ougiet en plagioklaas, met ondergeskikte hornblende, magnetiet en ilmeniet. Kwarts is soms in klein hoeveelhede teenwoordig, terwyl hornblende in enkele gevalle

afwesig is. Sirkoon en apatiet is bykomstige minerale, en sfeen is geheel en al afwesig.

Die granoliete is middelkorrelrige gesteentes met 'n grano-blastiese tekstuur wat wissel vanaf ewekorrelrig tot onewekorrelrig (Fig. 15a). Die korrelgrensverwantskappe van geassosieerde minerale is reëlmatig en wissel vanaf reguit (plagioklaas) tot redelik geboë (pirokseen en amfibool). Groot pirokseenkristalle vertoon soms ingevrete buitelyne. Plagioklaas word algemeen gekenmerk deur 'n poligonale tekstuur met driepuntige kontakte. Pirokseen en amfibool vertoon geen opvallende tekens van voorkeuroriëntasie nie, alhoewel 'n swak ontwikkelde foliasie soms in dagsome waar-geneem kan word.

Tabel 5 Modale samestelling (volumeperzent) van die hipersteen-ougietgranoliete en amfiboliete. Die persentasie anortiet in plagioklaas word in hakkie gegee. m < 1%. Erts = magnetiet en ilmeniet.

Klassifikasie	Monster	Hipersteen	Ougiet	Hornblende	Plagioklaas	Kwarts	Erts	Sfeen	Epidoot
A. Hipersteen-ougietgranoliete	M. 315	23	15	1	48(58)	2	11		
	M. 292	27	20	1	47(40)	1	4		
	M. 331	6	33	m	56(45)	3	3		
	DR. 55	13	30	5	45(59)		7		
	M. 339	21	16	15	40(45)		8		
	M. 201	13	30	4	46(66,4)	m	7		
	M. 109	18	28	2	48(40)		11		
	M. 130	14	32	8	45(50)	1	m		
	M. 194	9	23	26	42(43)	m	m		
R. 51	14	27	4	44(40)	1	10			
B. Amfiboliete	DR. 171	m	10	32	47(28)		m	m	
	M. 471			52	41(47,6)	6	m		
	DR. 176	m	6	58	26(25,3)	6	m		
	DR. 164	m	m	62	22	16	m		
	DV. 44		m	53	35	12		m	m
	DR. 168			67	14	19			
	DR. 165	m	m	58	25	15	m		



Figuur 15 : a. Granoblastiese tekstuur van die hipersteen-ougietgranoliet (M.315)

b. Hornblende wat byna uitsluitlik beperk is tot smal sones wat pirokseen en ertsminerale (magnetiet en ilminiet) geheel of gedeeltelik omring (M.292)

c. en d. Reëlmatige kontakte tussen hornblende, hipersteen en ougiet (DR.55 en M.315)

Hornblende = hb; Hipersteen = h; Ougiet = ou

Hipersteen is die kenmerkende metamorfe mineraal van die hipersteen-ougietgranoliete en is teenwoordig in al die monsters wat ondersoek is. Die enkele monsters wat geen hipersteen bevat nie is duidelik retrogressief, en word gekenmerk deur 'n groot toename in hornblende en die teenwoordigheid van relikte van ougiet. Hipersteen is altyd sterk pleochroïes in skakerings van liggroen tot rooskleurig.

Die hoeveelheid hipersteen wissel grootliks van een monster na 'n ander (Tabel 5), en die voorkoms van hierdie mineraal is grootliks afhanklik van die relatiewe hoeveelheid. Die hipersteenryke granoliete word gekenmerk deur groot oneievormige kristalle van hipersteen wat soms hoogs onreëlmatige kristalle in optiese kontinuïteit vorm. Die groot kristalle bevat enkele insluitels van plagioklaas en ertsminerale, en soms ook ougiet en hornblende. Die ougietryke gesteentes word weer gekenmerk deur die teenwoordigheid van meer fynkorrelrige kristalle van hipersteen wat byna uitsluitlik intiem met ougiet geassosieer is, maar wat soms ook deur groter plagioklaaskristalle ingesluit word. Hipersteen word soms gedeeltelik deur hornblende omring, maar vertoon oor die algemeen baie vars.

Ontmengingslamella wat parallel aan die (100) kristallografiese rigting in hipersteen ontwikkel is 'n opvallende eienskap van sommige monsters. Die individuele lamella is baie smal en bestaan waarskynlik uit ougiet, alhoewel hierdie identifikasie nie bevestig is nie. Ontmengingslamella van ougiet is egter 'n algemene eienskap in metamorfe ortopiroksene (Jaffe, e.a., 1975).

Ougiet (Afd. VI-2-2) is 'n opvallende bestanddeel van al die granoliete wat ondersoek is. Die hoeveelheid ougiet wissel ook van een monster na 'n ander, en die voorkomsywyse van hierdie mineraal is in alle opsigte identies van dié van hipersteen. Die groot kristalle bevat ook enkele insluitels van plagioklaas en ertsminerale. Hornblende vorm soms randjies om ougiet en kom ook meer algemeen as afgeronde

insluitels in hierdie mineraal voor as wat die geval by hipersteen was. Ougiet bevat egter selde insluitels van hipersteen.

Ougiet is liggroen en soms opvallend pleochroes in skakerings van groen. Die mineraal bevat soms ontmengingslamella van hipersteen wat slegs parallel aan (100) ontwikkel. Hierdie verskynsel is egter baie minder algemeen as in die geval van hipersteen. Die identifikasie van hierdie ontmengingslamella is ook nie bevestig nie. Ougiet is met behulp van die mikrosonde geïdentifiseer (Afd. VI). Die teenwoordigheid van ougiet in die granoliete is in ooreenstemming met die waarneming dat hierdie mineraal algemeen teenwoordig is in mafiese gesteentes van die granulietfasies, terwyl diopsied weer algemeen teenwoordig is in laer-gradse gesteentes (Miyashiro, 1973, p. 260).

Hornblende (Afd. VI-2.1) is nie 'n kenmerkende bestanddeel van die hipersteen-ougietgranoliete nie. Die meeste monsters bevat minder as vyf volume persent hornblende, terwyl slegs twee monsters meer as vyftien volume persent van hierdie mineraal bevat (Tabel 5). Die mineraal wissel van groen-bruin tot kakiekleurig en vorm altyd oneievormige kristalle wat veral met pirokseen geassosieer is. Die voorkomswyse van hornblende in hierdie assosiasie word grootliks deur die hoeveelheid van hierdie mineraal beheer. In die geval van die granoliete wat baie min hornblende bevat is hierdie mineraal byna uitsluitlik beperk tot smal sones wat pirokseen en magnetiet gedeeltelik omring (Fig. 15b). Die hornblenderyke granoliete word weer deur 'n wisselvallige voorkomswyse van hornblende in dieselfde gesteente gekenmerk. Hornblende in laasgenoemde gesteentes is teenwoordig as smal sones wat pirokseen en magnetiet gedeeltelik omring, as groot oneievormige kristalle in kontak met pirokseen, en as groot kristalle wat met pirokseen vergroei is. Die verskillende voorkomswyses van hornblende vertoon geen kleurverskille nie, en die kontakte van die groter kristalle met hipersteen en ougiet is altyd skerp en reëlmatig (Fig. 15c

en d). Enkele monsters word gekenmerk deur die teenwoordigheid van beide groen-bruin en blou-groen hornblende. Laasgenoemde mineraal vorm egter rande om beide pirokseene en groen-bruin hornblende en is duidelik sekondêr.

Plagioklaas is 'n hoofbestanddeel van al die granoliete (Tabel 5) en kom voor as oneievormige tot halfeievormige kristalle wat selde tekens van verandering toon. Polisintetiese vertweeling is baie algemeen en die individuele lamella is besonder goed ontwikkel. Sommige tweelinglamella vertoon soms tekens van vervorming. Sonering is nie waargeneem nie, en dieselfde geld vir antipertiet. Die samestelling van plagioklaas wissel tussen An_{40} en An_{67} .

Kwarts is 'n skaars bykomstige mineraal in die granoliete. Die meeste monsters bevat geen kwarts nie, en indien die mineraal wel teenwoordig is, kom dit voor as enkele verspreide oneievormige korrels wat altyd meer fynkorrelrig is as die geassosieerde minerale.

Magnetiet en ilmeniet is baie opvallende bykomstige minerale in al die granoliete wat ondersoek is. Beide oksiedes is min of meer in gelyke hoeveelhede teenwoordig, en is altyd meer fynkorrelrig as die silikate. Die oksiedes kom verspreid deur die gesteentes voor, maar is ook baie algemeen teenwoordig as insluitels in veral ougiet en hipersteen. Die kontakte met die silikate is sonder uitsondering altyd skoon en baie reëlmatig. Beide magnetiet en ilmeniet konsentreer soms as fyn korreltjies langs die korrelgrense van pirokseene en hornblende, terwyl magnetiet in assosiasie met hipersteen soms deur 'n smal sone van kwarts omring word. Hierdie verskynsel is egter nie algemeen nie.

Die oksiedes vorm algemeen diskrete kristalle maar is net so algemeen ook intiem met mekaar geassosieer. Die kontakte tussen magnetiet en ilmeniet is altyd geboë. Vergroeiings van ilmeniet met magnetiet is ook 'n algemene verskynsel. Die vergroeiingsteksture is egter baie reëlmatig en word

gekenmerk deur enkele breë lamella van ilmeniet in magnetiet. Chalcopiriet is 'n uiters skaars mineraal in enkele monsters, en is nooit in kontak met die oksiedes gevind nie.

2.2 DIE AMFIBOLIETE

Die amfiboliete is donkergroen gesteentes wat oor die algemeen baie swak in die Ortoamfiboolsone dagsoom. Die gesteente besit 'n baie opvallende foliasie wat in sterk teenstelling is met die meer massiewe voorkoms van die granoliete. Hierdie foliasie word veroorsaak deur die oriëntasie van prismatiese kristalle van hornblende. Gebandheid, veroorsaak deur variasies in mineralogie, is afwesig. Segregasies van kwarts is egter baie algemeen, en die dagsoomvoorkoms van die amfiboliete stem in hierdie opsig baie ooreen met dié van die granoliete. Die mineralogiese samestelling van die amfiboliete word in tabel 5 opgesom. Die gesteentes bestaan hoofsaaklik uit hornblende en plagioklaas met bykomstige diopsied (Afd. VI-2-2) en kwarts. Sfeen is soms in klein hoeveelhede teenwoordig, terwyl epidoot 'n sekondêre veranderingsproduk is van plagioklaas en diopsied. Die amfiboliete bevat uiters min of geen ertsminerale, en hierdie waarneming is in opvallende teenstelling met die byna alomteenwoordigheid van ertsminerale in die granoliete.

Sommige amfiboliete bevat geen klinopirokseen, maar die teenwoordigheid of afwesigheid van hierdie minerale skep geen basis vir die onderverdeling van die amfiboliete in pirokseenryke en pirokseenvrye tipes nie. Beide gesteentetipes word deur dieselfde tekstuurverwantskappe gekenmerk en word as een groep bespreek.

Die amfiboliete is fyn- tot middelkorrelrige gesteentes met 'n tekstuur wat wissel vanaf granoblasties ewekorrelrig tot nematoblasties. Die nematoblastiese tekstuur word

veroorzaak deur die teenwoordigheid van prismatiese kristalle van hornblende. Die kontakte tussen hornblende en plagioklaas is gewoonlik geboë. Die granoblastiese tekstuur is baie soortgelyk aan dié van die granoliete.

Hornblende is die mees algemene bestanddeel van die amfiboliete en wissel in voorkoms vanaf ewekorrelrige en oneievormige kristalle in die granoblastiese gesteentes tot halfeievormige prismatiese kristalle in die nematoblastiese gesteentes. Die kleur wissel vanaf liggroen tot donkerder groen met blou skakerings, en is in teenstelling met die bruin skakerings wat opvallend is van hornblende in die granoliete. Die verandering in die kleur van hornblende vanaf groen tot bruin met 'n toename in die graad van metamorfose is 'n waarneming wat baie algemeen in die literatuur beskryf word (Miyashiro, 1973). Hornblende bevat soms insluitels van kwarts en plagioklaas.

Diopsied is nie 'n kenmerkende bestanddeel van die amfiboliete nie, en is of in klein hoeveelhede teenwoordig, of is heeltemal afwesig (Tabel 5). Die mineraal is liggroen, effens pleochroïes en vorm klein, onreëlmatige kristalle wat deur 'n ingevrete voorkoms gekenmerk word. Die verhouding van pirokseen tot hornblende wissel redelik baie. In die meeste amfiboliete is ougiet slegs teenwoordig as enkele relikte wat deur hornblende ingesluit word. Enkele monsters word egter ook gekenmerk deur reëlmatige korrelgrense tussen hierdie twee minerale. Hipersteen is slegs in twee monsters as enkele relikte geïdentifiseer wat geheel en al deur hornblende ingesluit word.

Plagioklaas is 'n algemene mineraal in die amfiboliete en kom voor as oneievormige tot halfeievormige kristalle met geboë en reguit korrelgrense. Polisintetiese vertweeling is goed ontwikkel en antipertiet is afwesig. Sonering is in enkele kristalle waargeneem, en is beperk tot die buitenste grense van die mineraal. Plagioklaas vertoon nie altyd vars nie en is soms geheel en al verander. Die same-

stelling van plagioklaas varieer vanaf An_{25} tot An_{48} (Tabel 5).

Kwarts is in baie groter hoeveelhede teenwoordig as in die geval van die granoliete (Tabel 5). Die mineraal kom verspreid deur die gesteentes voor, en is in enkele gevalle beperk tot insluitels in hornblende.

Sfeen is soms in klein hoeveelhede teenwoordig en kom altyd voor as klein verspreide korrels wat soms deur hornblende ingesluit word.

Die epidoot-groep minerale is baie skaars en kom voor as veranderingsprodukte van plagioklaas, of in kontak met ougiet.

Magnetiet en ilmeniet is in baie klein hoeveelhede in enkele monsters geïdentifiseer. Die meeste magnetietkristalle is langs die korrelgrense na sekondêre hematiet verander.

2.3 EWEWIGSASPEKTE VAN SAMEBESTAANDE MINERALE IN DIE MAFIESE GNEIS

Die regionale verspreiding van die amfiboliete en hipersteen-ougietgranoliete stem goed ooreen met die posisie van die Ortopirokseenreaksie-isograad soos afgelei is uit die detail petrografiese ondersoek van die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie. Die Mafiese gneis besit egter 'n eenvoudige mineralogiese samestelling en vertoon min tekens van die komplekse metamorfe geskiedenis wat so opvallend deur monsters van die Pelitiese gneis weerspieël word.

Die volgende is 'n kort opsomming van die meer belangrike teksturele eienskappe van hierdie gesteentes wat belangrik is in soverre dit die metamorfe geskiedenis van die gebied betref.

Die petrografiese ondersoek van die hipersteen-ougietgranoliete is 'n aanduiding dat hornblende in die meeste monsters in ewewig is met samebestaande hipersteen en ougiet. Die kontakte tussen hierdie minerale is gewoonlik baie reëlmatig sonder enige opvallende tekens van reaksie (Fig. 15c en d). Tekens van moontlike teksturele onewewig word egter in enkele monsters (M 292 en M 331) geïllustreer deur die waarneming dat hornblende byna uitsluitlik beperk is tot onreëlmatige sones om hipersteen, ougiet en ertsminerale (Fig. 15b). Die kontakte tussen amfibool en pirokseen in hierdie monsters is uiters onreëlmatig en dit lyk dus asof hornblende hier 'n sekondêre mineraal is. Hierdie gesteentes bevat egter baie min hornblende (Tabel 5), en die groenbruin kleur verskil nie van hornblende in die res van die granoliete nie.

Enkele monsters in die Ortopirokseensone word egter gekenmerk deur die teenwoordigheid van groot hoeveelhede hornblende en deur die afwesigheid van hipersteen. Ougiet is self in baie klein hoeveelhede teenwoordig en word duidelik deur hornblende vervang. Die afleiding wat hieruit gemaak kan word is dat 'n toename in hornblende gepaard gaan met die wydverspreide vervanging van samebestaande pirokseen. Hierdie gevolgtrekking word ondersteun deur die waarneming dat klinopirokseen blykbaar ook nie 'n stabiele mineraal in amfiboliete van die Ortoamfiboolsone is nie. Indien ougiet wel teenwoordig is kom dit in klein hoeveelhede voor as onreëlmatige korrels wat soms geheel en al deur hornblende ingesluit word. Relikte van hipersteen is ook in enkele amfiboliete waargeneem, maar hierdie monsters is beperk tot die onmiddellike omgewing van die Ortopirokseenreaksie-isograad.

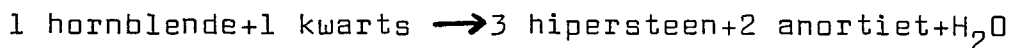
Magnetiet in assosiasie met hipersteen in die hipersteen-ougietgranoliete word soms gedeeltelik omring deur 'n smal sone van kwarts. Saxena (1969a) skryf hierdie tekstuur toe aan 'n reaksie waarin ortopirokseen met water reageer om magnetiet en kwarts te vorm. Hierdie verwantskap tussen

magnetiet en kwarts is egter 'n seldsame verskynsel, en is onbeduidend in vergelyking met die reëlmatige kontakte wat kenmerkend is van magnetiet en hipersteen in die meeste monsters wat ondersoek is.

2.4 DIE METAMORFE STATUS VAN HORNBLLENDE, EN DIE ONTWIKKELING VAN HIPERSTEEN EN OUGIET IN DIE ORTOPIROKSEENSONE

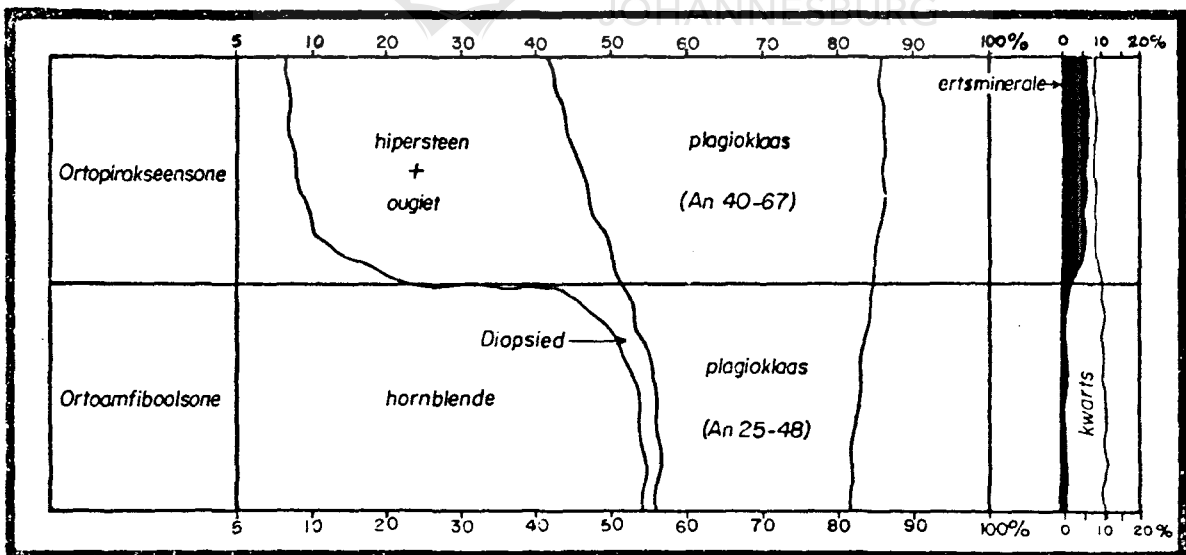
Die stabiliteit van hornblende in die granulietfasies is 'n welbekende waarneming wat algemeen in die literatuur beskryf word (Ray, 1972; Davidson, 1968; Saxena, 1968a; Binns, 1965; Jackson, 1976). De Waard (1965) het 'n voorstel gemaak op grond waarvan die granulietfasies onderverdeel word in 'n hornblende-granuliet-subfasies en 'n pirokseen-granuliet-subfasies. Die meeste granulietterreine word egter gekenmerk deur die teenwoordigheid van hornblende, en hornblendevrye granuliete is uiters skaars (De Waard, 1965, p. 456).

Die dehidrasie van hornblende word algemeen voorgestel as die hoofmeganisme vir die ontwikkeling van piroksene in die granulietfasies. De Waard (1965) het die volgende dehidrasiereaksie voorgestel:



Die petrografiese ondersoek van die Mafiese gneis het geen teksturele inligting verskaf vir die ontwikkeling van hipersteen en ougiet as gevolg van die dehidrasie van hornblende nie. Die geskatte modale samestelling van hierdie gesteentes in die Ortoamfibool- en Ortopirokseensones skep egter 'n basis vir die kwalitatiewe ondersoek van moontlike reaksies wat wel aanleiding kon gee tot die ontwikkeling van piroksene in die hipersteen-ougietgranuliet. Die volgende algemene afleidings kan met verwysing na figuur 16 en tabel 5 gemaak word:

- (i) Die totale persentasie mafiese minerale verskil nie grootliks van een sone na 'n ander nie (gemiddeld 48 volume persent in die Ortopirokseensone en 57 volume persent in die Ortoamfiboolsones).
- (ii) Die afname in die persentasie hornblende van ongeveer 55 volume persent in die Ortoamfiboolsones na ongeveer 7 volume persent in die Ortopirokseensone is in ooreenstemming met die ontwikkeling van hipersteen en ougiet uit hornblende tydens prograad-metamorfose.
- (iii) Ertsminerale (magnetiet en ilmeniet) neem toe van minder as een volume persent tot ongeveer 6 volume persent met oorgang van die Ortoamfibool na die Ortopirokseensone.
- (iv) Die hoeveelheid, en anortietinhoud, van plagioklaas neem toe in die Ortopirokseensone, terwyl die persentasie kwarts afneem.

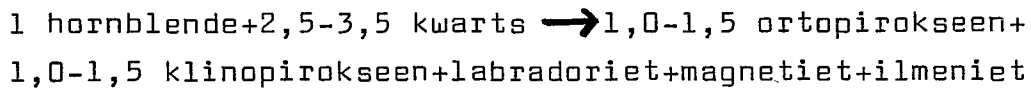


Figuur 16 Variasie in die modale samestelling (in volume persent) van die Mafiese gneis in die verskillende metamorfe sones

Hierdie gegewens is in ooreenstemming met die dehidrasie van hornblende met toenemende graad van metamorfose. Op teksturele gronde kon daar egter geen bewyse vir dehidrasie-

reaksies gevind word nie en die beskikbare inligting dui eerder op die ontwikkeling van hornblende as gevolg van hidrasiereaksies.

Sen en Ray (1971) het die volgende dehidrasiereaksie vir die ontwikkeling van pirokseen voorgestel op grond van die kwantitatiewe ondersoek van die samestelling van hornblende en pirokseen uit verskeie granulietterreine:



Hierdie reaksie stem in alle opsigte ooreen met die waargenome variasie in die modale samestelling van die amfiboliete en hipersteen-ougietgranoliete. Die volgende teksturele inligting is egter 'n aanduiding dat bogenoemde reaksie in die Mafiese gneis nie 'n dehidrasiereaksie is nie, maar wel moontlik 'n hidrasiereaksie:

- (i) Die teenwoordigheid van smal sones van hornblende met onreëlmatige kontakte om hipersteen, ougiet en ertsminerale in monsters M 331 en M 292 (Fig. 15b).
- (ii) Beide hipersteen en ougiet word wydverspreid deur hornblende vervang in die enkele monsters in die Ortopirokseensone wat deur groot hoeveelhede hornblende gekenmerk word.
- (iii) Klinopirokseen is selde 'n stabiele mineraal in die amfiboliete, en kom algemeen voor as enkele relikte wat soms geheel en al deur hornblende ingesluit word. Enkele relikte van hipersteen kan soms waargeneem word in monsters van die amfiboliete in die onmiddellike omgewing van die Ortopirokseenreaksie-isograad.
- (iv) Die teenwoordigheid van smal sones van hornblende om beide magnetiet en ilmeniet in die hipersteen-ougietgranoliete is 'n aanduiding dat hierdie twee

minerale ook by die hidrasiereaksie betrek word.

Die beskikbare petrografiese inligting is dus 'n aanduiding dat hornblende moontlik nie 'n primêre (prograad) mineraal in die hipersteen-ougietgranoliete is nie. Daar moet egter in gedagte gehou word dat dit nie altyd op petrografiese gronde moontlik is om prograad-hornblende van retrograad-hornblende te onderskei nie (Sen, 1970, p. 85). In die geval van die huidige ondersoek word hierdie probleem byvoorbeeld onderstreep deur die waarneming dat sogenaamde retrograad-hornblende, wat as mantels om pirokseen ontwikkel (Fig. 15b), nie op grond van kleur onderskei kan word van hornblende wat in teksturele ewewig met pirokseen is nie (Fig. 15c en d). 'n Verdere probleem is dat die ewewig tussen pirokseen en hornblende deur 'n deurlopende reaksieverwantskap beheer word (Winkler, 1974, p. 254). Die gelyewewig van hierdie reaksieverwantskap gee aanleiding tot die stabiele assosiasie van uitgangstowwe en produkte binne 'n beperkte PT-interval. As gevolg van hierdie probleme word die metamorfe status van hornblende later meer volledig uit 'n chemiese oogpunt bespreek (Afd. VI-2.1; Afd. VII-2.2.2.1).

3. SAMEVATTING VAN DIE HOOFPUNTE VAN DIE PETROGRAFIESE ONDERSOEK VAN METAMORFOSE

Die petrografiese ondersoek van die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie het bewys gelewer dat hierdie gesteentetipe by uitstek geskik is vir 'n detail chemies-mineralogiese ondersoek van die proses van metamorfose en die metamorfe ontwikkeling van die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfekompleks. Die regionale verspreiding van die Ortopirokseen- en Ortoamfiboolsones (Fig. 2 en 7) kan baie akkuraat op grond van mineralogiese variasies in hierdie gesteentetipe gedefinieer word, en dieselfde geld vir opeenvolgende metamorfe reaksies wat verantwoordelik is vir die hoof-ewewigstoestande in die verskillende metamorfe

sones soos huidige waargeneem word.

Die mees opvallende petrografiese kenmerk van die kordiëriet-granaatgranoliete is die ontwikkeling van die reaksie-koronas waarin granaat afbreek om kordiëriet en hipersteen te vorm (Fig. 11a-d). Die eksterne metamorfe toestand wat hierdie reaksie beheer het is egter voorafgegaan deur 'n periode van granulietgraad van metamorfose wat gekenmerk is deur die afwesigheid van kordiëriet, en die stabiele assosiasie van granaat+hipersteen+biotiet. Kordiëriet was op hierdie vroeëre stadium waarskynlik nie geheel en al afwesig nie, soos geïllustreer word deur die waarneming dat hierdie mineraal ook ontstaan het as gevolg van reaksies wat die ontwikkeling van die koronateksture voorafgegaan het (Fig. 12a-d). Hierdie reaksies is egter slegs in enkele monsters van die kordiëriet-granaatgranoliete geïdentifiseer, en is geheel en al afwesig in die geval van die monsters waarin die koronateksture veral perfek geïllustreer word (Fig. 11). Kordiëriet was dus nie 'n hoofmineraal in die granaatgranoliete voordat die koronateksture ontwikkel het nie.

Daar kan dus met 'n groot mate van vertroue voorgestel word dat die gebied onderhewig was aan ten minste twee onafhanklike periodes van granuliet-graad van metamorfose, naamlik M_1 en M_2 . Die eerste (M_1) periode van prograad-metamorfose is opgevolg deur 'n tweede (M_2) periode wat as retrograad-metamorfose beskou kan word, met dien verstande dat hierdie tweede proses hoofsaaklik deur 'n afname in druk beheer is (Afd. VIII-2.3.4.2). M_2 is nie 'n lokale verskynsel nie, maar het aanleiding gegee tot die ontwikkeling van kordiëriet en 'n tweede generasie van hipersteen oor 'n gebied van ten minste 4 500 km² (Fig. 2 en 7). Die daaropvolgende aanvanklike hidrasie van kordiëriet in die Ortopirokseensone (Fig. 13b en c) is 'n aanduiding dat die fisiese toestand na M_2 geleidelik verander het. Hierdie hidrasiereaksie mag egter slegs 'n lokale retrograadeflek verteenwoordig wat nie duidelik aan enige metamorfe prosesse gekoppel is nie. Die

belangrike punt is egter dat die hidrasie van kordiëriet later is as die reaksie wat in die eerste plek tot die ontwikkeling van kordiëriet aanleiding gegee het.

Die Ortopirokseenreaksie-isograad word gedefinieer deur reaksies waarin beide kordiëriet en hipersteen hidreer om ortoamfibool (antofilliet en gedriet) en kianiet te vorm. Hipersteen en antofilliet vorm 'n stabiele assosiasie binne 'n baie beperkte interval langs die Ortopirokseenisograad, en hierdie isograad kan dus as 'n klassieke reaksie-isograad beskou word (Winkler, 1974, p. 65). Die hidrasie van kordiëriet is nie beperk tot die isograad nie, maar is identies aan die reaksie wat in die Ortopirokseensone geïdentifiseer is. Die verskil is egter dat die hidrasie-produkte langs die Ortopirokseenreaksie-isograad baie meer grofkorrelrig is as dié in die Ortopirokseensone (kyk Fig. 13b en c en Fig. 14a). Uit 'n petrogenetiese oogpunt is dit egter baie belangrik dat hipersteen en kordiëriet in die reaksiekoronas gelyktydig besig is om af te breek na ortoamfibool en kianiet. Die huidige posisie van die Ortopirokseenreaksie-isograad is dus nie gekoppel aan die tweede (M_2) periode van retrograad-metamorfose nie, maar wel aan 'n daaropvolgende derde (M_3) periode van retrograad-metamorfose. Hierdie isograad definieer dus nie die eerste verskyning van hipersteen in die Pelitiese gneis nie maar wel die verdwyning van hipersteen, en dit beteken dat die M_2 -Ortopirokseensone oorspronklik 'n groter verspreiding besit het as wat huidig die geval is. Die teenwoordigheid van relikte van kordiëriet, en in enkele gevalle ook van hipersteen, in die ortoamfiboolgneis is in ooreenstemming met die voorstel dat hierdie twee minerale vroeër 'n groter verspreiding besit het.

Tekens van hierdie komplekse metamorfe geskiedenis word nie opvallend deur die monsters van die Mafiese gneis geïllustreer nie. Dit is egter wel moontlik dat hipersteen en ougiet oorspronklik (gedurende M_1) ontwikkel het as gevolg van die dehidrasie van hornblende. Die waargenome hidrasie

TABEL 6 Opsomming van belangrikste petrografiese kenmerke van die Pelitiese Gneis van die Bandelierkop-Formasie

Metamorfe Sone	Reaksieverwantskappe	Ewigversamelings	Opmerking
1. Ortopirokseensone			
a. Kordierietvrye granaat-granoliete.	Geen opvallende reaksieverwantskappe.	Granaat + hipersteen + biotiet + kwarts + plagioklaas.	Die mineralogie van hierdie gesteentes is waarskynlik verteenwoordigend van die hoof-ewigstoestand in die Ortopirokseensone tydens M1
b. Kordieriet-granaat-granoliete.	(i) Ontwikkeling van reaksiekoronas waarin granaat afbreek om kordieriet en hipersteen te vorm.	Granaat + kordieriet + hipersteen (+ biotiet) in die koronateksture. Kwarts en plagioklaas is soms deel van hierdie assosiasie, terwyl K-veldspaat afwesig is.	Teenwoordigheid van twee generasies van hipersteen word aangedui deur groot verskille in korrelgrootte van hierdie mineraal in die reaksiekoronas en in die res van die gesteente. Die reaksiekoronas besit 'n isotrope maaksel en het tydens M2 ontwikkel. Hierdie reaksie is voorafgegaan deur die reaksies waarby biotiet en kianiet betrek is. Die aanvanklike hidrasie van kordieriet is gekoppel aan M3.
	(ii) Reaksies waarin biotiet en kianiet reageer om kordieriet, spinel en K-veldspaat te vorm.		
	(iii) Vervanging van granaat en plagioklaas deur kordieriet en kwarts.		
	(iv) Die aanvanklike hidrasie van kordieriet.		
c. Granaatvrye kordieriet-granoliete.	(i) Relikporfiroblaste waarin hipersteen met kordieriet vergroei is.	Kordieriet + hipersteen + biotiet + kwarts + plagioklaas.	Hierdie gesteentes verteenwoordig op petrografiese gronde die produkte van die volledige verloop van die reaksie waar granaat tydens M2 afbreek om kordieriet en hipersteen te vorm.
	(ii) Vergroeiing tussen biotiet en kianiet is steeds opvallend. Kordieriet, en soms ook spinel, is by hierdie vergroeiing betrek, terwyl K-veldspaat geheel en al afwesig is.		
2. Ortopirokseenreaksie-isograad			
a. Kordierietvrye gesteentes.	(i) Die hidrasie van kordieriet.	Kordieriet + hipersteen + gedriet + antofilliet + kianiet + kwarts.	Die hidrasie van kordieriet en hipersteen is duidelik later as die ontwikkeling van die koronateksture in die Ortopirokseensone. Die huidige posisie van die Ortopirokseenreaksie-isograad is dus gekoppel aan M3.
	(ii) Die hidrasie van hipersteen.		
b. Kordierietvrye gesteentes.	(i) Die hidrasie van hipersteen.	Hipersteen + antofilliet.	
3. Ortoamfiboolsonne			
a. Ortoamfiboolgneisse.	(i) Teenwoordigheid van antofilliet en gedriet in dieselfde gesteentes.	(i) Ortoamfibool + biotiet + kianiet + kwarts + plagioklaas.	Die ortoamfiboolgneisse verteenwoordig die hidrasieprodukte van die granaat-granoliete tydens M3. Die teenwoordigheid van relikte van kordieriet en hipersteen in hierdie gesteentes is 'n aanduiding dat die M2-Ortopirokseenone oorspronklik 'n groter verspreiding besit het as wat huidig die geval is.
	(ii) Relikte in die biotiet- en plagioklaasryke gesteentes waarin kordieriet vergroei is met ortoamfibool en kianiet. Granaat nie stabiel in teenwoordigheid van ortoamfibool nie.		
	(iii) Granaat en ortoamfibool vorm 'n stabiele assosiasie in die biotiet- en plagioklaasvrye gesteentes.	(ii) Granaat + ortoamfibool + kwarts.	
b. Granaat-kordieriet-sillimanietgneis.	Reaksie waarin granaat en sillimaniet reageer om kordieriet te vorm.	Granaat + kordieriet + biotiet + sillimaniet + kwarts.	Hierdie reaksie is slegs in twee monsters geïdentifiseer, en dit is ook die enigste monsters waarin kordieriet 'n stabiele mineraal is.

van hipersteen en ougiet in enkele monsters van die hipersteen-ougietgranoliete (Fig. 15b) kan dan waarskynlik gekoppel word aan die laaste (M_3) periode van retrograad-metamorfose. Hierdie voorstel word ondersteun deur die teenwoordigheid van relikte van hipersteen en ougiet in die amfiboliete wat geheel en al deur hornblende ingesluit word. Die Mafiese gneis is dus minder geskik vir 'n detail studie van die proses van metamorfose alhoewel sekere petrografiese eienskappe van hierdie gesteentes tog verband hou met die voorgestelde metamorfe ontwikkeling van die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfekompleks.

Die belangrikste petrografiese kenmerke van die Pelitiese gneis word kortliks in tabel 6 opgesom.



UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG

AFDELING V

CHEMIESE SAMESTELLING

VAN HOOF-GESTEENTETIPES

VAN DIE

BANDELIERKOP-FORMASIE



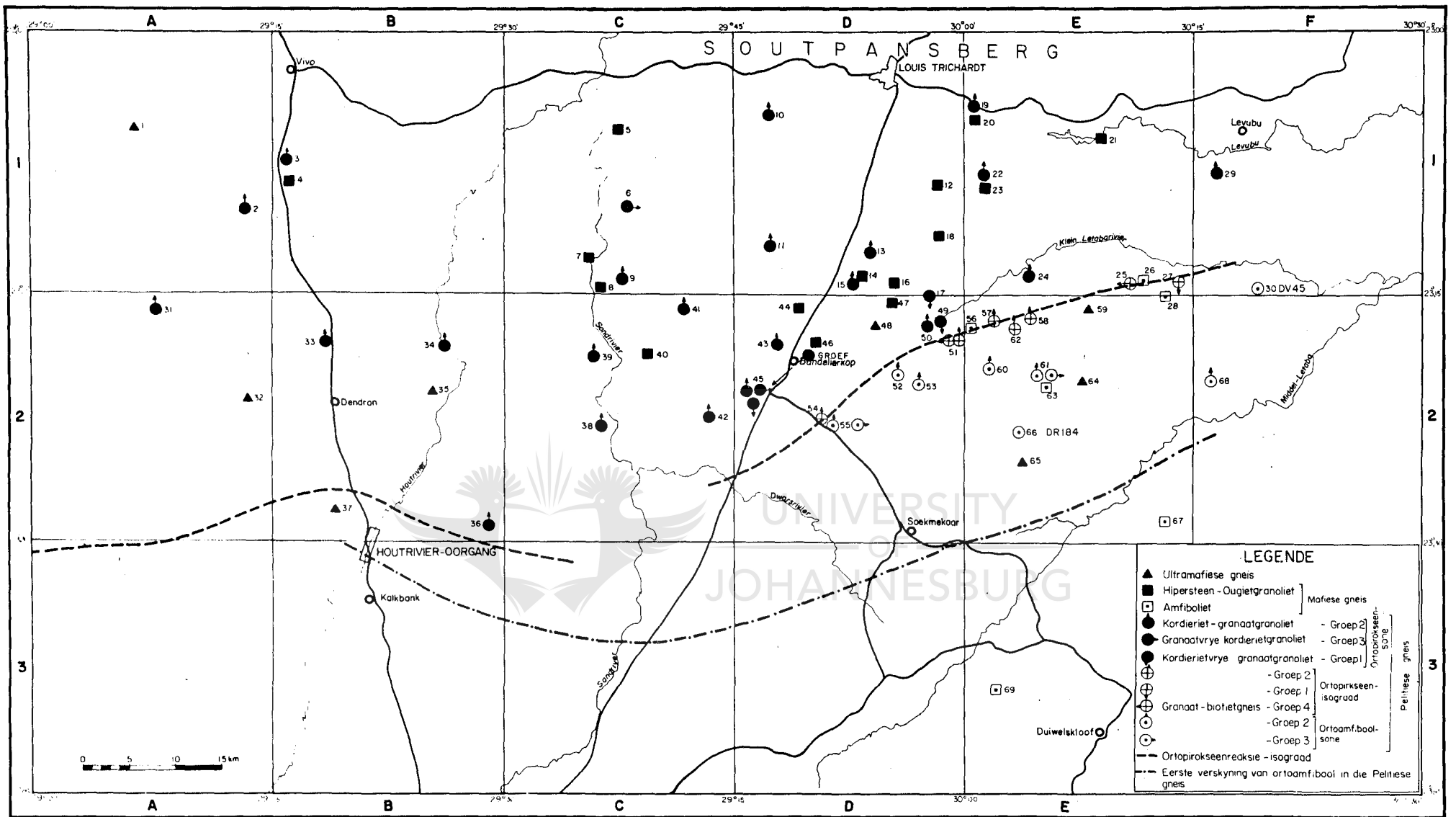
UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG

Die chemiese samestelling van die Pelitiese, Mafiese en Ultramafiese gneis word kortliks in hierdie afdeling beskryf. Die hoofdoel van hierdie bespreking is om vas te stel of die metamorfe ontwikkeling van die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfe kompleks in terme van isochemiese prosesse beskryf kan word. Die moontlike invloed van variasies in chemiese samestelling op die mineralogiese samestelling van die Pelitiese gneis in die verskillende metamorfe sones word ook kortliks bespreek, terwyl die waarskynlike oorspronklike karakter van die hoof-gesteentetipes uit 'n baie algemene oogpunt ondersoek word.

1. DIE PELITIESE GNEIS

Die totale chemiese samestelling van 50 verteenwoordigende monsters van die Pelitiese gneis in die verskillende metamorfe sones word in tabelle 7a-e gegee. Dertig van hierdie monsters is uit die Ortopirokseensone, tien is van die Ortopirokseenreaksie-isograad, en tien is uit die Ortoamfiboolsones. Die verspreiding van hierdie monsters word in figuur 17 gegee. Die chemiese samestelling van hierdie gesteentes word ook in ACF-, AFK-, en AFM-diagramme (Fig. 18a-c) geïllustreer. Om die res van hierdie bespreking te vergemaklik word die monsters uit die verskillende metamorfe sones in vier hoofgroepe onderverdeel (Tabel 8). Hierdie onderverdeling word ook op die lokaliteitskaart (Fig. 17) aangedui.

Die onderverdeling in tabel 8 is hoofsaaklik gebaseer op die drie hooftipes granaatgranoliete in die Ortopirokseen-sone (kyk Tabel 1), en die laer-graadse chemiese ekwiwalente langs die Ortopirokseenreaksie-isograad en in die Ortoamfiboolsones. Ondergesikte gesteentetipes, soos die hipersteenbiotiet-granoliete (R 9), die granaat-kordiëriet-sillimaniet-gneis (DV 45) en die biotiet- en plagioklaasvrye ortoamfiboolgneis (DR 184) word nie by hierdie onderverdeling betrek



Figuur 17 : Lokaliteitskaart wat slegs die verspreiding aandui van monsters van die Pelitiese, Mafiese en Ultramafiese gneis waarvoor chemiese analyses beskikbaar is. Die monsters word met veldnommers geïdentifiseer. Die onderverdeling van die Pelitiese gneis in groepe 1, 2 ens. word in tabel 8 gegee.

Tabel 7a Chemiese analises van die kordieriet-granaatgranoliete in die Ortopirokseenzone

Lab No.	^a DR. 19'	^a DR. 54'	^a DR. 59'	^a DR. 73'	^a DR. 80'	^d DV. 11'	^b M.X.1	^c M. 333'	^d M. 309'	^a R. 16'	^d DV. 56'
Veld No.	C2(41)	B1(3)	A1(2)	A2(31)	B2(34)	D2(45)	F1(29)	C2(39)	C1(9)	D1(13)	B2(36)
SiO ₂	56,85	64,45	63,99	56,27	60,92	53,58	55,20	58,49	62,56	56,50	55,50
Al ₂ O ₃	20,04	13,96	15,01	17,66	15,00	17,36	17,40	17,89	14,87	13,93	18,41
Fe ₂ O ₃	1,25	0,77	1,18	0,78	0,73	2,68	1,08	1,54	0,45	1,96	1,26
FeO	7,14	6,37	5,67	8,39	6,98	8,39	9,72	7,08	6,83	8,87	8,75
MgO	6,86	7,87	5,90	8,38	6,27	8,90	8,70	7,17	6,15	9,83	8,75
MnO	0,06	0,08	0,09	0,12	0,10	0,09	0,10	0,07	0,10	0,18	0,12
CaO	0,78	1,31	2,11	1,84	2,53	1,83	1,54	1,69	2,14	2,01	1,45
Na ₂ O	1,26	1,85	2,39	1,97	2,70	1,93	1,60	2,48	2,23	2,66	2,26
K ₂ O	2,67	1,45	1,89	1,84	1,57	2,21	1,94	1,96	1,49	1,04	1,50
TiO ₂	0,87	0,66	0,52	0,74	0,66	1,11	0,95	0,90	0,67	1,01	0,96
P ₂ O ₅	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,19	0,06	0,05	0,09	0,04	0,08
H ₂ O ⁺	0,85	0,57	0,65	0,89	0,91	0,49	1,40	0,81	0,51	0,72	0,69
CO ₂	0,94	0,44	0,29	0,51	0,69	0,49	-	0,44	0,19	1,14	0,49
H ₂ O ⁻	0,08	0,04	0,02	0,01	0,08	0,16	0,63	0,17	0,18	0,03	0,19
TOTAAL	99,67	99,85	99,75	99,44	99,19	99,91	100,32	100,74	98,46	99,92	100,41

Lab No.	^a DR. 20	^a DR. 84	^a R. 15	^d DV. 12	^a DR. 131	^a DR. 145	^a DR. 148	^a DR. 2	^a DR. 45	^a DR. 14	^a R. 13
Veld No.	C2(42)	B2(33)	D2(50)	D2(45)	D2(43)	E1(22)	E1(24)	D1(10)	E1(19)	D1(11)	D1(15)
SiO ₂	66,57	64,62	51,87	55,96	57,24	52,67	41,92	55,09	48,79	64,88	51,87
Al ₂ O ₃	14,14	13,46	18,92	15,69	16,37	16,94	16,71	17,88	19,28	14,02	18,92
Fe ₂ O ₃	0,39	0,98	1,17	2,59	1,17	0,64	2,97	0,73	2,18	1,01	1,17
FeO	5,75	6,77	10,09	9,11	9,34	8,31	13,24	8,04	10,61	6,49	10,09
MgO	5,10	6,63	9,68	7,75	7,33	10,51	15,78	8,35	9,44	6,43	9,68
MnO	0,08	0,09	0,13	0,08	0,11	0,11	0,17	0,12	0,14	0,09	0,13
CaO	2,21	1,91	1,49	1,05	1,44	1,67	1,54	1,60	1,86	1,70	1,49
Na ₂ O	2,40	2,13	1,41	1,72	1,62	1,78	0,30	1,28	1,68	2,20	1,41
K ₂ O	1,37	1,29	2,04	2,67	1,52	1,65	2,66	1,71	2,04	1,25	2,04
TiO ₂	0,50	0,68	0,92	1,07	0,74	0,82	1,15	0,84	0,98	0,65	0,92
P ₂ O ₅	0,05	0,03	0,04	0,52	0,04	0,06	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04
H ₂ O ⁺	0,66	0,59	1,06	0,43	0,98	3,16	1,88	3,16	1,73	0,72	1,06
CO ₂	0,30	0,49	0,66	0,39	1,21	0,80	0,83	0,64	0,68	0,32	0,66
H ₂ O ⁻	0,02	0,08	0,09	0,32	0,08	0,14	0,07	0,16	0,05	0,03	0,09
TOTAAL	99,54	99,75	99,57	99,35	99,19	99,26	99,25	99,64	99,50	99,34	99,57

Analistiekus : ^a General Superintendence Company.
^b Bergström & Bakker.
^c Nasionale Instituut vir Metallurgie.
^d Geologiese Opname

DR. 19' Monsters waarvoor mikrosonde analiese beskikbaar is.

Veldnommers: C2, B1 ens. verwys na koördinate in Fig. 17. Die syfers in hakketjies, bv. (41), (3) ens. verwys na veldnommers in dieselfde figuur.

nie. Groep 4 (granaat-biotietgneis) word deur slegs twee monsters langs die Ortopirokseenisograad verteenwoordig, maar word as 'n afsonderlike groep in tabel 8 gegee omdat hierdie monsters addisionele inligting in verband met die afwesigheid van kordieriet kan gee. Die onderverdeling van die ortoamfiboolgneisse in groepe 2 en 3 is gebaseer op die waarneming dat gedriet en antofilliet onderskeidelik hidrasieprodukte van kordieriet en hipersteen verteenwoordig (Fig. 14). Die inligting in tabel 8 word deurgaans in die res van hierdie ondersoek vir terugverwysing gebruik.

Tabel 7b Chemiese analises van die granaatvrye kordierietgranoliete en die hipersteen-biotietgranoliet (R. 9) in die Ortopirokseensone

Lab No. Veld No.	^a DR. 10' C1(6)	^a DR. 42-1' D2(45)	^a DR. 22 C2(38)	^a R. 9' D2(50)
SiO ₂	53,83	57,58	55,09	52,27
Al ₂ O ₃	18,11	16,75	15,91	11,38
Fe ₂ O ₃	0,99	0,23	1,15	1,66
FeO	7,92	7,08	7,46	9,48
MgO	11,52	10,45	11,37	17,23
MnO	0,11	0,09	0,10	0,17
CaO	1,35	1,98	1,83	2,11
Na ₂ O	1,66	1,92	2,13	2,70
K ₂ O	1,40	1,18	1,49	0,36
TiO ₂	0,86	0,65	0,71	0,70
P ₂ O ₅	0,04	0,04	0,03	0,03
H ₂ O ⁺	1,26	0,72	1,22	1,29
CO ₂	0,69	0,51	0,92	0,45
H ₂ O ⁻	0,03	0,02	0,06	0,03
TOTAAL	99,77	99,20	99,47	99,86

Tabel 7c Chemiese analises van die kordierietvrye granaatgranoliete in die Ortopirokseensone (Tabel 3).

Lab No. Veld No.	^a DR. 42-2' D2(45)	^c DV. 10 D2(45)	^a R. 29 D2(49)	^a DR. 124 D1(17)
SiO ₂	64,50	60,60	48,39	57,38
Al ₂ O ₃	16,35	16,88	13,48	12,58
Fe ₂ O ₃	0,22	1,87	2,93	2,04
FeO	4,59	4,34	11,38	11,87
MgO	3,60	3,88	13,18	8,81
MnO	0,08	0,09	0,17	0,18
CaO	4,59	5,52	1,84	2,18
Na ₂ O	3,09	3,27	2,19	1,45
K ₂ O	1,00	0,62	2,55	1,01
TiO ₂	0,52	0,54	1,19	0,64
P ₂ O ₅	0,18	0,52	0,03	0,06
H ₂ O ⁺	0,58	0,50	1,09	0,52
CO ₂	0,48	0,41	0,98	0,89
H ₂ O ⁻	0,08	0,18	0,07	0,06
TOTAAL	99,85	99,22	99,47	99,67

Analitikus : ^a General Superintendence Company.

^c Nasionale Instituut vir Metallurgie.

DR. 10' Monsters waarvoor mikrosonde analises beskikbaar is.

Veldnommers: C1, D2 ens. verwys na koördinate in Figuur 17.

Die syfers in hakies, bv. (6), (45) ens. verwys na veldnommers in dieselfde figuur.

Die mees opvallende waarneming wat met verwysing na tabelle 7a-e en figure 18a-c gemaak kan word is die beperkte variasie in die chemiese samestelling van die Pelitiese gneis as 'n geheel. Sekere subtiele, maar sistematiese verskille in chemiese samestelling is egter ook opvallend indien die vier hoofgroepe gesteentes van mekaar onderskei word.

Die monsters stip in die ACF-diagram (Fig. 18a) naby die A-F verbindingslyn en word almal deur intermediêre tot lae A-waardes gekenmerk. Die lae CaO-inhoud is dus opvallend, en die enigste uitsondering is monsters DR 42-2 en DV 10 (Groep 1) wat opvallend meer CaO as die res bevat. Geen

Tabel 7d. Chemiese analises van die kordieriet-granaatgranoliete, kordierietvrye granaatgranoliete (DV. 34 en DV. 38) en granaat-biotietgneis (DR. 150 en DR. 156) langs die Ortopirokseen-reaksieisograad

Lab No. Veld No.	^b DV. 3' D2(54)	^a DR. 157' D2(51)	^b DV. 40 E2(58)	^c DV. 50 D2(54)	^a DR. 151 E2(57)	^a DR. 155 E2(62)	^b DV. 38' E1(27)	^b DV. 34 E1(27)	^c DR. 150' E1(25)	^c DR. 156' D2(51)
SiO ₂	65,20	55,23	65,80	51,0	66,05	61,85	57,70	56,0	50,97	66,63
Al ₂ O ₃	13,70	18,50	13,40	18,01	13,76	15,77	14,70	14,50	19,41	14,49
Fe ₂ O ₃	0,88	0,73	0,90	2,05	0,82	0,61	3,0	1,39	1,43	0,72
FeO	7,92	8,88	8,00	11,02	5,75	7,12	10,80	12,5	10,22	5,67
MgO	6,30	8,86	5,90	9,99	5,31	6,67	7,60	5,50	6,53	3,76
MnO	0,08	0,10	0,10	0,05	0,10	0,10	0,12	0,10	0,05	0,09
CaO	1,39	0,68	1,57	2,43	1,78	0,88	1,99	1,95	2,35	2,64
Na ₂ O	1,80	0,81	1,80	1,41	2,40	1,09	2,50	2,60	2,63	2,87
K ₂ O	1,82	2,25	1,69	1,01	1,81	2,88	1,98	1,86	2,64	1,51
TiO ₂	0,68	0,82	0,60	0,78	0,55	0,68	0,66	0,58	0,92	0,51
P ₂ O ₅	0,05	0,07	0,14	0,09	0,08	0,07	0,11	0,09	0,07	0,03
H ₂ O ⁺	0,80	1,14	0,50	1,44	1,11	1,42	0,90	1,0	1,92	0,72
CO ₂	0,30	0,90	0,10	0,66	0,15	0,18	-	0,20	0,37	0,16
H ₂ O ⁻	0,12	0,20	-	0,17	0,03	0,07	0,46	0,62	0,23	0,06
Totaal	101,04	99,26	100,50	100,11	99,70	99,39	102,52	98,89	99,74	100,86

Tabel 7e Chemiese analises van die ortoamfiboolgneisse en granaat-kordieriet-sillimanietgneis (DV. 45) in die Ortoamfiboolsone. Die mineralogiese samestelling van die gesteentes word in Tabel 4 gegee

Lab No. Veld No.	^d DV. 2' D2(55)	^b DV. 23' E2(61)	^b DV. 43' E2(60)	^c DV. 53' D2(52)	^e M. 447' F2(68)	^b DV. 47' D2(53)	^b DV. 22' E2(61)	^c DV. 1' D2(55)	^a DR. 184' E2(66)	^b DV. 45' F1(30)
SiO ₂	48,12	64,70	65,40	69,16	57,26	68,30	57,40	65,36	49,97	51,70
Al ₂ O ₃	16,33	13,50	14,30	13,30	16,96	13,70	14,70	13,84	13,98	19,50
Fe ₂ O ₃	3,55	0,87	0,74	0,47	2,50	0,60	1,17	1,07	1,15	1,08
FeO	9,98	7,83	6,66	4,57	6,56	5,40	10,53	4,90	17,76	9,72
MgO	11,32	6,60	5,50	4,72	7,13	4,20	9,50	7,55	10,39	8,20
MnO	0,17	0,13	0,10	0,05	0,11	0,10	0,16	0,05	0,20	0,12
CaO	2,34	1,56	1,95	1,90	2,13	2,32	1,78	1,87	1,68	1,20
Na ₂ O	2,13	2,0	2,60	2,37	2,34	3,10	2,20	2,40	0,66	2,10
K ₂ O	1,76	1,66	1,86	1,29	1,18	1,37	0,29	0,23	0,52	3,43
TiO ₂	0,88	0,70	0,58	0,47	0,67	0,53	0,92	0,58	0,66	0,77
P ₂ O ₅	0,73	0,09	0,09	0,08	0,05	0,10	0,19	0,08	0,11	0,04
H ₂ O ⁺	1,22	0,70	0,90	1,26	1,69	0,50	0,80	1,06	1,46	1,80
CO ₂	0,51	0,10	-	0,28	0,19	-	0,30	0,09	0,69	0,20
H ₂ O ⁻	0,25	0,46	0,49	0,20	0,28	0,29	0,73	0,15	0,26	1,35
Totaal	99,29	100,90	101,17	100,12	99,05	100,51	100,67	99,23	99,49	101,21

Analitikus : ^aGeneral Superintendence Company. ^bBergström en Bakker.
^cNasionale Instituut vir Metallurgie. ^dGeologiese Opname.

DV. 2' : Monsters waarvoor mikrosonde analises beskikbaar is.

Tabel 7d Die kordieriet-granaatgranoliete bevat hier ook antofilliet, gedriet en kianiet.
Die kordierietvrye granaatgranoliete bevat hier ook antofilliet.

Veldnommers: D2, E2 ens. verwys na koördinate in Fig. 17. Die syfers in hakkes, bv. (54), (51) ens. verwys na veldnommers in dieselfde figuur.

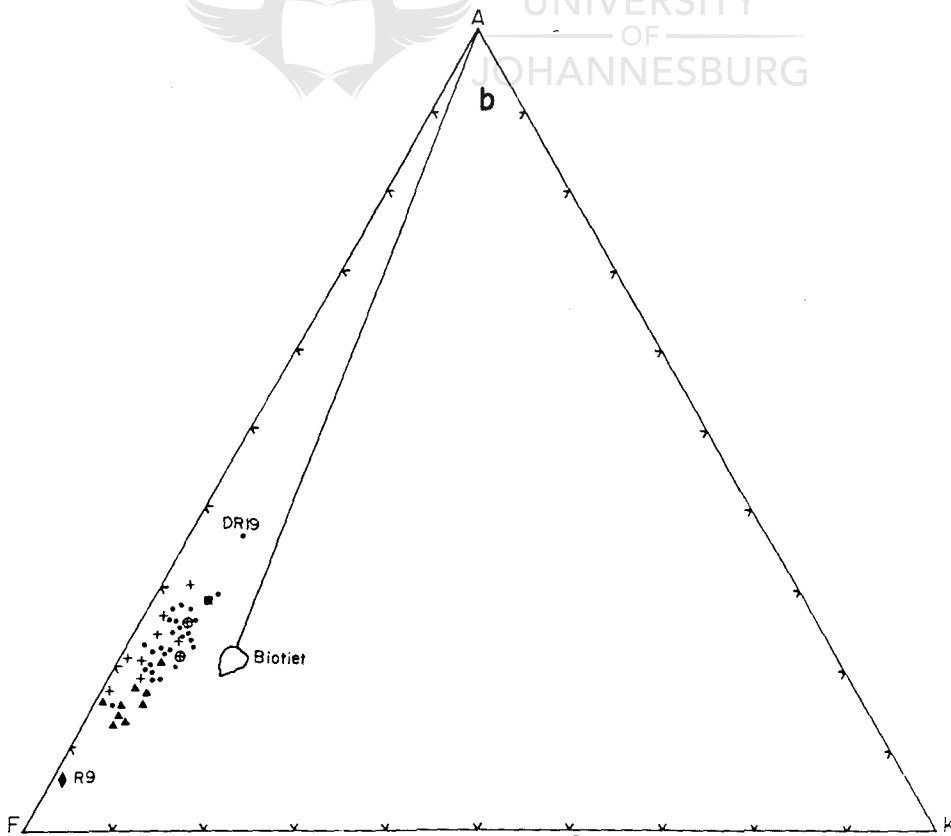
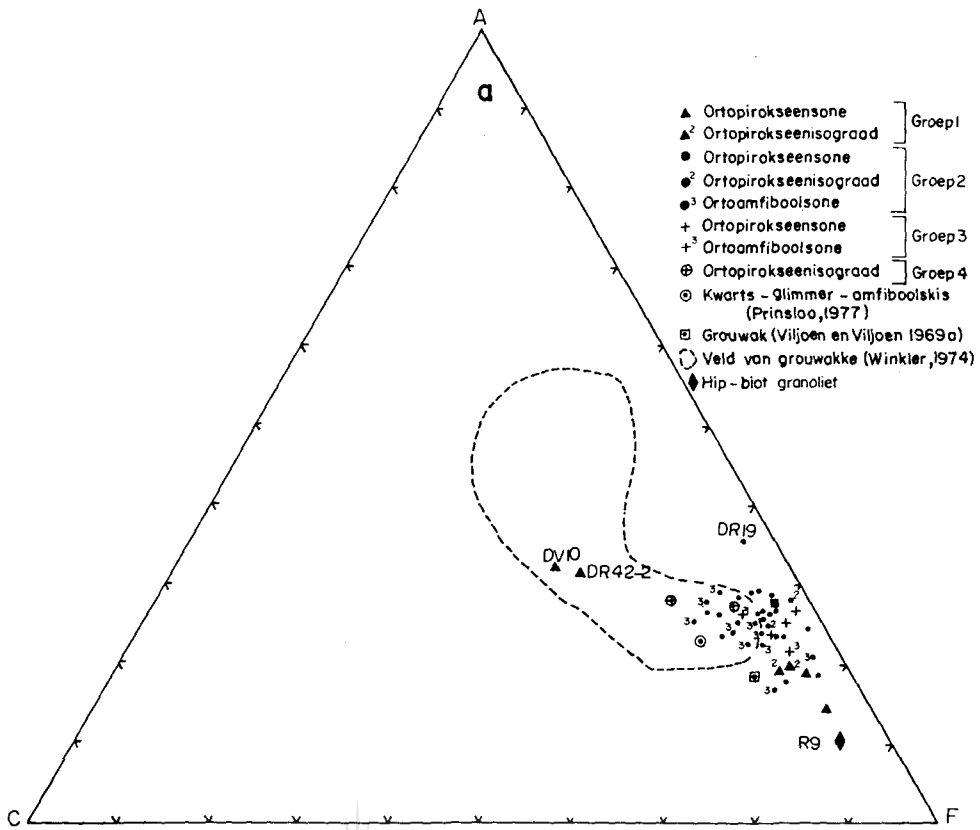
Opvallende onderskeid kan in hierdie diagram tussen groepe 2 en 3 getref word nie. Met die uitsondering van monsters DR 42-2 en DV 10 word groep 1 oor die algemeen deur 'n hoër F/A-verhouding as groepe 2 en 3 gekenmerk.

In die AFK-diagram (Fig. 18b) stip al die monsters aan die K₂O-arme kant van die verbindingslyn tussen A en biotiet. Dit is in ooreenstemming met die relatiewe afwesigheid van K-veldspaat in die meeste monsters (Tabelle 2 en 4). K-veldspaat is slegs in klein hoeveelhede in die groep 2

Tabel 8 Onderverdeling van die Pelitiese gneis in die verskillende metamorfe sones op grond van die mineralogiese en chemiese samestelling.

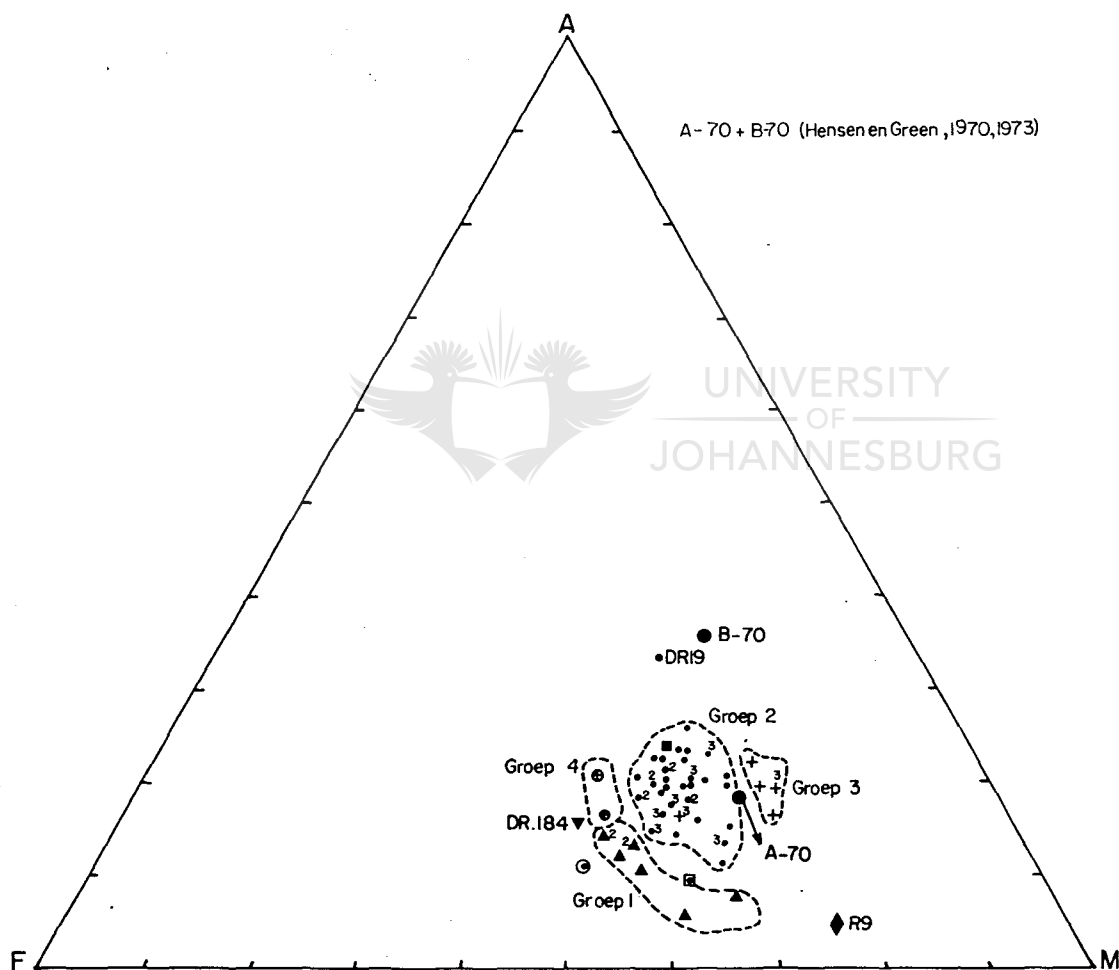
Metamorfe sone	Onderverdeling	
A. Ortopirokseensone	Kordiërietvrye granaatgranoliete (Tabel 7c)	- Groep 1
	Kordiëriet-granaatgranoliete (Tabel 7a)	- Groep 2
	Granaatvrye kordiërietgranoliete (DR 10 tot DR 22, Tabel 7b)	- Groep 3
B. Ortopirokseen-reaksie-isograad	Gran-hip-ant-biot granoliete DV 38 en DV 34, Tabel 7d)	- Groep 1
	Gran-hip-ant-kord-ged-kian-biot-granoliete (DV 3 tot DR 155, Tabel 7d)	- Groep 2
	Groep 3 nie verteenwoordig	
	Gran-biot gneis (DR 150 en DR 156, Tabel 7d)	- Groep 4
C. Ortoamfiboolsones	Groep 1 nie verteenwoordig	
	Gran-ant-ged-biot-kian gneis (DV 2 tot DV 22, Tabel 7e)	- Groep 2
	Ant-ged-kian-biot gneis (DV 1, Tabel 7e)	- Groep 3
	Geen analises is vir Groep 4 beskikbaar nie	

gesteentes van die Ortopirokseensone en in die groep 4 gesteentes van die Ortopirokseenreaksie-isograad geïdentifiseer. Dit is egter belangrik om daarop te let dat hierdie twee groepe gesteentes nie op grond van die K_2O -inhoud van die res van die gesteentes onderskei kan word nie, en dat die Pelitiese gneis as 'n groep deur 'n baie soortgelyke K_2O -inhoud gekenmerk word. Die groep 1 gesteentes word weer eens in die algemeen deur 'n hoër F/A-verhouding van die res onderskei, terwyl geen onderskeid tussen die groep 1 en groep 2 gesteentes getref kan word nie. Om die voorstelling te vergemaklik word die ooreenstemmende groepe gesteentes in die verskillende metamorfe sones nie op hierdie diagram van mekaar onderskei nie. Let verder daarop dat die A-



Figuur 18a+b ACF - en AFK - diagramme van die Pelitese gneiss van die Bandelierkop-Formasie. Hierdie diagramme illustreer die isochemiese karakter van die Pelitese gneiss in die verskillende metamorfe sones. ACF-waardes (Winkler, 1974). AFK-waardes: A= Al₂O₃ + Fe₂O₃ - Na₂O - CaO; K= K₂O; F= FeO + MgO + MnO.

waarde in hierdie diagram slegs die oormaat Al_2O_3 voorstel nadat Al_2O_3 met Na_2O en CaO verbind het om plagioklaas te vorm. K-veldspaat sal dus op hierdie diagram nie by K stip nie, maar wel met 'n K/A-verhouding van 1:1. Die gestipte posisies van die gesteentes in figuur 18b kan dus direk met die ooreenstemmende posisies in die AFM-diagram (Fig. 18c) vergelyk word.



Figuur: 18c AFM-diagram van die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie. Hierdie figuur illustreer die isochemiese karakter van die vier chemies verskillende groepe gesteentes (Tabel 8) in die verskillende metamorfe sones. Simbole selfde as in Figuur 18 a. AFM-waardes - Afd. VIII-1-3.

Die mees opvallende verskille in die samestelling van die Pelitiese gneis word egter deur die AFM-diagram van figuur 18c geïllustreer. Hierdie diagram is 'n projeksie deur K-veldspaat. Die konstruksie van die diagram word volledig in Afdeling VIII-1.3 bespreek. Dit is eerstens opvallend dat al die gesteentes in hierdie diagram deur intermediêre tot hoë M/F-verhoudings gekenmerk word. Die belangrikste waarneming is egter dat die verskillende groepe gesteentes verder ook baie duidelik op grond van sistematiese verskille in beide die M/F-verhouding en die A-waardes in die AFM-diagram onderskei kan word. Die groep 3 gesteentes besit die grootste M/F-verhouding, en daar bestaan 'n algemene neiging vir hierdie verhouding om geleidelik deur die groep 2 gesteentes na die groep 1 gesteentes af te neem. Dit is weer eens opvallend dat die groep 1 gesteentes ook deur 'n laer A-waarde as in die geval van die ander groepe gekenmerk word.

Die volgende algemene gevolgtrekkings kan dus met verwysing na figure 18a-c gemaak word:

- (i) Die Pelitiese gneis vertoon baie min variasie in chemiese samestelling en word as 'n geheel gekenmerk deur 'n lae CaO- en K₂O-inhoud, 'n intermediêre Al₂O₃-inhoud, en 'n hoë MgO+FeO-inhoud.
- (ii) Subtiele variasies in chemiese samestelling is egter onmiddellik opvallend indien die verskillende groepe gesteentes in tabel 8 op die AFM-diagram van figuur 18c onderskei word. Hierdie verskille is (met twee uitsonderings in die geval van groep 1) veral gekoppel aan die M/F-verhouding van die gesteentes. Die groep 3 gesteentes besit die grootste M/F-verhouding, en hierdie verhouding neem sistematies deur die groep 2 gesteentes na die groep 1 gesteentes af. Hierdie sistematiese variasie in chemiese samestelling word ook weerspieël deur variasies in die mineralogiese samestelling van die ooreenstemmende gesteentes. Die groep 3

gesteentes met die hoogste M/F-verhouding word in die Ortopirokseensone deur die teenwoordigheid van kordiëriet en die afwesigheid van granaat gekenmerk, en in die Ortoamfiboolsonne deur die teenwoordigheid van gedriet (en kianiet) en die afwesigheid van granaat. Die groep 2 gesteentes met 'n inter-mediêre M/F-verhouding bevat beide kordiëriet en granaat in die Ortopirokseensone, en granaat, gedriet en kianiet in die Ortoamfiboolsonne. Die groep 1 gesteentes word met twee uitsonderings (Fig. 18c) deur die laagste M/F-verhouding gekenmerk en bevat ook geen kordiëriet in die Ortopirokseensone nie. Ongelukkig is geen monsters van hierdie groep gesteentes uit die Ortoamfiboolsonne beskikbaar nie. Die teenwoordigheid van hierdie gesteentes langs die Ortopirokseenreaksie-isograad (Tabel 8) is egter 'n aanduiding dat die laer-graadse ekwiwalente in die Ortoamfiboolsonne deur die teenwoordigheid van granaat en antofilliet, en die afwesigheid van gedriet en kianiet gekenmerk sal word.

- (iii) Die kordiërietvrye granaatgranoliete (groep 1) vertoon geen opvallende tekens van reaksieverwantskappe nie. In teenstelling hiermee word die kordiëriet-granaatgranoliete (groep 2) deur 'n baie opvallende reaksieverwantskap gekenmerk waarin granaat afbreek om kordiëriet en hipersteen te vorm (Fig. 11a-c). Die granaatvrye kordiëriet-granoliete (groep 3) verteenwoordig die volledige verloop van hierdie reaksie (Fig. 11d). Die belangrike punt wat hier beklemtoon wil word is dat die metamorfe ontwikkeling van die Pelitiese gneis nie slegs beheer is deur veranderings in die fisiese toestande van metamorfose nie maar dat subtiele verskille in die chemiese samestelling van die gesteentes ook 'n bepalende rol gespeel het. Die afwesigheid van kordiëriet (of gedriet) in die

groep 1 gesteentes word dus uitsluitlik deur die chemiese samestelling van hierdie groep gesteentes beheer. In teenstelling hiermee word die afwesigheid van granaat in die groep 3 gesteentes (en dus die volledige verloop van die reaksie waarin granaat afbreek om kordiëriet en hipersteen tydens M_2 te vorm) deur beide die chemiese samestelling en fisiese toestande van metamorfose beheer (Afd. VIII).

- (iv) Alhoewel relatief min analyses vir die groep 1, groep 3 en groep 4 gesteentes beskikbaar is, is dit tog duidelik dat die verskillende groepe gesteentes as isochemiese reekse in die verskillende metamorfe sones beskou kan word. Variasies in die mineraalsamestelling binne elke groep in die verskillende metamorfe sones kan dus slegs gekoppel wees aan ooreenstemmende variasies in die fisiese toestande van metamorfose.
- (v) Dit is laastens met verwysing na figuur 18c ook duidelik dat die chemiese samestelling van die groepe 2 en 3 gesteentes redelik goed ooreenstem met die eksperimentele samestellings (A-70 en B-70) wat deur Hensen en Green (1970) gebruik is. Die resultate van hierdie eksperimentele ondersoek kan dus as basis vir die huidige ondersoek van die proses van metamorfose gebruik word.

Die invloed van chemiese samestelling op die stabiliteitsverwantskappe van kordiëriet, granaat en hipersteen word later volledig bespreek (Afd. VIII-2.3.2).

2. DIE MAFIESE GNEIS

Die totale chemiese samestelling van 21 verteenwoordigende monsters van die Mafiese gneis word in tabelle 9a en b, en op die ACF-diagram (Fig. 19) geïllustreer. Vyftien van

Tabel 9a Chemiese analiese en CIPW-norme van die hipersteen-ougietgranoliete in die Ortopirokseensone (Tabel 5).

Lab No. Veld No.	^a DR. 55' D1(4)	^d R. 51' D1(16)	^b M. 194' D2(47)	^b M. 292' C1(5)	^b M. 315' C1(9)	^b M. 339' C1(8)	^c M. 130' D1(12)	^d M. 201' D1(18)	^h M. 331' C2(40)	^d M. 109' D1(14)	^a DR. 40 D2(46)	^a DR. 125 D2(44)	^a DR. 44 E1(20)	^a DR. 160 E1(21)	^a DR. 166 E1(23)
SiO ₂	48,92	49,93	52,20	52,30	47,40	49,60	51,73	45,29	53,0	51,37	48,43	47,49	48,60	50,02	48,68
Al ₂ O ₃	12,35	14,45	15,40	12,40	14,50	14,40	12,96	15,32	15,50	14,49	11,86	12,06	15,48	14,85	13,85
Fe ₂ O ₃	1,37	2,96	0,83	1,28	1,38	1,25	3,32	3,09	0,86	2,00	3,18	1,46	1,20	1,34	1,23
FeO	7,81	7,38	7,47	11,52	12,42	11,25	8,31	10,77	7,74	7,45	6,53	6,76	6,87	7,41	8,33
MgO	12,77	6,68	7,80	8,70	7,30	8,10	8,39	7,66	6,20	8,08	7,53	6,89	8,68	6,70	8,38
MnO	0,17	0,18	0,14	0,18	0,20	0,19	0,12	0,18	0,12	0,13	0,22	0,22	0,11	0,17	0,19
CaO	12,35	10,04	10,30	10,00	12,40	10,80	9,81	12,51	13,40	10,09	15,32	19,25	10,67	11,98	12,82
Na ₂ O	1,55	4,04	3,80	2,60	2,50	2,70	2,86	3,19	2,60	3,18	2,18	1,09	2,56	2,62	2,15
K ₂ O	0,38	0,30	0,47	0,14	0,14	0,16	0,08	0,05	0,14	0,31	0,19	0,27	1,20	1,36	0,67
TiO ₂	0,49	1,41	0,76	0,43	1,21	0,84	0,57	0,93	0,68	0,80	1,35	0,27	0,73	0,71	0,65
P ₂ O ₅	0,09	0,54	0,10	0,22	0,12	0,12	0,32	0,35	0,05	0,43	0,71	0,09	0,13	0,12	0,10
Cr ₂ O ₃ (ppm)	1570	600	230	590	290	220	500	400	350	300	770	675	550	530	680
H ₂ O ⁺	0,78	0,75	0,60	0,80	0,60	0,70	0,69	0,19	0,20	0,89	0,86	2,37	2,57	1,58	1,72
CO ₂	0,26	0,37	0,40	0,20	-	-	0,14	0,26	0,10	0,01	1,31	1,03	0,38	0,56	0,22
H ₂ O ⁻	0,04	0,24	0,36	0,12	-	0,13	0,09	0,25	-	0,23	0,03	0,04	0,02	0,20	0,06
NiO (ppm)	360	n.b.	190	200	245	155	n.b.	n.b.	290	n.b.	230	260	352	250	240
TOTAAL	99,33	99,27	100,63	100,89	100,17	100,24	99,39	100,04	100,59	99,46	99,70	99,29	99,20	99,60	99,05

CIPW-Norme

Kwarts	0,00	0,00	0,00	1,45	0,00	0,00	2,26	0,00	3,57	0,00	1,98	0,00			
Ortoklaas	2,26	1,79	2,76	0,82	0,83	0,95	0,48	0,30	0,82	1,86	1,10	1,61			
Albiet	13,18	34,43	31,93	21,74	21,22	22,91	24,33	16,95	21,76	27,24	18,08	9,29			
Anortiet	25,74	20,55	23,40	21,50	28,01	26,76	22,40	27,27	29,86	24,64	21,57	27,39			
Diopsied	20,09	13,03	14,49	12,33	18,12	14,70	12,81	14,60	18,80	12,73	24,02	32,11			
Hedenbergiet	6,93	6,19	4,94	8,05	8,58	6,48	6,29	10,67	9,59	6,02	8,35	18,13			
Enstatiet	10,78	4,29	6,87	15,67	4,61	11,94	15,06	0,00	6,55	12,60	7,23	1,97			
Ferrosiliet	4,52	2,45	2,85	12,46	2,66	6,41	8,98	0,00	4,06	7,25	3,06	1,35			
Forsteriet	8,31	4,49	3,97	0,00	3,66	1,03	0,00	8,59	0,00	1,31	0,00	0,29			
Fayaliet	3,62	2,70	1,72	0,00	2,19	0,57	0,00	7,94	0,00	0,78	0,00	0,21			
Ilmeniet	0,94	2,70	1,43	0,81	2,30	1,60	1,09	1,76	1,28	1,54	2,51	0,52			
Magnetiet	2,0	4,32	3,60	3,73	7,56	6,39	4,84	4,47	3,15	2,93	4,52	2,13			
Chromiet	0,24	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,06	0,00	0,05	0,12	0,10			
Kalsiet	1,19	1,69	1,81	0,90	0,00	0,00	0,64	1,18	0,45	0,05	5,84	4,72			
Apatiet	0,21	1,26	0,23	0,50	0,28	0,28	0,75	0,81	0,12	1,01	1,61	0,21			
Nefelien	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,41	0,00	0,00	0,00	0,00			

n.b. Nie bepaal nie.

Analitikus: ^aGeneral Superintendence Company. ^bBergström en Bakker.

^cNasionale Instituut vir Metallurgie. ^dGeologiese Opname.

DR. 55' Monsters waarvoor mikrosonde analiese beskikbaar is.

Veldnommers: D1, D1 ens. verwys na koördinate in Figuur 17. Die syfers in hakkie verwys na veldnommers in dieselfde figuur.

Tabel 9b Chemiese analises en CIPW-norme van die amfiboliet in die Ortoamfiboolsone

Lab No. Veld No.	^a DR. 167 E2(67)	^a DR. 170 E3(69)	^c M. 471' E1(28)	^a DR. 164 E2(56)	^a DR. 165 E1(26)	^a DR. 169 E2(63)
SiO ₂	52,83	50,14	53,09	53,96	54,18	49,59
Al ₂ O ₃	12,56	8,90	14,67	11,61	10,26	6,80
Fe ₂ O ₃	0,77	2,15	3,92	2,10	2,21	1,33
FeO	7,61	10,39	6,01	8,65	10,42	10,99
MgO	12,36	11,35	6,21	7,86	7,45	12,67
MnO	0,17	0,24	0,05	0,20	0,21	
CaO	9,58	10,48	10,58	9,90	9,23	13,70
Na ₂ O	0,97	1,54	1,91	1,77	1,75	1,15
K ₂ O	0,17	0,77	0,35	0,60	0,69	0,45
TiO ₂	0,23	0,92	0,82	0,76	0,86	0,89
P ₂ O ₅	0,07	0,13	0,13	0,07	0,13	0,14
Cr ₂ O ₃ (ppm)	1700	1650	600	800	730	1880
H ₂ O ⁺	1,74	1,96	1,46	1,51	1,68	1,61
CO ₂	0,13	0,10	0,12	0,10	0,22	0,08
H ₂ O ⁻	0,03	0,22	0,29	0,11	0,08	0,20
NiO (ppm)	260	340	130	220	200	240
TOTAAL	99,22	99,29	99,61	99,20	99,37	99,58
CIPW-Norme						
Kwarts	5,88	0,00		8,66	9,66	0,00
Ortoklaas	1,02	4,64		3,61	4,13	2,96
Albiet	8,33	13,28		15,22	14,98	9,86
Anortiet	29,83	15,38		22,31	18,31	12,21
Diopsied	10,03	19,60		13,62	12,03	30,01
Hedenbergiet	3,73	9,72		8,00	9,17	14,82
Enstatiet	26,57	19,29		13,57	13,19	11,31
Ferrosiliet	12,01	11,64		9,70	12,23	6,80
Forsteriet	0,00	0,29		0,00	0,00	4,71
Fayaliet	0,00	0,18		0,00	0,00	2,94
Ilmeniet	0,44	1,78		1,47	1,65	1,71
Magnetiet	1,13	3,18		3,09	3,24	1,95
Chromiet	0,25	0,26		0,12	0,10	0,28
Kalsiet	0,60	0,46		0,46	1,01	0,37
Apatiet	0,17	0,31		0,17	0,31	0,33

Analitikus : ^a General Superintendence Company.

^c Nasionale Instituut vir Metallurgie.

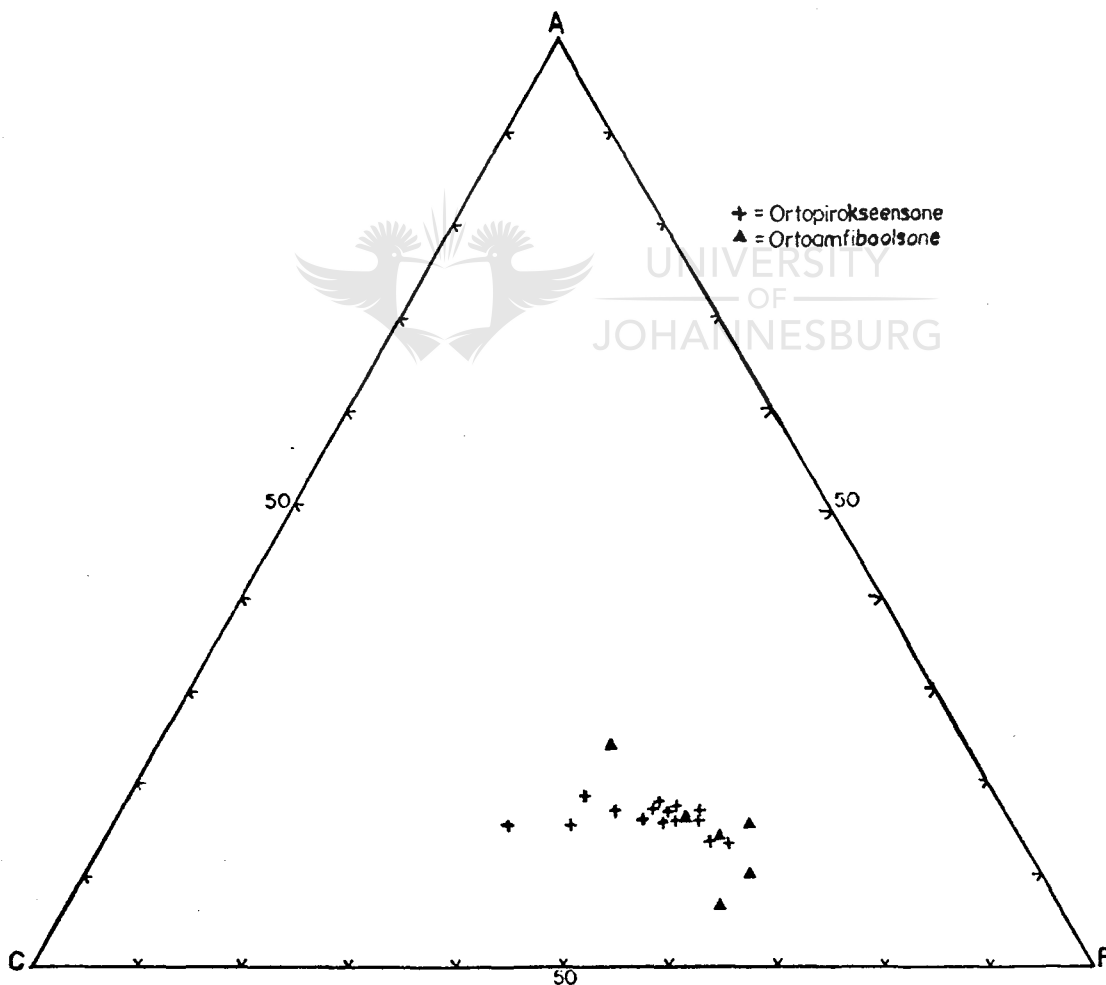
M. 471' Munster waarvoor mikrosonde analises beskikbaar is.

Veldnommers: E2, E3 ens. verwys na koördinate in Fig. 17. Die syfers in hakkes, bv. (67) verwys na veldnommers in dieselfde figuur.

hierdie monsters is uit die Ortopirokseensone, en ses is uit die Ortoamfiboolsone. Die verspreiding van hierdie monsters word in figuur 17 geïllustreer.

Die Mafiese gneis word in beide metamorfe sones deur 'n eenvoudige mineralogiese samestelling gekenmerk. Die chemiese samestelling (Fig. 19) varieer egter redelik baie. Hierdie variasie word hoofsaaklik deur verskille in die MgO+FeO/CaO-verhouding geïllustreer wat egter geen opvallende invloed op die mineralogiese samestelling van die gesteentes het nie.

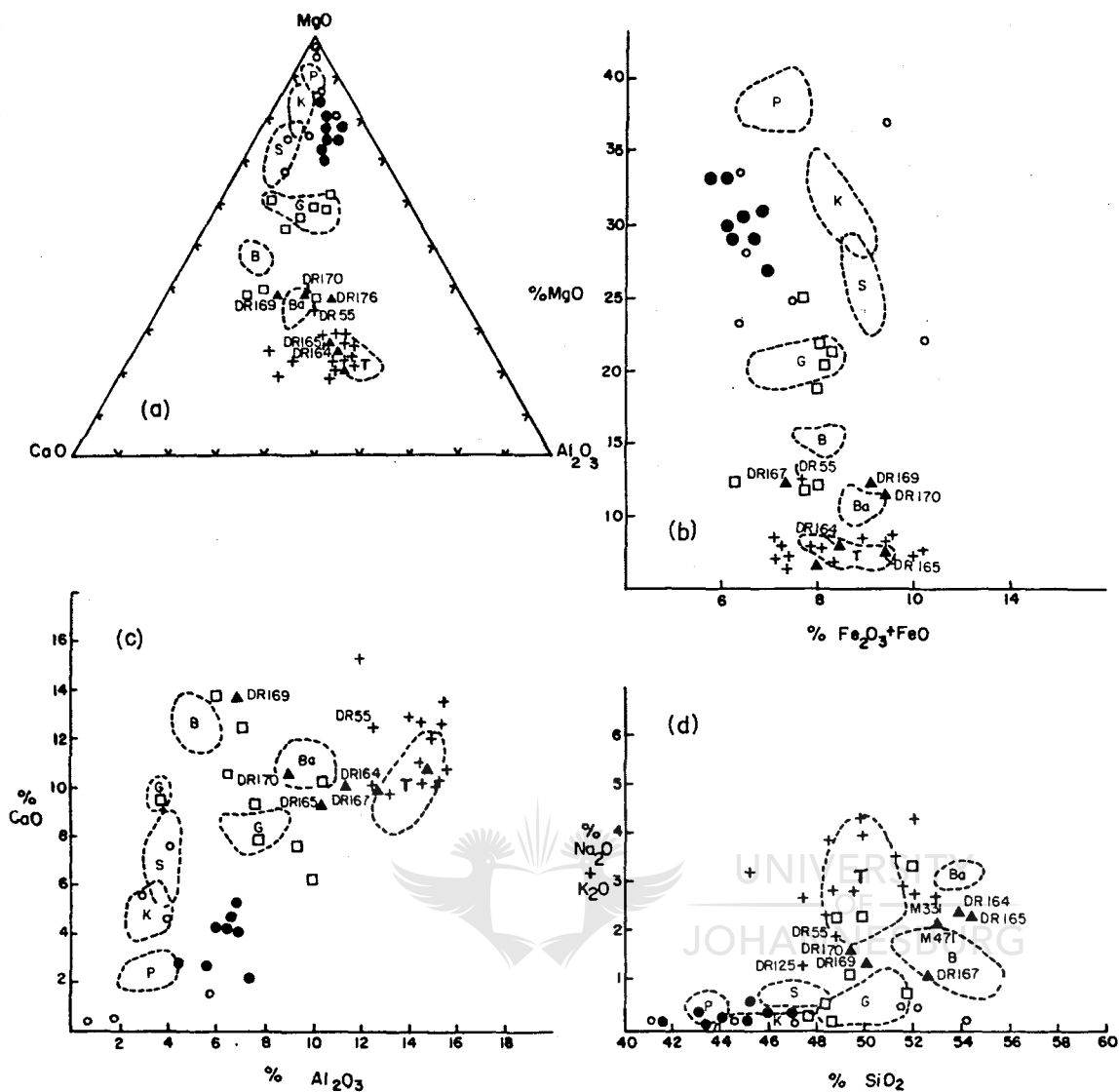
Die belangrikste gevolgtrekking wat egter met verwysing na figuur 19 gemaak kan word is dat die Mafiese gneis in die verskillende metamorfe sones ook as 'n isochemiese reeks gesteentes beskou kan word. Dit is dus duidelik dat die metamorfe geskiedenis van die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfekompleks volledig in terme van isochemiese prosesse beskou kan word, en dat grootskaalse metasomatiese prosesse geen rol gespeel het nie.



Figuur 19: ACF-diagram van die Mafiese gneis van die Bandelierkop-Formasie.

3. DIE OORSPRONKLIKE KARAKTER VAN DIE PELITIESE, MAFIESE EN ULTRAMAFIESE GNEIS VAN DIE BANDELIERKOP-FORMASIE

Die oorspronklike karakter van die Bandelierkop-Formasie is vir die doel van die huidige studie in geen detail ondersoek nie. Die bespreking wat volg is slegs daarop gemik om vas te stel of die Pelitiese, Mafiese en Ultramafiese gneis moontlik as die hoë-graadse metamorfe ekwivalente van soortgelyke gesteentes in 'n normale groensteengordel beskou kan word. Dit is belangrik omdat Mason (1971 en 1973) en Robertson (1973) van mening is dat 'n geleidelike oorgang vanaf die kraton na die Limpopo-metamorfe kompleks duidelik in Rhodesië en Botswana geïllustreer kan word, en dat die noordelike grenssone dus as 'n herwerkte graniet-groensteen-terrein beskou kan word. Mason (1973, p. 473) het voorgestel dat die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfe kompleks ook 'n soortgelyke oorsprong het. Die geleidelike oorgang in die suide vanaf die kraton na die metamorfe kompleks word dan ook duidelik geïllustreer deur dagsome in die Houtrivier suid van Dendron (Fig. 2 en Du Toit en Van Reenen, Fig. 4, 1978). In hierdie rivier kan daar geïllustreer word dat relatief onveranderde groensteentipe materiaal op die kraton progressiewe strukturele en metamorfe veranderinge noordwaarts in die rigting van die metamorfe kompleks ondergaan. Die dagsome is ongelukkig baie swak en hierdie oorgang kan slegs tot binne die Ortoamfiboolzone gevolg word. Die betrokke gesteentetipes (amfiboliete en ortoamfiboolgneisse) verskil egter nie mineralogies van soortgelyke gesteentes wat oos van die Matok-granietplutoon duidelik deur die Ortopirokseenreaksie-isograad tot in die Ortopirokseenzone gevolg kan word nie. Die oorgang in die Houtrivier is in detail deur Wilsenach (persoonlike mededeling) gekarteer wat van mening is dat skuifskewing geen rol gespeel het nie, en dat dit as 'n suiwer metamorfe oorgang beskou kan word. Die beskikbare veldinligting is dus 'n goeie aanduiding dat die Bandelierkop-Formasie oorspronklike groensteenmateriaal verteenwoordig. Die vraag is



Figuur 20: Ternêre en binêre variasiediagramme om die verwantskap van die Mafiese en Ultramafiese gneis van die Bandelierkop-Formasie met soortgelyke gesteentes uit die Sutherland- en Barbertongordels te illustreer.

- | | |
|--|-------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> + Hipersteen-ougietgranoliet ▲ Amfiboliet ● Ultramafiese gneis ○ Ultramafiese gesteentes □ Mafiese gesteentes | } Bandelierkop-Formasie |
| <ul style="list-style-type: none"> P Veld van bekende peridotiete Veld van Peridotitiese Komatiïet K Komatie-Formasie S Sandspruit-Formasie Veld van Basaltiese Komatiïet G Geluktipe B Badplaastipe Ba Barbertontipe T Veld van metatholeïet (Boonste Formasies van Onverwachtgroep) | } Sutherlandgordel (Prinsloo, 1977) |
- Volgens Viljoen en Viljoen (1969b en c).

egter of veral die Mafiese en Ultramafiese gneis ook op chemiese gronde met karakteristieke mafiese en ultramafiese gesteentes in 'n tipiese groensteengordel gekorreleer kan word. So 'n ondersoek word egter tot op 'n groot mate bemoeilik as gevolg van swak dagsome en die komplekse metamorfe geskiedenis van die ondersoekgebied.

Die samestelling van die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie word in figure 18a en c met die samestelling van grouwak uit die Sheba-Formasie van die Barbertongordel (Viljoen en Viljoen, 1969a) en die gemiddelde samestelling van kwarts-glimmer-amfiboolskis van die Klein Letabamyn en van die Khavagariheuwels van die Sutherlandgordel (Prinsloo, 1977, Tabel 3.18) vergelyk. Die mate van ooreenkoms met veral die grouwak van die Sheba-Formasie is opvallend, en die enigste verskil is dat die Pelitiese gneis oor die algemeen deur 'n hoë Al_2O_3 -inhoud gekenmerk word. 'n Groot gedeelte van die Pelitiese gneis val in figuur 18a ook in die veld van grouwakgesteentes soos deur Winkler (1974) gedefinieer. Die relatiewe hoë Mg- en Fe-inhoud van die grouwak van die Sheba-Formasie (en van die Pelitiese gneis) in figuur 18a word daaraan toegeskryf dat 'n groot hoeveelheid van die materiaal van 'n ultramafiese bron afkomstig is (Viljoen en Viljoen, 1969a). Die moontlikheid dat die Pelitiese gneis gemetamorfoseerde grouwakke verteenwoordig kan dus nie sonder meer verwerp word nie.

Die chemiese samestelling van die Mafiese gneis (Tabelle 9a en b) word in reeks binêre en 'n ternêre variasiediagramme (Fig. 20) met basaltiese komatiïete en metatholeïete van die Barberton- en Sutherlandgordels vergelyk. Dit is onmiddellik uit hierdie figure duidelik dat die grootste groep gesteentes goed ooreenstem met die metatholeïete van die boonste formasies van die Onverwacht-Groep. Enkele monsters vertoon egter ook duidelike ooreenkomste met tipiese komatiïete. DR 170 stip byvoorbeeld in drie van die vier diagramme in figuur 20 in die veld van die Barberton-tipe basaltiese komatiïet, terwyl DR 169, DR 167,

DR 164, DR 165 en DR 55 ooreenkomste met beide die Barber-ton-tipe en Badplaas-tipe komatziïete vertoon. Slegs monsters wat moontlik oorspronklike komatziïete verteenwoordig word in figuur 20 geïdentifiseer. Met verwysing na tabel 9a en b en figuur 20 is dit ook interessant om daarop te let dat die gesteentes wat redelik goed met komatziïete ooreenstem (DR 170, DR 169, DR 167, DR 55, DR 164 en DR 165) ook opvallend meer chroom as die res van die gesteentes (metatholeïete) bevat.

Tabel 10 Chemiese analises en CIPW-norme van die Ultramafiese gneis van die Bandelierkop-Formasie

Lab no.	DR. 60	DR. 74	DR. 78	DR. 115	DR. 133	DR. 186	DR. 191	DR. 192
Veld no.	A1(1)	A2(32)	B2(35)	B2(37)	D2(48)	E2(65)	E2(64)	E2(59)
SiO ₂	43,28	45,35	45,16	43,46	41,55	47,07	44,31	46,08
Al ₂ O ₃	5,58	6,74	5,96	7,26	4,34	6,49	6,27	6,58
Fe ₂ O ₃	3,41	3,61	2,49	2,07	3,35	1,19	2,11	2,44
FeO	4,22	4,24	3,84	4,73	2,80	4,99	5,43	4,74
MgO	32,30	27,75	30,25	31,96	34,97	31,15	34,93	30,42
MnO	0,01	-	0,14	0,15	0,14	0,15	-	0,13
CaO	2,58	5,19	4,05	2,04	2,67	4,52	4,14	3,92
Na ₂ O	0,24	0,42	0,15	0,08	0,07	0,42	0,11	0,19
K ₂ O	0,05	0,08	0,06	0,02	0,02	0,07	0,05	0,09
TiO ₂	0,16	0,10	0,10	0,04	0,03	0,05	0,03	0,06
P ₂ O ₅	0,02	0,05	0,04	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04
Cr ₂ O ₃ (ppm)	3920	4030	4170	4410	3840	4180	4130	4050
H ₂ O ⁺	6,61	5,33	6,85	7,12	6,24	1,69	1,36	3,24
CO ₂	0,86	0,16	0,17	0,15	2,97	1,18	0,47	1,45
H ₂ O ⁻	0,03	0,08	0,03	0,03	0,02	0,04	0,05	0,02
NiO (ppm)	1940	1750	1810	1750	1880	1720	2280	1950
TOTAAL	99,35	99,10	99,29	99,13	99,20	99,05	99,30	99,40

CIPW-Norme

Kwarts	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ortoklaas	0,31	0,50	0,38	0,13	0,12	0,41	0,30	0,33
Albiet	2,13	3,76	1,36	0,73	0,59	3,53	0,94	1,61
Anortiet	7,60	17,20	16,51	9,75	-5,71	14,60	16,55	10,01
Diopsied	0,00	6,40	2,66	0,00	0,00	0,00	0,61	0,00
Hedenbergiet	0,00	0,35	0,15	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00
Enstatiet	45,55	38,06	43,38	46,84	55,60	39,92	26,04	50,65
Ferrosiliet	2,61	2,51	2,89	4,29	1,43	4,37	2,48	4,59
Forsteriet	27,29	22,45	25,28	26,82	21,86	26,02	42,81	17,53
Fayaliet	1,63	1,54	1,75	2,55	0,58	2,96	4,24	1,65
Ilmeniet	0,32	0,20	0,20	0,08	0,06	0,09	0,06	0,11
Magnetiet	5,19	5,53	3,87	3,24	5,10	1,71	3,07	3,53
Chromiet	0,60	0,62	0,65	0,70	0,58	0,61	0,61	0,60
Kalsiet	4,12	0,77	0,83	0,74	13,46	5,33	2,15	6,59
Apatiet	0,05	0,12	0,10	0,05	0,07	0,09	0,09	0,09
Korund	2,61	0,00	0,00	4,09	6,28	0,33	0,00	2,50

Analitikus : General Superintendence Company.

Veldnommers: A1, A2 ens. verwys na koördinate in Fig. 17. Die syfers in hakkie bv. (1), (32) ens. verwys na veldnommers in dieselfde figuur.

Die Ultramafiese gneis besit 'n beperkte chemiese samestelling (Tabel 10) en word van die ware peridotitiese komatïïete onderskei op grond van 'n hoër Al_2O_3 -inhoud en 'n laer FeO-inhoud. Dit is egter ook uit figuur 20 duidelik dat die Ultramafiese gneis eerder met peridotitiese komatïïete as met bekende peridotiete vergelyk kan word. Dit lyk verder ook asof die Ultramafiese gneis beter ooreenstem met die meer ultramafiese tipe komatïïet van die Komati-Formasie, as wat dit ooreenstem met die minder ultramafiese tipe van die Sandspruit-Formasie. Dit word in tabel 10 ook deur die hoë normatiewe olivien-inhoud van hierdie gesteentes geïllustreer. Dit is verder uit tabel 10 ook duidelik dat die Ultramafiese gneis opvallend baie chroom en nikkel bevat, wat volgens Arndt, e.a. (1977), ook kenmerkend is van ultramafiese komatïïete.

Die oorspronklike karakter van Bandelierkop-Formasie is in die voorafgaande afdeling uit 'n baie algemene oogpunt bespreek en geen poging is aangewend om die geochemiese karakter van die hoof-gesteentetipes in enige detail te ondersoek nie. Op grond van die beperkte inligting wat hier bespreek is lyk dit egter asof die Bandelierkop-Formasie wel ekwivalente het in die ideale Barberton-gordelmodel. 'n Meer detail bespreking van 'n moontlike korrelasie van die verskillende gesteentetipes van die Bandelierkop-Formasie met die ideale Barbertonmodel (of met die Sutherlandgordel, Prinsloo, 1977) is egter 'n studie op sigself, en dit is nie die doel van die huidige ondersoek nie.

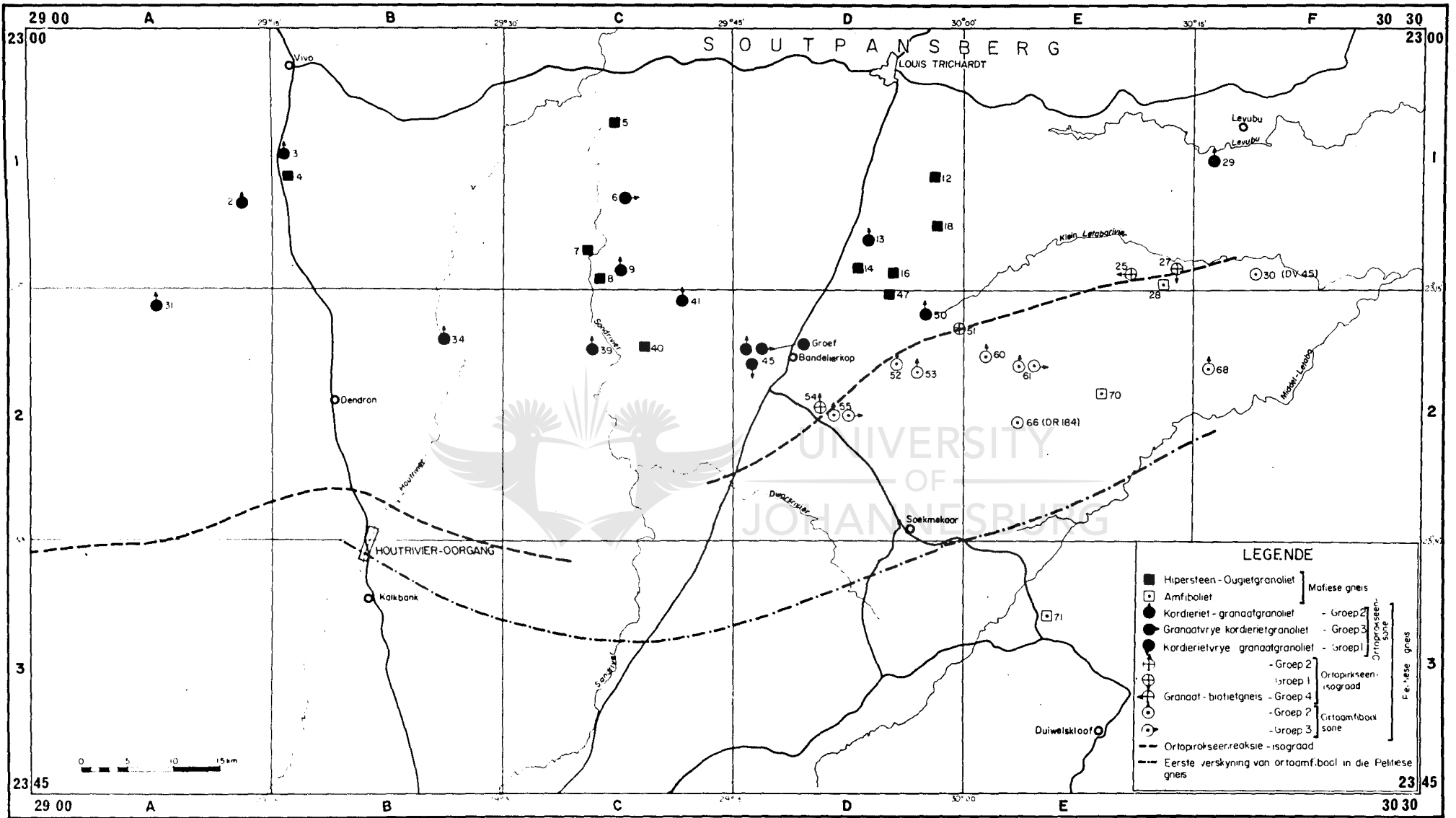
AFDELING VI

SISTEMATIESE CHEMIESE

MINERALOGIE



UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG



Figuur 21 : Lokaliteitskaart wat slegs die verspreiding aandui van monsters van die Pelitiese en Mafiese gneis waarvoor mikrosonde analyses beskikbaar is. Nommers verwys na veldnommers in tabelle 7 en 9. Die verskillende groepe van die Pelitiese gneis word in tabel 8 onderskei.

In hierdie afdeling word die chemiese samestellings van die hoofminerale van die Pelitiese en Mafiese gneisse wat met behulp van die mikrosone bepaal is, uit 'n kwantitatiewe oogpunt bespreek. Afleidings en gevolgtrekkings word gevolglik so ver as moontlik beperk tot die mineralogiese aspekte, terwyl die gevolgtrekkings met betrekking tot die petrologie in latere afdelings behandel word. Die verspreiding van monsters waarvoor mikrosone analises beskikbaar is word in figuur 21 geïllustreer.

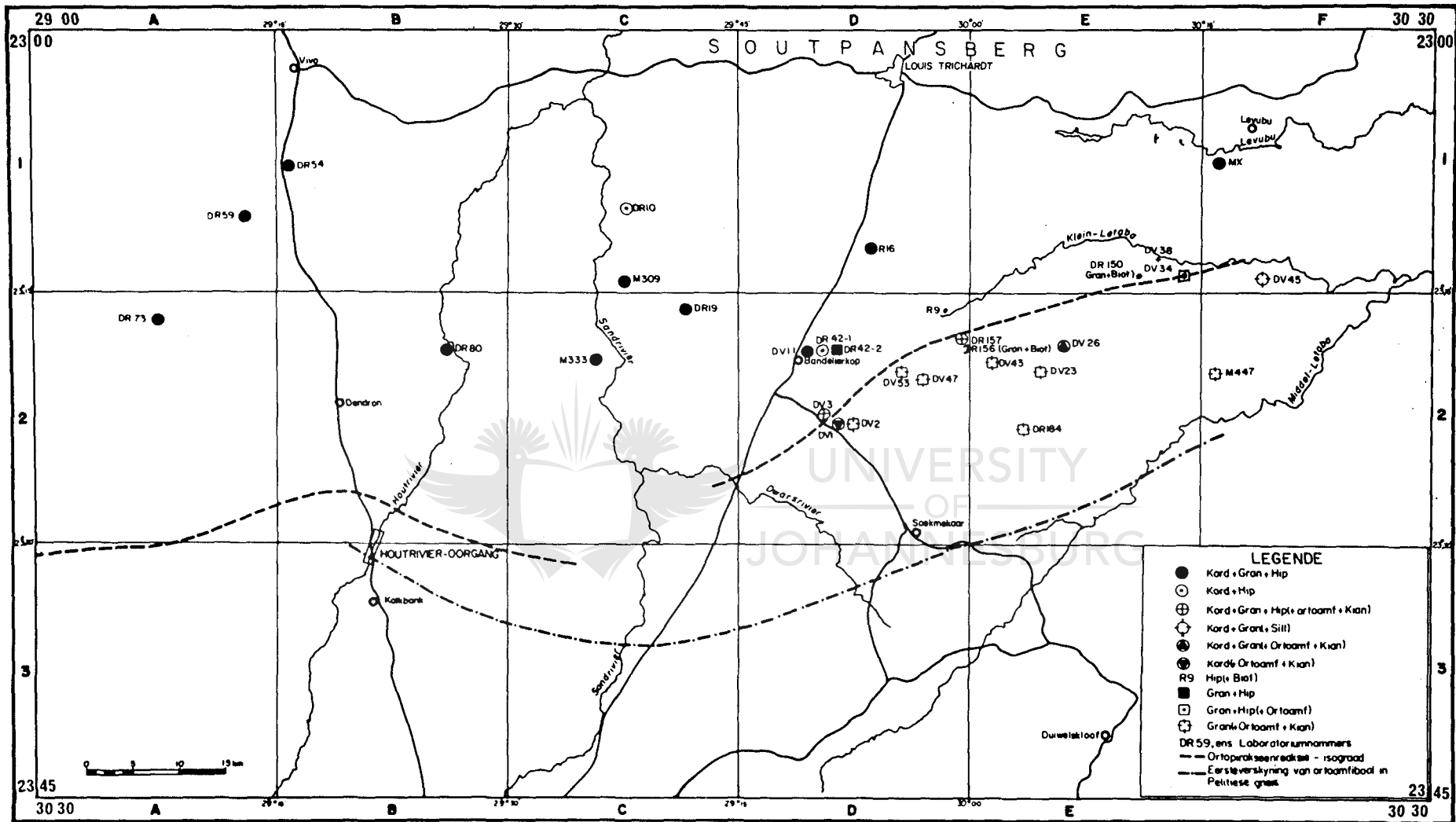
MgO/FeO- en $Mg/Mg+Fe^{+2}$ -verhoudings in alle tabelle met volledige mikrosone analises word as molekulêre en atoomverhoudings respektiewelik gegee, terwyl $X_{Mg} = 100 Mg/Mg+Fe^{+2}$. Indien ander verhoudings (bv. massapersent) in tabelle of in die teks gebruik word, word dit duidelik so aangedui.



1.1 KORDIËRIET

Kordiëriet is 'n belangrike metamorfe mineraal in die Pelitiese gneis en besit 'n wye verspreiding in die Ortopirokseensone (Fig. 22). Die mineraal is stabiel in assosiasie met granaat, hipersteen en biotiet in die kordiëriet-granaatgranoliete, maar is ook 'n algemene bestanddeel in die granaatvrye kordiërietgranoliete. Kordiëriet is egter nie stabiel in die teenwoordigheid van ortoamfibool nie en kom slegs as enkele relikte in die ortoamfiboolgneis van die Ortoamfiboolsone voor. Die enigste stabiele assosiasie van kordiëriet in hierdie sone is dié met granaat en sillimaniet in monster DV 45 (Tabel 4).

Sewentien verteenwoordigende monsters van kordiërietryke gesteentes is vir mikrosone-analises voorberei en 23 ana-



Figuur 22 : Lokaliteitskaart wat die verspreiding van mikrosonde analyses vir kordieriet, granaat en hipersteen aandui (Tabelle 11, 13 en 18). Die geassoleerde ferrumagnesiese mineraal word in hakies gegee. DR 150 en UR 156 bevat slegs granaat en biotiet.

lisis vir kordiëriet word in tabelle 11a en b met MgO/FeO (mol)- en $Mg/Mg+Fe^{+2}$ (atoom)-verhoudings gegee. Die mineralogiese samestelling van die gesteentes kan uit tabelle 2 en 4 verkry word. Twaalf van hierdie monsters is uit die Ortopirokseensone, twee is van die Ortopirokseenisograad en drie is uit die Ortoamfiboolsone. Die analyses is verteenwoordigend van al die gesteentetipes waarin kordiëriet teenwoordig is.

1.1.1 Chemiese Formule

Die som van die individuele oksiedes van elke analise in tabelle 11a en b, is deurgaans laer as 100 persent. Die gemiddelde waarde vir 23 analises is 97,22 persent. Hierdie lae totale is in ooreenstemming met mikrosonde analises uit die literatuur (Leake, 1960), en kan ten minste gedeeltelik toegeskryf word aan die teenwoordigheid van water in die kordiërietstruktuur. Volgens Lepezin en Melenevski (1977) kan kordiëriet teoreties tot 3 massa persent H_2O bevat alhoewel die waterinhoud van natuurlike kordiëriet selde 2 massa persent oorskrei. Watervrye kordiëriet is egter reeds by verskeie geleenthede gesintetiseer (Schreyer en Schairer, 1961), en aangesien die mineraal dus teoreties watervry kan wees bestaan die moontlikheid dat die lae totale van die analises in hierdie studie aan sekondêre veranderings van kordiëriet toegeskryf kan word. Hierdie moontlikheid word egter grootliks uitgeskakel deur die vars voorkoms van kordiëriet in die monsters onder bespreking. Vir die doeleindes van hierdie ondersoek word daar dus aanvaar dat kordiëriet sekere hoeveelhede water bevat en dat hierdie water as molekulêre H_2O in kanale in die kordiërietstruktuur teenwoordig is (Schreyer en Yoder, 1964). Die moontlike teenwoordigheid van H_2O in kordiëriet is belangrik omdat Newton (1972) byvoorbeeld eksperimenteel aangetoon het dat die boonste stabiliteitsgrens van kordiëriet onder waterryke toestande 2-3 Kb hoër is as onder watervrye toestande.

Tabel 11a. Mikrosonde-analiese van kordieriet in die kordieriet-granaatgranoliete van die Orlopiroksenzone

Monster- nommer	DR. 19 kern	DR. 19 rand	DR. 54 kern	DR. 54 rand	DR. 59 kern	DR. 59 rand	DR. 73	DR. 80 kern	DR. 80 rand	MX	M. 309 kern	M. 309 rand	M. 333 kern	M. 333 rand	DV. 11	R. 16
Kolom	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	49,14	49,48	48,95	49,20	48,71	48,29	50,37	47,79	48,13	51,10	49,75	50,20	49,33	49,85	47,81	51,00
Al ₂ O ₃	33,28	33,31	33,58	32,95	33,52	33,66	33,43	32,73	32,61	33,19	33,44	33,64	33,27	33,70	33,24	33,40
MgO	11,18	11,44	11,38	11,80	11,73	11,78	11,07	10,63	11,12	10,72	11,56	12,08	11,50	11,78	11,10	11,55
FeO ^x	3,70	3,17	3,25	3,02	3,29	3,12	4,28	4,56	3,94	4,21	3,39	2,72	3,43	2,79	3,31	2,85
CaO	0,01	0,02	0,03	0,02	-	-	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MnO	0,02	n.b.	n.b.	n.b.	0,01	0,03	n.b.	0,05	0,03	0,03	0,04	0,02	-	-	0,03	0,02
Na ₂ O	0,04	0,06	0,09	0,05	0,05	0,09	0,05	0,07	0,08	0,11	0,07	0,07	0,06	0,06	0,03	0,10
Totaal	97,37	97,48	97,28	97,03	97,32	97,06	99,20	95,83	95,91	99,25	98,25	98,72	97,59	98,18	95,51	98,92

Formule bereken op 'n basis van 18 suurstofatome

Si	4,999	5,014	4,976	5,008	4,954	4,928	5,038	4,966	4,982	5,095	5,008	5,013	5,00	5,006	4,954	5,078
Al ^{IV}	1,001	0,986	1,024	0,992	1,046	1,072	0,962	1,034	1,018	0,905	0,992	0,987	1,00	0,994	1,046	0,922
Totaal	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Al ^{IV}	2,99	2,993	3,00	2,962	2,973	2,978	2,978	2,976	2,961	2,997	2,977	2,973	2,976	2,996	3,015	2,999
Mg	1,695	1,728	1,724	1,740	1,778	1,792	1,650	1,646	1,715	1,593	1,734	1,798	1,737	1,763	1,714	1,714
Fe	0,315	0,269	0,276	0,257	0,280	0,266	0,358	0,396	0,341	0,351	0,285	0,227	0,291	0,234	0,287	0,237
Ca	0,001	0,002	0,003	0,002	-	-	0,002	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn	0,002	-	-	-	0,001	0,003	-	0,004	0,003	0,003	0,003	0,002	-	-	0,003	0,002
Na	0,008	0,012	0,018	0,010	0,010	0,018	0,010	0,014	0,016	0,021	0,014	0,014	0,012	0,012	0,005	0,019
Totaal	2,021	2,011	2,021	2,059	2,069	0,079	2,020	2,060	2,075	1,968	2,036	2,041	2,040	2,009	2,009	1,972
MgO/FeO	5,385	6,431	6,240	6,963	6,353	6,728	4,601	4,154	5,029	4,538	6,077	7,914	5,975	7,524	5,972	7,222
Mg / Mg+Fe+Ca	0,843	0,865	0,862	0,874	0,840	0,871	0,822	0,806	0,834	0,819	0,859	0,888	0,857	0,883	0,857	0,878

FeO^x Totale water as FeO

Analitikus : Anglo American Navorsingslaboratorium

Lokalisering vir monsters in Tabel 11a word in Fig. 22 geïllustreer.

Die chemiese formule van kordieriet (Tabelle 11a en b) stem goed ooreen met die ideale formule, (Mg, Fe)₂Al₄Si₅O₁₈. Die som van die katione, bereken op 'n basis van 18 suurstowwe, is baie naby aan die teoretiese waarde van 11 en steun die voorstel dat die tekort in die totale van die analises toegeskryf kan word aan water. Kordieriet bevat baie min CaO en MnO en slegs Na₂O is in noemenswaardige

TABEL 11b Mikrosonde-analises van Kordieriet in die granaatvrye kordieriet-granoliete van die Ortopirokseensone en in gesteentes van die Ortopirokseensisgraad en Ortoamfiboolzone (3-~~Tabel 4~~)

Monster- nommer	DR. 10 ¹	DR. 42-1 ¹	DR. 157 ²	DV. 3 ²	DV. 45 ³	DV. 1 ³	DV. 26 ³
Kolom	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	49,29	49,40	48,96	48,76	49,03	49,18	48,40
Al ₂ O ₃	33,49	33,26	33,21	32,81	33,28	33,22	31,90
MgO	11,45	11,92	11,51	10,73	10,50	11,92	10,85
FeO ^x	3,23	2,64	3,00	3,83	4,44	2,60	4,16
CaO	0,02	-	-	-	-	-	-
MnO	n.b.	0,03	0,03	0,02	0,04	0,01	-
Na ₂ O	0,05	-	0,11	0,10	0,13	0,13	0,75
Totaal	97,53	97,24	96,82	96,25	97,42	97,07	96,06

Formule bereken op 'n basis van 18 suurstofatome

Si	4,995	5,006	4,994	5,020	5,001	4,996	5,019
Al ^{iv}	1,005	0,994	1,006	0,980	0,999	1,004	0,981
Totaal	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Al ^{iv}	2,995	2,979	2,988	3,002	3,003	2,975	2,919
Mg	1,729	1,80	1,750	1,646	1,596	1,805	1,677
Fe	0,274	0,224	0,256	0,330	0,379	0,221	0,361
Ca	0,002	-	-	-	-	-	-
Mn	-	0,003	0,003	0,002	0,004	0,001	-
Na	0,010	0,006	0,022	0,020	0,026	0,026	0,151
Totaal	2,015	2,033	2,031	1,998	2,005	2,053	2,189
MgO/FeO	6,317	8,036	6,837	4,992	4,214	8,170	4,648
Mg/Mg+Fe ⁺²	0,863	0,889	0,872	0,833	0,808	0,891	0,823

FeO^x Totale yster as FeO

1 Ortopirokseensone. 2 Ortopirokseensisgraad (granaat-antofilliet-gedriet-kordieriet).

Analitykus: Anglo American Navorsingslaboratorium.

Lokalisering vir monsters in Tabel 11b word in Fig. 22 geïllustreer.

hoeveelhede teenwoordig. Die mineraal is opties positief met $2V_z = (70-86)^\circ$. Die variasie in die optiese assehoek en die positiewe karakter van kordieriet is in ooreenstemming met verskeie natuurlike voorkomste (Leake, 1960).

1.1.2 Die samestelling van kordieriet in verskillende mineraalassosiasies

Die beskikbare chemiese inligting is hoofsaaklik beperk tot die kordieriet-granaatgranoliet en slegs enkele analises is beskikbaar vir die granaatvrye kordierietgranoliet.

Kordiëriet besit 'n beperkte verspreiding langs die Ortopirokseenisograad (hoofsaaklik as gevolg van swak dagsome) en tesame met die feitlik totale afwesigheid van die mineraal in die Ortoamfiboolsone is dit nie moontlik om enige betroubare afleidings te maak in verband met moontlike variasies in die samestelling van hierdie mineraal in die verskillende metamorfe sones nie.

Met hierdie beperking in gedagte is dit tog interessant dat waardes vir XMg van kordiëriet geen opvallende verskille in die verskillende metamorfe sones vertoon nie (Tabel 12a). Die enigste sistematiese variasie in die samestelling van kordiëriet word deur die natriuminhoud weerspieël. Natrium neem blykbaar sistematies toe met 'n afname in die graad van metamorfose (Tabel 12a). Die rede vir hierdie variasie is nie duidelik nie maar kan moontlik verband hou met die deurlopende reaksieverwantskap tussen kordiëriet en gedriet (Afd. IX-3.1).

Tabel 12a Samestelling van kordiëriet in verskillende mineraalassosiasies en in die verskillende metamorfe sones. Waardes is gemiddeldes vir al die analyses in tabelle 11a en b en word gegee as die aantal atome bereken op 'n basis van 18 suurstofatome. Die variasie in XMg word in hakies gegee. $\text{XMg} = 100 \cdot \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}^{+2})$.

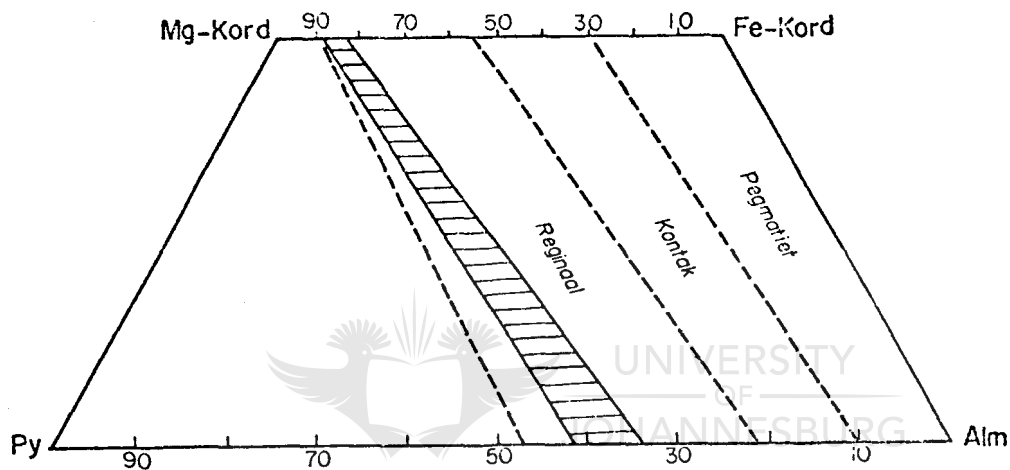
Metamorfe sone	XMg	Na ⁺
e) Ortopirokseenzone		
i. kordiëriet-granaatgranoliet	84,4 (80,6-87,8)	0,013 (0,006-0,021)
ii. granaatvrye kordiëriet-granoliet	87,7 (85,3-89,0)	0,009 (0,006-0,010)
b) Ortopirokseenreaksie-isograad		
i. kordiëriet-granaatgranoliet	85,3 (83,3-87,2)	0,021 (0,02-0,022)
c) Ortoamfiboolsone*		
i. granaat-ortoamfiboolgneis (DV 2E)	82,3	0,026
ii. ortoamfiboolgneis (DV 1)	89,1	0,026
iii. granaat-kordiëriet-sillimaniet-gneis (DV 45)	80,8	0,151

* Kyk tabel 4 vir mineralogiese samestelling

Die geassosieerde ferromagnesiese minerale het egter 'n belangrike invloed op die samestelling van kordiëriet. Dit word in tabel 12a geïllustreer deur die waarneming dat kordiëriet met die hoogste XMg in 'n spesifieke metamorfe sone, beperk is tot granaatvrye gesteentes. Dit geld vir beide die Ortopirokseen- en Ortoamfiboolsones. Monster

DV 45 is 'n uitsondering, maar hierdie gesteente bevat ook geen ortoamfibool nie. Dit is in hierdie opsig interessant dat die chemiese samestellings van die kordiëriet-granaatgranoliete ook minder Mg-ryk is as dié van die granaatvrye kordiërietgranoliete (Fig. 18c).

Die samestelling van samebestaande kordiëriet-granaat in die Pelitiese gneis word in figuur 23 geïllustreer. Die hoë MgO-inhoud van beide minerale is in ooreenstemming met die hoë graad van metamorfose in die gebied onder bespreking.



Figuur:23

Variasie in die samestelling van samebestaande kordieriet-Granaat uit verskillende metamorfe omgewings. (Chinner, 1959). Die samestellingsveld vir samebestaande kordieriet-granaat in die Ortopirokseensone is geskckeer

1.1.3 Sonering van kordiëriet

Die opvallende koronateksture in die kordiëriet-granaatgranoliete skep 'n ideale geleentheid vir die detail chemiese ondersoek van die ewewigsverwantskappe van die geassosieerde fases (kordiëriet, granaat en hipersteen). Vir hierdie doel is dit egter noodsaaklik om ook die moontlike variasie in die samestelling van die geassosieerde minerale te ondersoek. Die analyses in 'n spesifieke monster is egter nie slegs beperk tot dié van kordiëriet in die koronateksture

nie, maar betrek ook kordiëriet wat nie met hierdie teksture geassosieer is nie. In alle gevalle is verskeie posisies in een of meer kordiërietkristalle geanaliseer. Die vars voorkoms van kordiëriet het dit ook moontlik gemaak om randanalises direk in kontak met granaat te verkry.

Die volledige analises van kordiëriet word in tabelle 11a en b gegee. Die waardes in hierdie tabelle is gemiddeldes van twee tot vyf puntanalises van een of meer korrels. Gedeeltelike analises word in tabel 12b en c opgesom. In die geval van tabel 12c word slegs kernanalises van kordiëriet gegee vir gevalle waar hierdie mineraal in kontak met granaat is.

Tabel 12b Sonering van kordiëriet in koronatekture van die kordiëriet-granaatgranoliet.
 $XMg = 100.Mg/Mg+Fe$

Monster No.	Posisie van analise	MgO (massa %)	FeO (massa %)	XMg
DR 19	kern	11,18	3,70	84,30
	rand in kontak met granaat	11,44	3,17	87,72
DR 54	kern	11,38	3,25	86,20
	rand in kontak met granaat	11,80	3,02	87,48
DR 59	kern	11,73	3,29	84,00
	rand in kontak met granaat	11,78	3,12	87,19
DR 80	kern	10,63	4,56	80,69
	rand in kontak met granaat	11,12	3,94	83,40
M 309	kern	11,56	3,39	85,90
	rand in kontak met granaat	12,08	2,72	83,80
M 333	kern	11,50	3,43	85,70
	rand in kontak met granaat	11,78	2,79	83,30

Uit tabel 12b is dit duidelik dat kordiëriet in die koronatekture (d.w.s. in kontak met granaat) wel tekens van sonering vertoon. Die sonering in 'n spesifieke korrel is egter beperk tot 'n baie smal randsones in direkte kontak met granaat. Die MgO-inhoud van hierdie smal randsones is effens hoër, en die FeO-inhoud effens laer, as in die geval van die kern van die mineraal. Hierdie verskil in samestelling tussen die kern en rand van kordiërietkristalle in kontak met granaat is waargeneem in al die monsters waarin die koronatekture opvallend is, en is ook redelik konstant van een monster na 'n ander. Die enigste uitsondering is monster MX waarin kordiëriet geen opvallende tekens van sonering in die koronatekstuur vertoon nie.

Tabel 12c Gebrek aan sonering van die grootste volume van kordieriet in individuele monsters van die kordieriet-granaatgranoliete (DR. 19 - M. 333), die granaatvrye kordierietgranoliete (DR. 10 en DR. 42-1) en die granaat-kordieriet-sillimanietgneis (DV. 45). Waar beskikbaar word meer as een analise van verskillende posisies in dieselfde korrel gegee, sowel as analises van verskillende korrels in dieselfde monster. Die randanalises van kordieriet in direkte kontak met granaat in die koronateksture van die kordieriet-granaatgranoliete is weggelaat. $X_{Mg} = 100 \text{ Mg/Mg+Fe}^{+2}$.

Monster	Posisie van analise	MgO (massa %)	FeO (massa %)	X_{Mg}
DR. 19	1. Kern in kontak met granaat in koronatekstuur	11,48	3,80	84,36
	Tweede posisie (selfde korrel)	11,20	3,70	84,36
	ii. Kern in kontak met granaat in tweede koronatekstuur	10,89	3,58	84,44
	iii. Rand in kontak met biotiet in matriks	10,63	3,76	83,44
DR. 54	1. Kern in kontak met granaat in koronatekstuur	11,23	3,25	86,06
	Rand in kontak met biotiet (selfde korrel)	11,47	3,20	86,46
	Rand in kontak met hipersteen (selfde korrel)	11,44	3,29	86,10
DR. 73	1. Rand in kontak met hipersteen in koronatekstuur	11,14	4,29	82,23
	Kern (selfde korrel)	11,18	4,36	82,05
	ii. Rand in kontak met biotiet in matriks	10,93	4,23	82,16
	Kern (selfde korrel)	11,02	4,24	82,24
DR. 59	1. Kern in kontak met granaat in koronatekstuur	11,73	3,29	86,40
	Tweede posisie (selfde korrel)	11,96	3,34	86,45
M.X.	1. Kern in kontak met granaat in koronatekstuur	10,69	4,45	81,06
	Tweede posisie (selfde korrel)	10,67	4,20	81,91
	ii. Kontak met plagioklaas in matriks	10,77	4,21	82,01
M. 309	1. Kern in kontak met granaat in koronatekstuur	11,52	3,28	86,22
	ii. Rand in kontak met hipersteen in matriks	11,60	3,50	85,52
M. 333	1. Kern in kontak met granaat in koronatekstuur	11,58	3,41	85,82
	ii. Tweede posisie (selfde korrel)	11,42	3,45	85,30
DR. 10	1. Rand in kontak met hipersteen	11,56	3,13	86,81
	Kern (selfde korrel)	11,39	3,30	86,02
	ii. Rand in kontak met spinel	11,62	3,37	86,00
	Kern (selfde korrel)	11,24	3,22	86,15
DR. 42-1	1. Kontak met hipersteen	12,03	2,64	89,04
	ii. Kontak met plagioklaas	11,80	2,64	88,85
DV. 45	1. Rand in kontak met granaat	10,38	4,46	80,57
	Kern (selfde korrel)	10,59	4,46	80,88
	Kern (selfde korrel, tweede posisie)	10,53	4,41	80,97

Die grootste volume van individuele kordierietkristalle vertoon egter verder geen opvallende tekens van sonering nie (Tabel 12c). Met verwysing na tabelle 12b en c is dit dus duidelik dat sonering beperk is tot 'n smal randsone van kordieriet in direkte kontak met granaat in die koronateksture, en dat kordierietkristalle in kontak met hipersteen of biotiet geen tekens van sonering vertoon nie (Monsters DR 54 en DR 73, Tabel 12c). Die samestelling van kordieriet in die koronateksture verskil verder in dieselfde monster ook nie opvallend van kordieriet wat nie met granaat geassosieer is nie (Monsters M 309, DR 73, MX, Tabel 12c). Die

enigste uitsondering is in die geval van Monster DR 19 waar kordiëriet in kontak met biotiet effens meer ysterryk is as kordiëriet in die koronateksture.

Die beskikbare inligting vir kordiëriet in die granaatvrye kordiërietgranoliete is beperk tot slegs twee monsters. Uit tabel 12c is dit egter duidelik dat kordiëriet geen opvallende tekens van sonering vertoon nie, en dat die samestelling van verskillende korrels in dieselfde slypplaatjie baie konstant is. In die geval van die twee analyses in monster DR 42-1 kan die verskil in die waarde vir magnesium moontlik aan 'n instrumentele fout toegeskryf word omdat die twee waardes vir yster presies dieselfde is. Kordiëriet is 'n stabiele mineraal in slegs een monster van die Ortoamfiboolsone (DV 45) en vertoon geen opvallende tekens van sonering in kontak met granaat nie (Tabel 12c).

Uit die voorafgaande bespreking is dit duidelik dat die grootste volume van 'n kordiëriekristal vir alle praktiese doeleindes homogeen is en dat die samestelling van kordiëriet in individuele monsters baie min van een assosiasie na 'n ander verskil. Tekens van sonering is beperk tot 'n smal sone direk in kontak met granaat en duidelik van minder belang as die konstante samestelling van die res van die kristal in aanmerking geneem word.

Soortgelyke sonering van kordiëriet in kontak met granaat is reeds by verskeie geleenthede in die literatuur beskryf (bv. Hess, 1971; Ashworth en Chinner, 1978). Hess (1971, p. 185) beklemtoon ook die feit dat hierdie sonering beperk is tot direkte kontak met granaat en dat die res van kordiëriet 'n homogene samestelling het. Die moontlike petroge-netiese betekenis van die sonering van kordiëriet word later bespreek (Afd. VI-1.2.3.1).

1.2 GRANAAT

Granaat besit 'n wye verspreiding in die studiegebied en is 'n opvallende mineraal in dagsome van die Pelitiese gneis in beide die Ortopirokseen- en Ortoamfiboolsones. Die mineraal is egter nie net beperk tot die Pelitiese gneis nie, maar is ook algemeen geassosieer met hipersteen of amfibool (gruneriet) in die magnetietkwartsiet.

Drie en veertig mikrosonde-analises van granaat met waardes vir MgO/FeO (mol) en Mg/Mg+Fe⁺² (atoom) vir 27 verteenwoordigende monsters van die Pelitiese gneis word in tabelle 13a-c gegee. Individuele lokaliteite word in figuur 22 aangedui. Twaalf van hierdie monsters is van die Ortopirokseenisograad en 9 van die Ortoamfiboolsone. Die analises in tabelle 13a-c is die gemiddelde waarde van twee tot vyf puntanalises vir een of meer individuele korrels in elke monster.

1.2.1 Chemiese formule

Die formule van granaat, soos bereken uit die mikrosonde-analises stem goed ooreen met die ideale samestelling van hierdie mineraal. Die som van die katione, gebaseer op 24 suurstofatome, is baie na aan die teoretiese waarde van 16. Die drie-valente oktaëdriese posisie word deur Al³⁺ gevul en Fe³⁺ word nie benodig nie. Die berekening van die samestelling van granaat in terme van die endmolekules in tabelle 13a-c is dus gebaseer op die aanname dat yster hoofsaaklik in die twee-valente toestand teenwoordig is.

Die granaat bestaan hoofsaaklik uit die almandiet- en piroopmolekules. Die piroopinhoud wissel van 33,3 tot 41,0 mol persent in die Ortopirokseenisograad, en tussen 22,2 en 32,67 mol persent in die Ortoamfiboolsone (Tabel 14). Die grossu-

lariet- en spessartietinhoud is baie laag en beslaan gesamentlik nie meer as gemiddeld 5,5 mol persent in die Ortopirok-seensone en 6 mol persent in die Ortoamfiboolsone nie. Cr^{3+} is in spoor-hoeveelhede teenwoordig en Ti^{4+} is geheel en al afwesig.

Tabel 13a. Mikroanalise van grensiet in die kordieriet-grenstgrosulieta van die Ortopirokseensone

Monster-nommer	DR 19	DR 19 ¹	DR 54	DR 54 ¹ Inal.	DR 59	DR 73	DR 73 ¹ Inal.	DR 80 kern	DR 80 rand	MX kern	MX rand	M 309	M 333	DV 11 ²	DV 11 ²	R 16
Kolom	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	39,09	39,40	39,41	39,05	39,40	39,04	38,94	39,25	39,32	39,60	40,14	39,11	38,99	40,32	40,69	40,73
Al ₂ O ₃	22,39	22,46	21,07	21,85	22,75	22,52	21,57	22,35	22,08	22,59	22,56	22,20	22,12	22,63	22,51	22,39
MgO	10,06	8,74	10,39	9,61	10,69	8,75	7,80	9,06	8,29	10,24	8,90	10,00	9,89	9,09	8,90	10,60
FeO ^x	27,19	28,52	25,32	26,45	25,61	28,33	29,21	27,68	28,48	26,75	28,08	25,89	26,86	26,27	26,89	24,63
CaO	0,98	1,03	1,03	1,08	1,42	1,21	1,32	2,09	1,23	1,32	1,21	1,49	0,95	1,82	1,64	1,33
MnO	0,34	n.b.	0,73	n.b.	0,49	1,00	0,59	0,33	1,05	0,50	0,71	0,90	0,56	0,71	0,57	0,70
Na ₂ O	-	-	-	-	-	0,02	-	-	0,01	0,01	-	-	-	-	-	-
Cr ₂ O ₃	0,13	0,14	0,27	0,21	0,18	0,17	0,79	0,14	0,14	0,16	0,18	0,22	0,27	0,17	0,07	0,30
TOTAAL	100,98	99,76	99,02	98,26	100,54	101,03	100,22	100,90	100,59	101,16	101,78	99,81	99,64	101,02	101,26	100,68
Formule bereken op 'n basis van 24 suurstofatome																
Si	6,036	6,036	6,055	6,063	5,965	5,968	6,031	5,987	6,040	5,984	6,058	5,992	5,994	6,089	6,132	6,116
Al ^{IV}	-	-	-	-	0,035	0,032	-	0,013	-	0,016	-	0,008	0,006	-	-	-
TOTAAL	6,036	6,036	6,055	6,063	6,000	6,000	6,031	6,000	6,040	6,000	6,058	6,000	6,000	6,089	6,132	6,116
Al ^{VI}	3,994	4,056	3,962	3,999	4,025	4,027	3,939	4,006	3,999	3,984	4,014	4,002	4,003	4,025	3,999	3,964
Mg	2,269	1,995	2,379	2,224	2,412	1,993	1,800	2,060	1,898	2,306	2,000	2,283	2,266	2,046	1,999	2,372
Fe	3,641	3,654	3,254	3,434	3,243	3,662	3,784	3,531	3,659	3,381	3,544	3,317	3,454	3,318	3,389	3,093
Ca	0,159	0,169	0,170	0,180	0,230	0,198	0,219	0,342	0,203	0,214	0,196	0,245	0,157	0,295	0,265	0,216
Mn	0,044	-	0,095	-	0,063	0,130	0,077	0,043	0,173	0,064	0,090	0,117	0,073	0,091	0,073	0,089
Na	-	-	-	-	-	0,006	-	-	0,003	-	-	-	-	-	-	-
Cr	0,016	0,017	0,033	0,026	0,022	0,021	0,097	0,016	0,017	0,019	0,022	0,027	0,033	0,020	0,008	0,036
TOTAAL	5,429	5,835	5,931	5,864	5,97	6,01	5,973	5,992	5,917	5,984	5,852	5,989	5,983	5,770	5,734	5,804
MgO/FeO	0,660	0,546	0,731	0,648	0,744	0,550	0,476	0,583	0,519	0,682	0,565	0,688	0,656	0,617	0,590	0,767
Mg/(Mg+Fe) ²	0,397	0,353	0,422	0,393	0,426	0,355	0,322	0,368	0,342	0,406	0,361	0,408	0,396	0,381	0,371	0,434
Piroop	36,40	34,20	40,30	38,10	40,55	33,30	30,60	34,47	32,19	38,66	34,31	38,30	38,10	35,60	34,90	41,10
Almendiet	58,20	62,80	55,20	58,80	54,52	61,20	64,40	59,08	62,05	56,60	60,79	55,60	58,10	57,70	59,20	53,60
Groesulariet	2,70	2,90	2,90	3,10	3,90	3,30	3,70	5,72	3,44	3,59	3,36	4,10	2,60	5,10	4,60	3,70
Spessartiet	0,70	n.b.	1,60	n.b.	1,06	2,70	1,30	0,72	2,32	1,10	1,54	2,0	1,20	1,60	1,30	1,50

FeO^x Totale yster as FeO

n.b. Nie bepaal nie.

¹Klein inskluusie in kordieriet. ²Analiese van twee verskillende korrels.

Lokalisering vir monstere in Tabel 13a word in Fig. 22 geïllustreer.

Tabel 13b. Mikrosonde-analises van granaat in die Kordierietvrye granaatgranoliete van die Ortopirokseensone (Tabel 2) en in gesteentes van die Ortopirokseenisograad.

Monster- nommer	DR. 10 ¹ insl.	DR. 42-2	DV. 38 ² kern	DV. 38 rand	DV. 34 ²	DR. 157 ³	DV. 3 ³	DR. 150 ⁴ kern	DR. 150 rand	DR. 156 ⁴ kern	DR. 156 rand
Kolom	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	39,41	39,02	39,25	39,33	39,35	40,57	40,06	39,04	38,74	39,26	39,01
Al ₂ O ₃	21,86	21,98	22,35	22,39	22,11	21,93	22,28	22,57	22,51	22,63	22,48
MgO	9,05	8,89	9,06	9,11	8,26	7,93	7,31	8,83	7,97	8,52	8,15
FeO ^x	26,89	26,35	27,68	28,65	27,39	27,45	29,77	27,58	29,09	23,14	28,94
CaO	1,40	1,91	2,09	1,15	2,34	1,14	1,27	1,83	1,52	1,73	1,44
MnO	n.b.	0,63	0,33	0,29	0,37	0,60	0,56	0,31	0,41	0,45	0,41
Na ₂ O	-	-	-	-	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
Cr ₂ O ₃	0,51	-	0,14	0,16	0,16	0,05	0,14	0,09	0,10	0,03	0,08
Totaal	99,12	98,78	100,90	101,09	99,96	99,66	101,39	100,37	100,35	100,78	100,51

Formule bereken op 'n basis van 24 suurstofatome

Si	6,08	6,051	5,987	5,995	6,051	6,222	6,112	5,985	5,976	6,00	5,997
Al ^{iv}	-	-	0,013	0,005	-	-	-	0,015	0,024	-	0,003
Totaal	6,08	6,051	6,00	6,00	6,051	6,222	6,112	6,00	6,00	6,00	6,00
Al ^{vi}	3,976	4,018	4,006	4,018	4,011	3,965	4,007	4,064	4,069	4,077	4,072
Mg	2,081	2,054	2,060	2,069	1,894	1,812	1,662	2,017	1,832	1,940	1,867
Fe	3,470	3,417	3,531	3,652	3,524	3,521	3,798	3,535	3,753	3,596	3,721
Ca	0,231	0,317	0,342	0,188	0,386	0,187	0,208	0,301	0,251	0,283	0,237
Mn	-	0,083	0,043	0,037	0,048	0,078	0,072	0,040	0,055	0,058	0,053
Na	-	-	-	-	-	0,003	-	0,003	-	0,003	-
Cr	0,062	-	0,016	0,019	0,020	0,006	0,017	0,011	0,012	0,004	0,010
Totaal	5,844	5,871	5,992	5,965	5,872	5,607	5,757	5,907	5,901	5,884	5,868

MgO/FeO	0,600	0,601	0,583	0,567	0,537	0,515	0,438	0,571	0,488	0,540	0,502
Mg /Mg + Fe ⁺²	0,375	0,376	0,368	0,362	0,350	0,340	0,304	0,363	0,328	0,351	0,334

Piroop	36,0	35,0	34,47	34,80	32,40	32,40	29,00	34,20	31,10	33,00	31,80
Almandiet	60,0	58,0	59,09	61,42	60,20	62,90	66,20	60,00	63,70	61,20	63,30
Grossula- riet	4,0	5,4	5,72	3,16	6,60	3,30	3,60	5,10	4,30	4,80	4,00
Spessar- tiet	n.b.	1,4	0,72	0,622	0,80	1,40	1,30	0,70	0,90	1,00	0,90

FeO^x Totale yster as FeO

n.b. Nie bepaal nie

DR. 10 en DR. 42-2 = Ortopirokseensone. Res = Ortopirokseenisograad

1 Klein insluitel in kordieriet. 2 Antofilliet + hipersteen - kianiet.

3 Antofilliet + gedriet + hipersteen + kordieriet - kianiet. 4 Biotiet.

Analitikus: Anglo American Navorsingslaboratorium.

Lokaliteite vir monsters in Tabel 13b word in Fig. 22 gesê.

Tabel 13c. Mikrosonde-analises van granaat in gesteentes van die Ortoamfibolaone

Monster- nommer	DV. 45 Kern	DV. 45 Rand	DV. 53 Kern	DV. 53 Rand	DV. 2 Kern	DV. 2 Rand	DV. 43	M. 447 Kern	M. 447 Rand	DV. 47	DV. 23 Kern	DV. 23 Rand	DV. 26 Kern	DV. 26 Rand	DR. 184 Kern	DR. 184 Rand
Kolom	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	39,07	38,19	38,33	37,65	40,25	40,37	39,39	38,31	38,30	38,78	38,32	38,92	39,04	38,90	38,34	38,15
Al ₂ O ₃	22,41	22,31	21,98	21,54	22,62	22,78	22,19	21,68	21,78	22,39	22,12	22,50	22,35	22,28	22,40	22,06
MgO	9,40	7,29	6,96	5,70	7,03	7,86	5,56	6,95	6,54	7,80	6,50	7,24	8,94	7,61	7,00	5,91
FeO ^X	27,28	29,39	29,90	30,78	28,94	28,64	30,79	30,21	29,33	30,15	28,08	30,06	28,70	30,91	30,28	32,53
CaO	1,35	1,13	1,40	2,13	2,02	1,61	2,00	1,64	2,81	1,29	2,38	1,51	1,49	1,39	2,76	2,01
MnO	0,48	0,77	1,17	1,09	1,44	1,05	1,27	1,16	1,03	1,10	2,73	1,20	0,51	0,54	0,310	0,32
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	0,01	-	-	-	-	0,04	0,03	0,03	-	0,01
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr ₂ O ₃	0,08	0,05	0,08	0,05	0,24	0,28	0,27	0,13	0,16	0,16	0,22	0,03	0,15	0,18	0,11	2,01
Totaal	100,07	99,13	99,83	98,94	102,54	102,59	101,48	100,08	99,95	101,62	100,35	101,50	101,21	101,82	101,20	101,27

Formule bereken op n basis van 24 suurstofatome

Si	5,990	5,983	5,993	5,988	6,081	6,069	6,075	5,990	5,990	5,950	5,970	5,977	5,962	5,962	5,921	5,942
Al ^{iv}	0,010	0,017	0,007	0,012	-	-	-	0,010	0,010	0,050	0,030	0,023	0,038	0,038	0,079	0,058
Totaal	6,00	6,00	6,00	6,00	6,081	6,069	6,075	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Al ^{vi}	4,041	4,103	4,045	4,027	4,029	4,038	4,035	3,987	4,006	3,999	4,033	4,051	3,986	3,988	4,00	3,993
Mg	2,148	1,702	1,622	1,351	1,583	1,761	1,278	1,620	1,524	1,783	1,509	1,657	2,035	1,738	1,611	1,372
Fe	3,498	3,851	3,910	4,094	3,657	3,601	3,972	3,951	3,836	3,869	3,659	3,861	3,665	3,962	3,911	4,237
Ca	0,222	0,190	0,235	0,363	0,327	0,259	0,331	0,275	0,471	0,210	0,397	0,249	0,244	0,228	0,457	0,336
Mn	0,062	0,102	0,155	0,147	0,184	0,134	0,166	0,154	0,136	0,128	0,360	0,156	0,066	0,070	0,041	0,042
Na	-	-	-	-	-	-	0,003	-	-	-	-	0,012	0,009	0,009	-	0,003
Cr	0,010	0,006	0,010	0,006	0,029	0,033	0,033	0,016	0,019	0,016	0,027	0,004	0,018	0,022	0,013	0,035
Totaal	5,940	5,851	5,932	5,961	5,780	5,788	5,783	6,015	5,986	6,006	5,952	5,939	6,037	6,029	6,033	6,025

MgO/FeO	0,614	0,442	0,410	0,330	0,430	0,410	0,320	0,410	0,397	0,461	0,413	0,429	0,555	0,439	0,412	0,324
Mg/Mg,Fe ⁺²	0,380	0,307	0,293	0,240	0,300	0,320	0,240	0,291	0,284	0,315	0,292	0,300	0,357	0,305	0,292	0,245

Piroop	36,22	29,12	27,40	22,70	27,50	30,60	22,20	27,00	25,50	29,77	25,47	27,98	33,86	28,98	26,76	22,92
Almandiet	58,99	65,89	66,00	68,80	63,40	62,60	69,10	65,90	64,30	64,60	61,76	65,19	60,98	66,06	64,97	70,77
Grossulariet	3,744	3,25	4,00	6,10	5,70	4,50	5,80	4,60	7,90	3,50	6,70	4,20	4,06	3,80	7,59	5,61
Spessartiet	1,050	1,75	2,60	2,50	3,20	2,30	2,90	2,60	2,30	2,14	6,08	2,63	1,10	1,17	0,68	0,70

FeO^X Totale yster as FeO

Analitikus : Anglo American Navorsingslaboratorium.

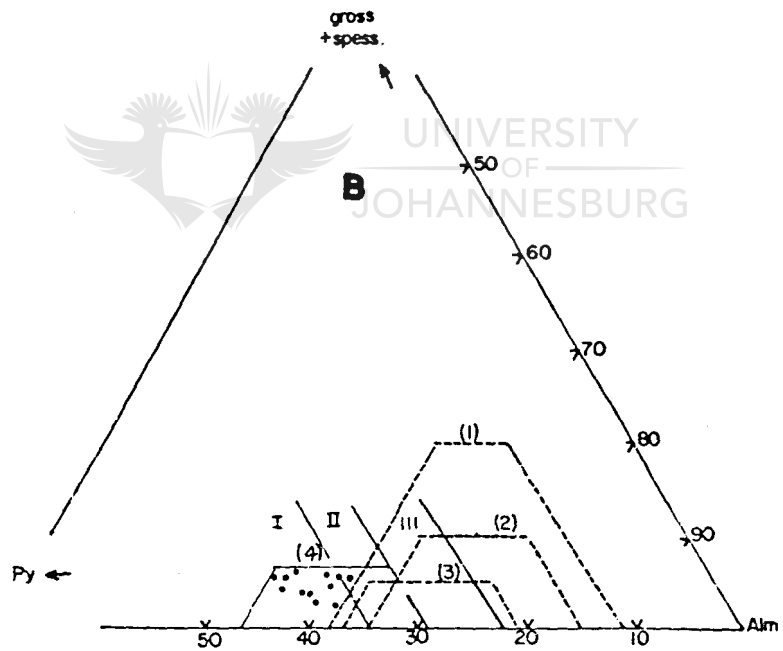
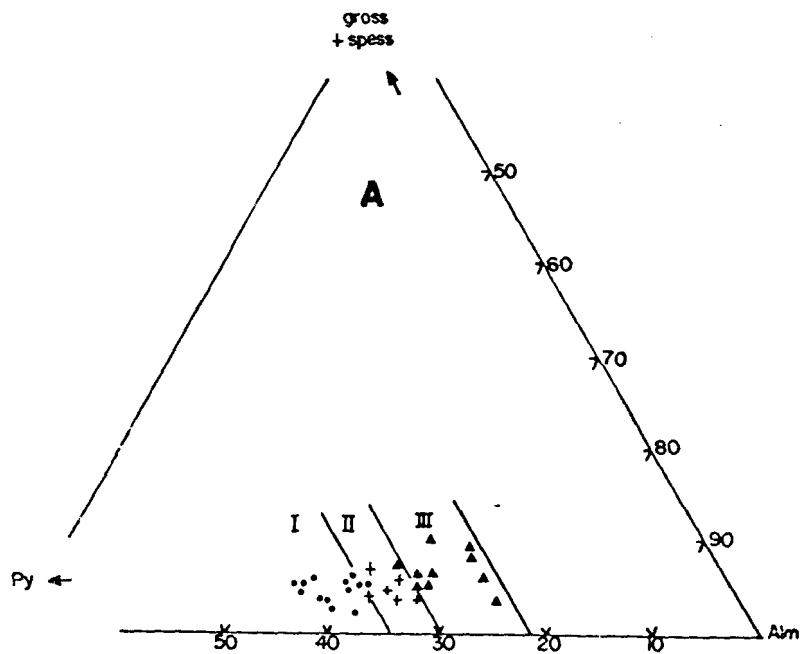
Lokaltelste vir monsters in Tabel 13c word in Fig. 22 geïllustreer.

Tabel 14 Gemiddelde samestelling van granaat in die Pelitiiese gneis van die verskillende metamorfe sones. Die variasie in samestelling binne elke groep word in hakies gegee.
 $X_{Mg} = 100 \cdot Mg / (Mg + Fe^{+2})$

Metamorfe sone	Alm	Py	Gross+Spess	X _{Mg}
A. Ortopirokseensone				
1. Kordieriet-granaatgranoliet (10 monsters) ^{a,b}	57,2 (53,6-61,2)	37,7 (33,3-41,0)	5,10 (3,4-6,44)	39,72 (35,5-43,4)
2. Kordierietvrye-granaat-granoliet (1 monster)	58,0	35,0	6,8	37,60
B. Ortopirokseensograad				
1. Kordieriet-granaatgranoliet (2 monsters)	64,6 (62,9-66,2)	30,7 (29-32,4)	4,8 (4,7-4,9)	32,20 (30,4-34,0)
2. Kordierietvrye-granaatgranoliet (2 monsters)	60,25 (60,2-60,3)	33,52 (32,4-34,6)	6,26 (5,11-7,40)	35,00 (35,1-36,51)
3. granaat-biotietgneis (2 monsters)	62,1 (61,9-62,3)	32,5 (32,4-32,7)	5,43 (5,35-5,5)	34,40 (34,25-34,6)
C. Ortoamfiboolsone				
1. Kordieriet-granaat-sillimanietgneis (1 monster - DV. 45) ^b	62,44	32,67	4,90	34,35
2. Granaat-ortoamfiboolgneis (1 monster DR. 184) ^b	67,87	24,84	7,29	26,83
3. Granaat-ortoamfibool-biotiet-kianietgneis (7 monsters)	65,20 (63,0-69,1)	27,20 (22,2-29,8)	7,62 (5,6-9,8)	29,42 (24,4-31,5)

^aAlle insluitsels in kordieriet is weggelaat. ^bIn geval van sonering is gemiddelde waardes geneem.

Die samestelling van granaat is in goeie ooreenstemming met dié van soortgelyke gesteentes in ander hoë-gradse metamorfe terreine (Wynne-Edwards en Hay, 1963; Dallmeyer, 1974b; Gable en Sims, 1969; Lal en Moorhouse, 1969; Reinhardt, 1968; Hess, 1971), maar is oor die algemeen verryk in die piroopkomponent en verarm in die grossulariet- en spessartietkomponente (Fig. 24). Hierdie verskille weer- spieël die hoë-gradse metamorfose in die gebied soos verder geïllustreer deur die teenwoordigheid van ortopirokseen en die afwesigheid van sillimaniet in die Ortopirokseensone. Opvallend, is dat die veld van samebestaande kordieriet en granaat in figuur 24 baie min oorvleuel met dié van ander regionale metamorfe terreine, waar sillimaniet stabiel is



Figuur 24a : Sistematieese variasie in die samestelling van granaat in die verskillende metamorfe sones van die huidige ondersoek.

b : Vergelyking van inligting in fig. a met die samestelling van granaat uit ander hoë-graadse metamorfe terreine.

- I (●) = Ortopirokseensone
- II (+) = Ortopirokseenisograad
- III (▲) = Ortoamfiboolsone
- Veld (1) = Gable en Sims (1969)
- Veld (2) = Wynne Edwards en Hay (1963)
- Veld (3) = Dallmeyer en Dodd (1971)
- Veld (4) = Huidige ondersoek

in die plek van ortopirokseen en wat veral vir die Ortopirokseensone geld. Dit lyk dus asof die samestelling van granaat in assosiasie met kordiëriet en hipersteen in die algemeen geskei is van die velde waar sillimaniet stabiel is in die plek van hipersteen.

1.2.2 Variasie in die samestelling van granaat in individuele monsters

In hierdie afdeling word die variasie in die samestelling van granaat in individuele monsters bespreek voordat daar oorgegaan word tot die aspekte van sonering in granaat, en die verwantskap tussen die samestelling van granaat en die graad van metamorfose. Beperkte inligting is vir hierdie doel beskikbaar maar sekere algemene afleidings kan tog gemaak word.



UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG

Granaat in die kordiëriet-granaatgranolietewissel in voorkoms vanaf groot kristalle in die koronatekstuur en klein insluitels in kordiëriet, tot enkele groot kristalle in die matriks. Verteenwoordigende analyses van die drie verskillende voorkomswyses van granaat word in tabel 15 gegee. Uit hierdie tabel is dit duidelik dat die klein insluitels en die groter kristalle in die matriks opvallend in samestelling van die koronagranaat verskil. In beide gevalle is MgO van die koronagranaat hoër en FeO laer as in die ander twee voorkomswyses van granaat. Dit is belangrik dat bogenoemde variasie in samestelling presies in ooreenstemming is met die tipe sonering van granaat wat in enkele monsters waargeneem is (Tabel 16).

Die samestelling van individuele granaatkristalle in verskillende koronas in dieselfde slypplaatjies verskil ook baie min in samestelling van een korrel na 'n ander. Dit geld ook vir die granaat in die kordiërietvrye granaatgranolietewissel (DR 42-2) van die Pelitiese gneis langs die Ortopirokseen-

isograad en in die Ortoamfiboolzone. In gevalle waar sonering opvallend is (in die Ortoamfiboolzone), is selfs gevind dat die kern- en randsamestelling van twee individueel gesoneerde korrel in dieselfde slypplaatjie baie min van mekaar verskil.

Tabel 15 Variasie in die samestelling van granaat in individuele monsters van die kordieriet-granaatgranoliet. $X_{Mg} = 100 \cdot Mg / (Mg + Fe^{+2})$

Monster No.	MgO (massa %)	FeO (massa %)	CaO (massa %)	MnO (massa %)	X_{Mg}
<u>DR. 19</u>					
1) Koronagranaat	10,06	27,19	0,98	0,34	39,70
2) Matriks	6,74	28,52	1,03	nie gedoen	35,30
<u>DR. 54</u>					
1) Koronagranaat	10,39	25,32	1,03	0,73	42,20
2) Insluitseel in kordieriet	9,61	26,45	1,08	nie gedoen	39,20
<u>DR. 73</u>					
1) Koronagranaat	8,75	28,33	1,21	1,00	35,50
2) Insluitseel in kordieriet	7,80	29,21	1,32	0,59	32,20

1.2.3 Sonering van granaat

UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG

Geen sistematiese studie van sonering van granaat is onderneem nie. Daar is slegs gepoog om die maksimum variasie in samestelling van individuele korrels te bepaal en vir hierdie doel is volledige puntanalises verkry van posisies so na as moontlik aan die kern en rand van individuele korrels. Afgesien van die gebrek aan meer volledige inligting word die resultate van hierdie ondersoek tog in redelike detail bespreek aangesien 'n kennis van die tipe sonering van belang is in die ondersoek van die metamorfe geskiedenis van die gebied. Die volledige analises word in tabelle 13a-c gegee terwyl slegs gegewens vir monsters met gesoneerde granate in tabel 16 opgesom word. Die bespreking is met verwysing na laasgenoemde tabel.

Die meeste granate van die Ortopirokseensone vertoon geen opvallende tekens van sonering nie en tekens van sonering is slegs in twee van die elf monsters wat ondersoek is

gevind (Tabel 16). In teenstelling hiermee vertoon granaat in drie van die ses monsters langs die Ortopirokseensisograad en sewe van die nege monsters uit die Ortoamfiboolzone opvallende tekens van sonering (Tabel 16). Die algemene gebrek aan sonering in die granaat van die Ortopirokseensone is kenmerkend van hoë-gradse metamorfe terreine (Dallmeyer, 1974a, p. 339).

Tabel 16 Sonering van granaat in die Palitiese gnais. Waardes is in massaprosent. A = Ortopirokseensone, B = Ortopirokseensisograad, C = Ortoamfiboolzone. ¹Omgekeerde sonering. ²Normale sonering. ³Onreëlmatige sonering.

Monster-nommer	Geassosieerde ferromagnetiese minerale	MgO		FeO		CaO		MnO	
		Kern	rand	Kern	rand	Kern	rand	Kern	rand
A.	Kordieriet, biotiet, hipersteen	9,06	8,29	27,68	28,48	2,09	1,23	0,33	1,05
		10,24	8,90	26,75	28,08	1,32	1,21	0,50	0,71
D.	Biotiet	8,83	7,97	27,58	29,09	1,83	1,52	0,31	0,41
	Biotiet	8,52	8,15	28,14	28,94	1,73	1,44	0,45	0,41
	Ortoamfibool, biotiet, hipersteen	9,06	9,11	27,68	28,65	2,09	1,15	0,33	0,29
C.	Kordieriet, biotiet	9,40	7,29	27,28	29,39	1,35	1,13	0,48	0,77
	Kordieriet, biotiet, ortoamfibool	8,94	7,61	28,70	30,91	1,49	1,39	0,51	0,54
	Ortoamfibool, biotiet	6,96	5,70	29,90	30,78	1,40	2,13	1,17	1,09
	Ortoamfibool, biotiet	6,95	6,54	30,21	29,33	1,64	2,81	1,16	1,03
	Ortoamfibool	7,00	5,91	30,28	32,53	2,76	2,01	0,31	0,32
	Ortoamfibool, biotiet	7,03	7,86	28,94	28,64	2,02	1,61	1,44	1,05
	Ortoamfibool, biotiet	6,50	7,24	28,08	30,06	2,38	1,51	2,73	1,20

Die gesoneerde granaat in die twee monsters (DR 80 en MX, Tabel 16) van die Ortopirokseensone vertoon eenvoudige en sistematiese variasies in samestelling van die kern na die rand. MgO en CaO neem af en FeO en MnO neem toe. Hierdie variasie in samestelling is in teenstelling met normale sonering (Hollister, 1966; Atherton en Edmunds, 1966) wat gepaard gaan met 'n afname in CaO en MnO en 'n toename in MgO van die kern na die rand. Die omgekeerde sonering van die granate in hierdie ondersoek kom ooreen met inligting uit die literatuur vir ander metamorfe terreine (Grant en Weiblen, 1971; Ashworth en Chinner, 1978; Berg, 1977; Hollister, 1977).

Normale sonering word algemeen aan die hand van Rayleigh se fraksioneringsmodel verklaar (Hollister, 1966). Basies kom dit daarop neer dat normale sonering veral met betrekking tot MnO, verband hou met die feit dat MnO by voorkeur in groeiende granaat substiteer met die gevolg dat die

beskikbare MnO uit die omgewing algaande sal verminder. As gevolg van die groei van die kristal word opeenvolgende sones effektief van die reaksie geïsoleer met 'n gevolglike afname in MnO van die kern na die rand. Normale sonering gaan dus algemeen gepaard met progressiewe metamorfose. In teenstelling hiermee kan omgekeerde sonering toegeskryf word aan 'n proses waarin granaat besig is om retrogressief af te breek (Grant en Weiblen, 1971, p. 29). Dit is in hierdie opsig interessant dat die meeste voorbeelde van omgekeerde (of retrograad) sonering voorkom in hoë-graadse metamorfe terreine (Hess, 1971; Evans en Guidotti, 1966; Misch en Onyeagocha, 1976) waar die proses in alle gevalle aan tekens van retrogressie gekoppel kan word.

Omgekeerde sonering is nie beperk tot granaat van die Ortopirokseensone nie, maar is meer algemeen in granaat van die Ortopirokseenisograad en Ortoamfiboolzone (Tabel 16). In die geval van die Ortoamfiboolzone is die sonering egter nie altyd eenvoudig en sistematies nie, en bo en behalwe omgekeerde sonering is enkele gevalle van normale sonering (DV 23 en DV 2) en ook onreëlmatige sonering (M 447) waargeneem. Die res van die bespreking het egter slegs betrekking op die baie meer algemene gevalle van omgekeerde sonering.

Omgekeerde sonering (veral met betrekking tot MgO en FeO) is kenmerkend van nege uit die twaalf gevalle wat ondersoek is (Tabel 16). In ses van hierdie monsters neem MgO en CaO af en FeO en MnO toe van die kern na die rand. MnO vertoon in twee gevalle geen variasie nie (DR 156 en DR 184) en in een monster (DR 53) neem MnO 'n bietjie af en CaO toe van die kern na die rand. Die mees opvallende verskille in samestelling word egter deur die variasie in MgO en FeO geïllustreer.

Dit is verder ook opvallend dat omgekeerde sonering in granaat nie beperk is tot bepaalde mineraalassosiasies nie. Die volgende verskillende assosiasies word betrek:

granaat+kordiëriet+hipersteen+biotiet (DR 80 en MX)
 granaat+kordiëriet+sillimaniet+biotiet (DV 45)
 granaat+ortoamfibool+kianiet+biotiet (DV 53, DV 26)
 granaat+ortoamfibool (DR 184)
 granaat+biotiet (DR 156, DR 150)

1.2.3.1 Bespreking

Grant en Weiblen (1971, Tabel 4 en Fig. 3) verklaar omgekeerde sonering in granaat aan die hand van 'n retrograadmodel. Na aanleiding van hierdie model ondergaan granaat (in die versameling granaat+kordiëriet+antofilliet+biotiet) resorpsie as gevolg van reaksie met die geassosieerde minerale tydens dalende temperatuur. Gedurende hierdie proses sal Mn^{+2} by voorkeur in die oorblywende granaat konsentreer aangesien die geassosieerde minerale geen of baie min Mn^{+2} bevat. Die verspreiding van Mg^{+2} en Fe^{+2} in granaat in hierdie model is gekoppel aan die teoretiese faseverwantskappe tussen granaat, kordiëriet en antofilliet tydens dalende temperatuur (Grant en Weiblen, 1971, Tabel 4 en Fig. 3).

Hierdie retrograadmodel van Grant en Weiblen (1971) is egter grootliks teoreties aangesien hulle dit in die eerste plek beklemtoon dat daar op petrografiese gronde geen tekens van reaksie is tussen granaat, kordiëriet en antofilliet in die monsters wat deur hulle ondersoek is nie. Die model is verder gebaseer op gepubliseerde analitiese gegewens vir samebestaande kordiëriet, granaat en antofilliet.

Die omgekeerde sonering in granaat in die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie skep dus die geleentheid om hierdie model uit 'n meer kwantitatiewe oogpunt te ondersoek. Presies dieselfde mineraalversamelings (met hipersteen in die plek van antofilliet) is hier ter sprake, en hierdie versamelings word gekenmerk deur 'n opvallende reaksie-

verwantskap waarin granaat besig is om af te breek na kordiëriet en hipersteen. Hierdie reaksie kan van die aanvanklike tot die volledige (verdwyning van granaat) stadium gevolg word (Fig. 11).

Vir die doeleindes van hierdie ondersoek word gebruik gemaak van twee monsters (DR 59 en DR 73) uit die Ortopirokseen-sone. Die twee monsters het 'n soortgelyke totale chemiese samestelling en word beide deur koronateksture gekenmerk. Monster DR 59 illustreer 'n gemiddelde stadium in die reaksie waarin granaat afbreek na kordiëriet en hipersteen, terwyl DR 73 'n meer gevorderde stadium van dieselfde reaksie illustreer. Die soortgelyke chemiese samestelling van die twee gesteentes (Fig. 25) skakel die moontlikheid uit dat dit verantwoordelik kan wees vir die verskil in die verloop van die reaksie. Toepaslike analitiese en modale gegewens vir kordiëriet, granaat, hipersteen en biotiet in die twee monsters word in tabel 17 gegee.

Tabel 17 Analitiese gegewens vir granaat, hipersteen en biotiet in Monsters DR. 59 en DR. 73. $X_{Mg} = 100$. $Mg/Mg+Fe^{+2}$. Die modale hoeveelhede (volume persent) van bogenoemde minerale word in hakies na die waardes vir X_{Mg} gegee.

Monster	Granaat X_{Mg}	Biotiet X_{Mg}	Kordiëriet X_{Mg}	Hipersteen X_{Mg}
DR. 59	42,6 (8%)	69,1 (6%)	84,0 (10%)	66,4 (11%)
DR. 73	35,0 (1%)	64,2 (8%)	82,0 (15%)	62,0 (9%)

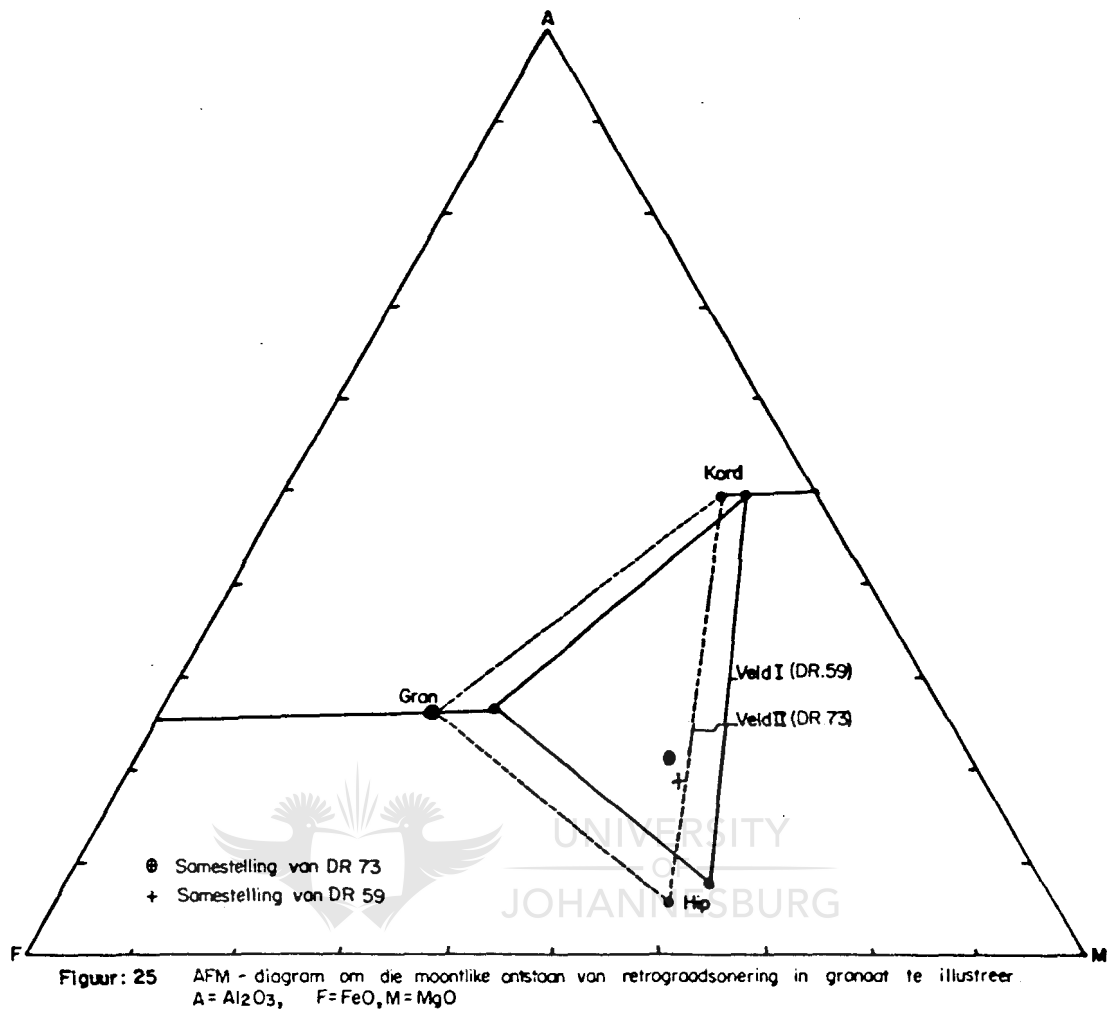
Uit hierdie tabel is dit duidelik dat X_{Mg} van kordiëriet, biotiet en hipersteen sistematies afneem met 'n afname in X_{Mg} van granaat. Die afname in X_{Mg} van granaat gaan verder gepaard met 'n afname in die hoeveelheid granaat. Hierdie variasie in X_{Mg} van granaat vanaf DR 59 na DR 73 is natuurlik nie gekoppel aan sonering nie, maar is in ooreenstemming met die waarneming dat MgO afneem van die kern na die rand in die monsters waarin granaat wel gesoneerd is.

Indien daar aanvaar word dat bogenoemde mineraalversameling in 'n toestand van ewewig is (Afd. VII en VIII) sou dit

beteken dat die minerale 'n konstante samestelling moet hê onder konstante eksterne fisiese toestande. Enige variasie in hierdie fisiese toestande sal dus weerspieël word deur 'n sistematiese variasie in die samestelling van die minerale. Die tipe variasie in samestelling wat verwag word kan aan die hand van die volgende voorbeeld geïllustreer word:

Die faseverwantskappe tussen granaat, kordiëriet, hipersteen en biotiet kan in terme van vier komponente op 'n AKFM-tetraëder (Thompson, 1957) voorgestel word. Biotiet speel egter geen opvallende rol in die reaksieverwantskap tussen granaat, hipersteen en kordiëriet nie en gevolglik kan K_2O voorlopig as 'n komponent, en biotiet as 'n fase, uit bogenoemde sisteem verwyder word. Die oorblywende drie fases kan gerieflik in 'n ternêre AFM-diagram voorgestel word (Fig. 25). Die samestelling van die twee monsters (DR 59 en DR 73) word ook op die diagram voorgestel. Die samestellings stip in beide drie-fasevelde. Uit hierdie diagram is dit duidelik dat die M-waarde van granaat in drie-faseveld I hoër is as dié van granaat in veld II. Dit is verder ook duidelik dat die relatiewe verhouding van granaat van ongeveer 14 persent in veld I afneem tot ongeveer 5 persent in veld II. Hierdie afname in die verhouding van granaat vanaf veld I na veld II is in ooreenstemming met die modale afname van granaat vanaf monsters DR 59 na DR 73 (Tabel 17). By implikasie beteken dit dus dat 'n afname in die M-waarde van granaat in die versameling granaat+kordiëriet+hipersteen weerspieël word deur 'n ooreenstemmende afname in die hoeveelheid granaat.

Omgekeerde sonering in granaat kan dus verklaar word aan die hand van die reaksie waarin granaat afbreek na kordiëriet en hipersteen. Tydens hierdie reaksie sal die kern van granaat verryk word in Mg^{+2} en verarm word in Mn^{+2} relatief tot die rand. Dit is so omdat Fe^{+2} en Mn^{+2} by voorkeur relatief tot Mg^{+2} in die oorblywende granaat sal konsentreer aangesien die geassosieerde minerale (kordiëriet en hipersteen) Mg-ryk en Mn-arm is.



Bogenoemde voorbeeld is slegs gebruik om Grant en Weiblen (1971) se voorgestelde retrograadmodel uit 'n meer kwantitatiewe oogpunt te ondersoek. Die granaat in hierdie voorbeeld is nie gesoneer nie, maar die verandering in die samestelling van granaat vanaf DR 59 na DR 73 is in ooreenstemming met die tipe sonering wat in monsters DR 80 en MX (Tabel 16) waargeneem is. Die moontlikheid bestaan dus dat die omgekeerde sonering van granaat in die enkele monsters van die Ortopirokseensone aan die deurlopende reaksieverwantskap tussen granaat, kordiëriet en hipersteen (Fig. 11) toegeskryf kan word. Dit is in hierdie opsig ook interessant om daarop te let dat die verskil in samestelling tussen die koronagranaat en die relik-insluitels van granaat in kordiëriet van dieselfde monsters (Tabel 15) ook in ooreenstemming is met die waargenome retrograadsonering.

Die reaksie granaat+kwarts = kordiëriet+hipersteen word volgens Hensen en Green (1970, 1973) hoofsaaklik deur 'n afname in druk verklaar. Die versameling granaat+hipersteen+kordiëriet verteenwoordig egter 'n gly-ewewig sodat beide temperatuur en druk binne perke kan varieer. Die vraag of die omgekeerde sonering van granaat dus deur 'n afname in druk en/of temperatuur beheer is word volledig in Afdeling VIII-2.3.4 bespreek.

Die voorgestelde retrograadmodel vir die omgekeerde sonering van granaat (as gevolg van 'n reaksie waarin granaat gebruik word om kordiëriet en hipersteen te vorm) word egter gekompliseer deur die waargenome sonering van die randsone van kordiëriet in kontak met granaat in die koronateksture. In die eerste plek is daar reeds gewys (Tabel 12b) dat kordiëriet in die meeste koronateksture hierdie sonering vertoon, terwyl granaat weer net in enkele gevalle gesoneerd is. Dit is verder ook opvallend dat granaat en kordiëriet, met slegs een uitsondering (DR 80, Tabela 12b en 16), nooit saam in dieselfde monster gesoneerd is nie. In die meeste monsters is dus of granaat of kordiëriet, maar nie beide nie, gesoneerd. Laastens is dit uit tabel 12b duidelik dat die sonering van kordiëriet in die teenoorgestelde rigting as dié van granaat is. In die geval van kordiëriet neem MgO toe, en FeO af, van die kern na die rand. Hierdie sonering van kordiëriet kan nie aan die hand van die deurlopende reaksieverwantskap tussen kordiëriet, granaat en hipersteen verklaar word nie. Met verwysing na figuur 25 is dit tog duidelik dat so 'n model sal vereis dat die FeO/MgO verhouding in beide minerale moet toeneem. Dit lyk dus asof die randsamestelling van kordiëriet in kontak met granaat deur een of ander tipe soliede - toestand diffusiemeganisme gemodifiseer is nadat die deurlopende reaksie tot stilstand gekom het. So 'n voorstel word ondersteun deur die waarneming dat kordiëriet algemeen in die koronatekstuur gesoneerd is, terwyl granaat weer slegs in twee gevalle (MX en DR 80) tekens van sonering vertoon.

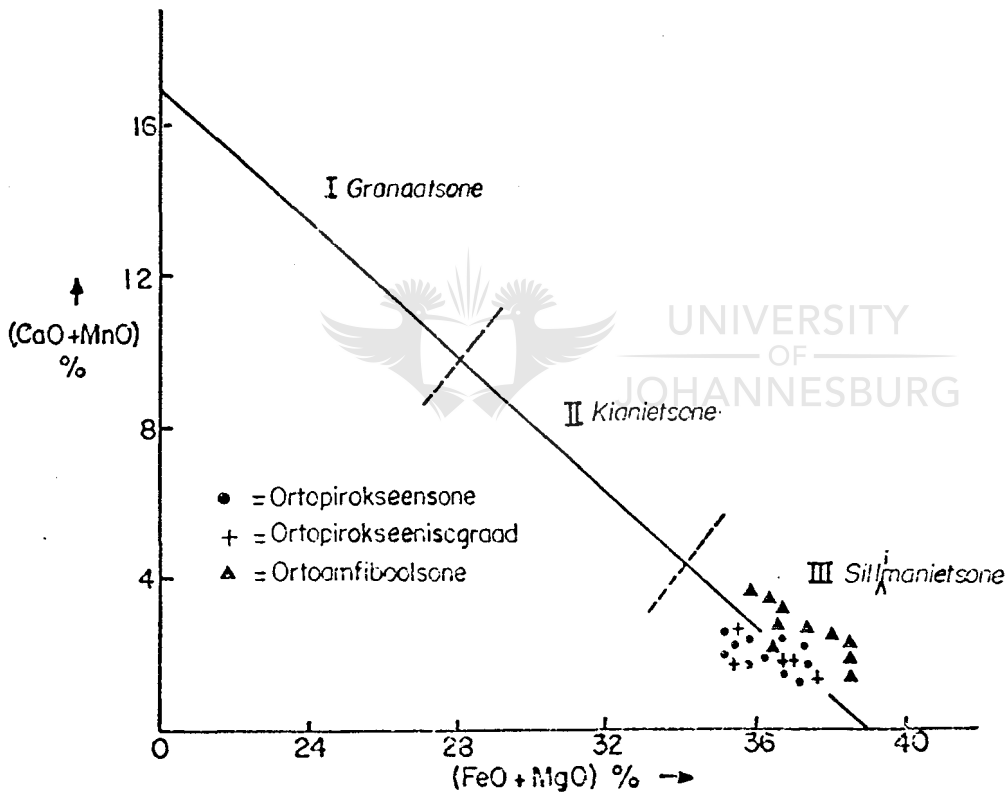
1.2.4 Verwantskap tussen die samestelling van granaat en die graad van metamorfose

Die verwantskap tussen die graad van metamorfose en variasies in die chemiese samestelling van granaat is 'n onderwerp wat steeds belangstelling uitlok (Bahneman, 1975; Miyashiro en Shido, 1973).

Sturt (1962, p. 183) ondersteun die voorstel van Miyashiro (1953) dat 'n sistematiese verwantskap tussen die graad van metamorfose en die $\text{CaO}+\text{MnO} : \text{MgO}+\text{FeO}$ verhouding in granate van pelitiese gesteentes bestaan. Nandi (1967, p. 90) volg hierdie voorstel op en kalibreer bogenoemde verhouding in granaat met spesifieke metamorfe sonas (kyk ook Fig. 26). In al die gevalle word daar gevind dat 'n toename in die graad van metamorfose gepaard gaan met 'n afname in $\text{CaO}+\text{MnO}$ en 'n toename in $\text{MgO}+\text{FeO}$ in granaat. Die toepaslike chemiese inligting is egter slegs van toepassing vir granate van pelitiese gesteentes en die metode het dus 'n beperkte toepassing vir granate uit ander gesteentes (Bahneman, 1975; Bhattacharyya e.a., 1969, Fig. 2). Alhoewel hierdie waargenome variasie in die samestelling van granaat hoofsaaklik toegeskryf word aan 'n toename in temperatuur bly dit egter steeds belangrik om die moontlike invloed van die totale chemiese samestelling van die moedergesteentes op die samestelling van die granaat in gedagte te hou. Die geassosieerde minerale, en veral die moontlikheid van reaksies tussen hierdie minerale, kan ook 'n belangrike rol in die uiteindelijke samestelling van die granaat speel (Binns, 1969a, p. 330; Miyashiro en Shido, 1973, p. 19).

Die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie skep 'n goeie geleentheid om die invloed van variasies in die graad van metamorfose op die samestelling van granaat te ondersoek. Die moontlike invloed van variasies in gesteentesamestelling word beperk deur die konstante chemiese samestelling van hierdie gesteentes in die verskillende metamorfe sonas

(Fig. 18). Die enigste (en ook belangrike) beperking is egter die relatiewe klein variasie in die graad van metamorfose in die gebied. Hierdie beperking word duidelik geïllustreer indien $MgO+FeO$ in granaat teen $CaO+MnO$ gestip word (Fig. 26). Soos verwag, stip al die granate in die sillimanietveld op hierdie diagram en geen verskille is opvallend tussen die granate van die verskillende metamorfe sones nie. Die rede hiervoor is natuurlik dat al die granate in elk geval afkomstig is vanaf gesteentes wat tot die sillimaniet- en hoër grade van metamorfose behoort.



Figuur:26 Verwantskap tussen die samestelling van granaat en die graad van metamorfose (Nandi, 1967 FIG 1.)

Die situasie verander egter indien die samestelling van granaat in terme van die endlidmolekules gestip word (Fig. 24). Hierdie figure illustreer onmiddellik die sistematiese variasie in die samestelling van granaat in die verskillende metamorfe sones. Die granate van die verskillende sones stip almal in beperkte velde met baie min oorvleueling

tussen die individuele velde. Figuur 24 is gebaseer op die randsamestelling in die gevalle waar granaat gesoneer is, maar presies dieselfde diagram word verkry indien die gemiddelde samestelling van granaat gestip word. Die waargenome toename in MgO en afname in FeO met 'n toename in die graad van metamorfose (vanaf die Ortoamfibool- na die Ortopirokseensone) is so sistematies dat dit selfs moontlik is om die posisie van die Ortopirokseenisograad slegs op grond van die samestelling van granaat te karteer.

Die toename in MgO en afname in FeO van granaat met toene- mende graad van metamorfose is 'n welbekende neiging wat ook reeds baie beskryf is (Engel en Engel, 1960). In die gebied onder bespreking is dit veral duidelik dat hierdie varia- sies slegs toegeskryf kan word aan sistematiese variasies in die fisiese veranderlikes en dat klein verskille in die chemiese samestelling van die gesteentes geen rol gespeel het nie.



1.3 HIPERSTEEN

Hipersteen is die indeks-metamorfe mineraal van die Ortopi- rokseensone en is sonder uitsondering in al die monsters van die granaatgranoliet geïdentifiseer. Die voorkoms van ortopirokseen is egter nie beperk tot die granaatgranoliet nie maar die mineraal besit ook 'n wye verspreiding in gesteentes van die hipersteen-ougietgranoliet, die magnetiet- kwartsiet en die Baviaanskloofgneis. Die res van hierdie bespreking het slegs betrekking op die granaatgranoliet.

Chemiese analyses, formules, en waardes vir MgO/FeO (mol) en Mg/Mg+Fe⁺² (atoom) vir geanaliseerde hipersteen in monsters van die verskillende gesteentetipes word in tabelle 18a en b gegee.

TABEL 18a Mikrosonde analyses van hipersteen in die kordieriet-granaatgranoliete van die Ortopirokseensone.

Monster- nommer	^a DR. 19 ¹	^a DR. 19 ²	^a DR. 54 ²	^a DR. 54 ¹	^b DR. 59	^a DR. 73	^b DR. 80	^a M.X.	^a M. 309
Kolom	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	50,87	50,84	48,83	48,91	49,38	51,64	49,27	51,89	50,52
Al ₂ O ₃	5,68	5,09	7,76	8,08	7,48	5,27	5,81	4,92	5,90
TiO ₂	0,07	0,07	0,12	0,04	0,10	0,06	-	0,05	0,03
MgO	22,83	22,64	22,98	23,30	22,25	21,50	20,23	23,18	21,95
FeO ^x	21,19	22,44	19,53	19,22	20,10	23,45	24,02	22,37	21,30
CaO	-	0,07	0,09	0,03	0,04	0,07	0,19	0,10	0,05
MnO	0,11	n.b.	n.b.	0,16	0,15	n.b.	0,32	0,21	0,23
Na ₂ O	-	-	-	0,02	-	-	-	0,03	0,01
Cr ₂ O ₃	0,23	0,08	0,30	0,28	0,48	0,17	-	0,26	0,27
Totaal	100,98	101,23	99,61	100,05	100,23	102,16	99,84	103,01	100,27

Formule bereken op 'n basis van 6 suurstofatome

Si	1,862	1,867	1,803	1,795	1,820	1,883	1,853	1,871	1,864
Al ^{iv}	0,138	0,133	0,197	0,205	0,180	0,117	0,147	0,129	0,136
Totaal	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Al ^{vi}	0,107	0,087	0,141	0,145	0,145	0,110	0,111	0,080	0,121
Ti	0,002	0,002	0,003	0,001	0,003	0,002	-	0,001	0,001
Mg	1,245	1,239	1,265	1,275	1,222	1,168	1,134	1,246	1,207
Fe	0,649	0,689	0,603	0,590	0,620	0,715	0,756	0,675	0,657
Ca	-	0,003	0,004	0,001	0,002	0,003	0,008	0,004	0,002
Mn	0,003	-	-	0,005	0,005	-	0,010	0,006	0,007
Na	-	-	-	0,001	-	-	-	0,002	0,001
Cr	0,007	0,002	0,009	0,008	0,014	0,005	-	0,007	0,008
Totaal	2,013	2,022	2,025	2,025	2,011	2,003	2,019	2,021	2,004
MgO/FeO	1,920	1,798	2,097	2,160	1,973	1,634	1,501	1,847	1,836
Mg/Mg+Fe ⁺²	0,658	0,643	0,677	0,684	0,664	0,620	0,601	0,649	0,647

FeO^x Totale yster as FeO

1 Groot kristal. 2 Wormagtige vergroeiing met kordieriet.

3 Analises van twee verskillende kristalle.

Analitikus: ^a Anglo American Navorsingslaboratorium.

^b Nasional Instituut vir Metallurgie.

Lokaliteite van monsters in Tabel 18a word in Fig. 22 geïllustreer.

1.3.1 Chemiese samestelling

Die chemiese formule van hipersteen is in goeie ooreenstemming met die ideale formule van ortopirokseen. Die minerale bestaan hoofsaaklik uit Mg⁺², Fe⁺², Al⁺³ en Si⁺⁴, met geringe hoeveelhede Ca⁺², Mn⁺², Ti⁺⁴, Na⁺¹ en Cr⁺³. Die ferrosilietinhoud wissel tussen Fs 27,6 en Fs 37,7. Die enigste uitsondering is die ortopirokseen in monster R 9 (Tabel 18b) wat as bronsiet (Fs 24,4) beskryf kan word. Hierdie monster word egter deur 'n baie hoër MgO/FeO-verhouding as in die geval van die res van die granaatgranoliete (Fig. 18c) gekenmerk.

TABEL 18b Mikrosonde analyses van hipersteen in die kordieriet-granaatgranoliete (M.333, DV.11 en R16-vervolg), granaatvrye kordierietgranoliete (DR.10, DR.42-1), kordierietvrye granaatgranoliete (DR.42-2) en die hipersteen-biotietgranoliet (R.9) van die Ortopirokseensone.

Monster-nommer	^a M. 333	^a DV. 11 ³	^a DV. 11 ³	^a R. 16	^a DR. 10	^a DR. 42-1 ¹	^a DR. 42-1 ²	^a DR. 42-2	^a R. 9
Kolom	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	49,89	52,61	51,10	51,50	50,63	52,04	52,57	50,69	49,82
Al ₂ O ₃	5,33	4,73	5,02	6,99	5,51	4,74	4,48	4,42	7,68
TiO ₂	0,11	-	0,05	0,10	0,07	0,08	0,06	0,09	0,14
MgO	20,41	22,84	23,31	24,86	23,27	24,25	25,40	21,60	25,95
FeO ^x	23,29	21,12	20,85	18,11	19,70	18,20	17,61	21,61	15,25
CaO	0,08	0,05	0,07	0,06	0,06	0,09	0,03	0,01	0,03
MnO	0,19	0,18	0,21	0,20	n.b.	n.b.	n.b.	-	n.b.
Na ₂ O	-	0,03	-	0,01	0,01	-	-	-	0,005
Cr ₂ O ₃	0,29	0,39	0,42	0,67	0,33	0,40	0,34	-	0,28
Totaal	99,59	101,95	101,02	102,50	99,58	99,80	100,49	98,52	99,16
Formule bereken op 'n basis van 6 suurstofatome									
Si	1,874	1,902	1,869	1,832	1,867	1,899	1,899	1,906	1,810
Al ^{iv}	0,126	0,098	0,131	0,168	0,133	0,101	0,101	0,094	0,190
Totaal	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Al ^{vi}	0,110	0,104	0,086	0,125	0,107	0,103	0,090	0,102	0,139
Ti	0,003	-	0,001	0,003	0,002	0,002	0,002	0,003	0,004
Mg	1,142	1,230	1,271	1,318	1,279	1,319	1,367	1,211	1,405
Fe	0,732	0,639	0,638	0,539	0,608	0,555	0,532	0,610	0,463
Ca	0,003	0,002	0,003	0,002	0,002	0,004	0,001	-	0,001
Mn	0,006	0,006	0,007	0,006	-	-	-	-	-
Na	-	0,002	-	0,001	-	-	-	-	-
Cr	0,009	0,011	0,012	0,019	0,010	0,012	0,010	-	0,008
Totaal	2,005	1,994	2,018	2,013	2,008	1,995	2,002	1,996	2,02
MgO/FeO	1,562	1,927	1,992	2,446	2,105	2,374	2,570	1,781	3,030
Mg/Mg+Fe ⁺²	0,610	0,658	0,666	0,710	0,678	0,704	0,720	0,640	0,752

FeO^x Totale yster as FeO.

¹ Groot kristal. ² Wurmagtige vergroeiing met kordieriet.

³ Analiese van twee verskillende kristalle.

Analitikus: Anglo American Navorsingslaboratorium.

Lokalisering vir monsters in Tabel 18b word in Fig. 22 geïllustreer.

Die mees kenmerkende eienskap van hipersteen in die granaatgranoliet is die hoë Al-inhoud. Al₂O₃ wissel tussen 4,42 en 8,08 (gemiddeld 5,89) massapersent in die Ortopirokseensone (Tabel 18a) en tussen 2,53 en 3,45 (gemiddeld 3,06) massapersent langs die Ortopirokseenisograad (Tabel 18c).

1.3.2 Die Al₂O₃-inhoud van hipersteen

Die voorkomswyse van hipersteen in die kordieriet-granaatgranoliete verskil grootliks van dié van die kordierietvrye granaatgranoliete. Eersgenoemde gesteentes word gekenmerk

Tabel 18c Mikrosone analises van hipersteen in die kordiëriet-granaatgranoliet (DR 157 en DV 3) en die kordiërietvrye granaatgranoliet (DV 38) langs die Grotopirokseensisogreë

Monster-nommer	DR 157 ¹	DR 157 ²	DV 3 ¹	DV 3 ²	DV 38 ¹	DV 38 ²
Kolom	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	52,87	51,69	51,12	51,84	52,61	51,63
Al ₂ O ₃	3,04	3,45	2,87	2,53	3,29	3,18
TiO ₂	0,04	0,02	0,02	0,02	-	0,02
MgO	24,49	22,22	22,15	21,30	23,97	23,15
FeO ^x	21,97	22,77	23,61	25,37	21,53	21,40
CaO	0,08	0,05	0,08	0,10	0,09	0,08
MnO	0,19	0,22	0,21	0,19	0,08	0,09
Na ₂ O	0,01	0,01	-	-	-	-
Cr ₂ O ₃	0,11	0,17	0,28	0,20	0,14	0,14
Totaal	102,80	100,61	100,34	101,57	101,71	99,68
Formule bereken op 'n basis van 6 suurstofatome						
Si	1,910	1,913	1,909	1,925	1,912	1,917
Al ^{IV}	0,090	0,087	0,091	0,075	0,088	0,083
Totaal	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Al ^{VI}	0,042	0,064	0,035	0,037	0,053	0,056
Ti	0,001	0,001	0,001	0,001	-	0,001
Mg	1,239	1,226	1,233	1,200	1,298	1,281
Fe	0,677	0,705	0,737	0,762	0,654	0,664
Ca	0,003	0,002	0,003	0,004	0,004	0,003
Mn	0,006	0,007	0,007	0,006	0,003	0,003
Na	0,001	0,001	-	-	-	-
Cr	0,003	0,005	0,008	0,006	0,004	0,004
Totaal	2,022	2,011	2,024	2,016	2,016	2,012
MgO/FeO	1,986	1,739	1,672	1,496	1,984	1,928
Mg/Mg+Fe ⁺²	0,665	0,635	0,626	0,599	0,665	0,658

FeO^x Totaal yster as FeO.

¹ en ² Analises van twee verskillende korrels.

Analitikus : Anglo American Navorsingslaboratorium.

Localiteite vir monsters in tabel 18c word in fig. 22 geïllustreer.

deur die teenwoordigheid van koronateksture waarin hipersteen wurmagtig vergroei is met kordiëriet (Fig. 11b). Grofkorrelrige hipersteen omring hierdie koronas gedeeltelik (Fig. 11b), en kom ook verspreid deur die matriks van die gesteentes voor. Die kordiërietvrye granaatgranoliete vertoon geen opvallende reaksieverwantskappe nie en hipersteen is in kleiner hoeveelhede teenwoordig as verspreide kristalle wat veral met biotiet geassosieer is.

Die Al₂O₃-inhoud van die wurmagtige hipersteen in kordiëriet is deurgaans minder as dié van die meer grofkorrelrige kristalle. Die verskille is egter klein, en die maksimum variasie in die Al₂O₃-inhoud is nie meer as 0,59 massapersent

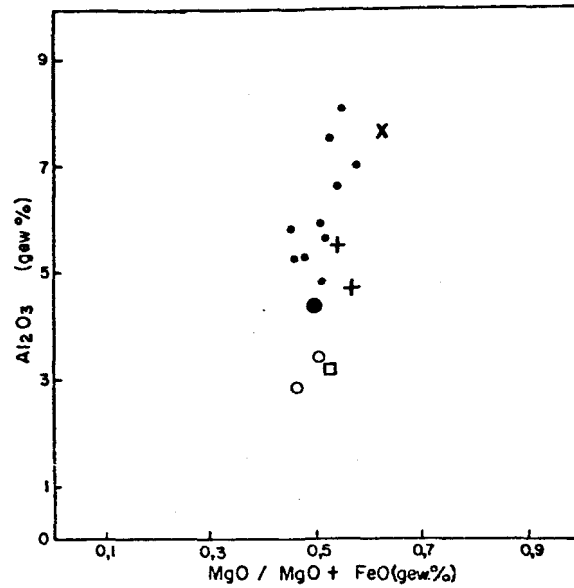
nie (Tabel 19). In een geval (monster DR 10) kon geen verskil in die Al_2O_3 -inhoud van die wurmagtige en grofkorrelrige kristalle waargeneem word nie. Hipersteen vertoon verder geen variasie in Al_2O_3 -inhoud van een korrel na 'n ander in dieselfde gesteente nie.

Tabel 19 Verskil in samestelling tussen groot kristalle van hipersteen en wurmagtige vergroeiings met kordieriet. Alle waardes is as massapersentasie en $X_{Mg} = 100 \cdot Mg / (Mg + Fe^{+2})$

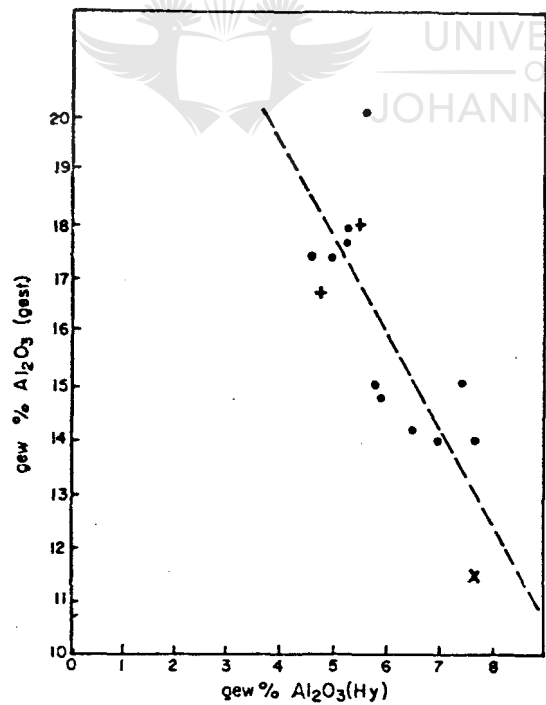
		MgO	FeO	Al_2O_3	X_{Mg}
R. 19	groot kristal	22,83	21,19	5,68	65,80
	wurm	22,64	22,44	5,09	64,30
R. 54	groot kristal	23,30	19,22	8,08	68,40
	wurm	22,98	19,53	7,76	67,70
R. 42-1	groot kristal	24,25	18,20	4,74	70,40
	wurm	25,40	17,61	4,46	72,00

Opvallende verskille in Al_2O_3 -inhoud is egter duidelik indien hipersteen van verskillende monsters vergelyk word. Dit word in figuur 27a geïllustreer waar die Al_2O_3 - en $MgO / (MgO + FeO)$ -verhouding (massapersent) van hipersteen teen mekaar gestip is. Hipersteen van monsters langs die Ortopirokseenisograad bevat opvallend minder Al_2O_3 as dié van die Ortopirokseensone terwyl die Al_2O_3 -inhoud van hipersteen in laasgenoemde gesteentes onderling ook grootliks verskil. Die laer Al_2O_3 -inhoud van hipersteen in die drie monsters van die Ortopirokseenisograad (Fig. 27a) kan geredelik toegeskryf word aan variasies in die PT-toestande wat gekoppel is aan die nie-deurlopende reaksie waarin hipersteen hidreer om antofilliet te vorm (Afd. IV.1.2.2). Die gemiddelde totale Al_2O_3 -inhoud van hipersteen plus antofilliet in die drie monsters van hierdie isograad, naamlik 6,40 massapersent, is dan ook baie na aan die gemiddelde waarde van 5,90 massapersent vir hipersteen in die Ortopirokseensone.

Die variasie in die Al_2O_3 -inhoud van hipersteen in die Ortopirokseensone (Fig. 27a) is in meer detail ondersoek aan



Figuur 27a : Verwantskap tussen die aluminiuminhoud en Mg-waarde van hiperstene in die Pelitiese gneis



Figuur 27b : Verwantskap tussen die aluminiuminhoud van hipersteen en van die Pelitiese gneis

- Kord.-gran.-granaatgranoliet (Opx-sone)
- " " " (Isograad)
- + Gran. vrye kord. granoliet (Opx-sone)
- Kord. vrye gran. granoliet (Opx-sone)
- " " " " (Isograad)
- X Hip.-biot.granoliet (Opx-sone)

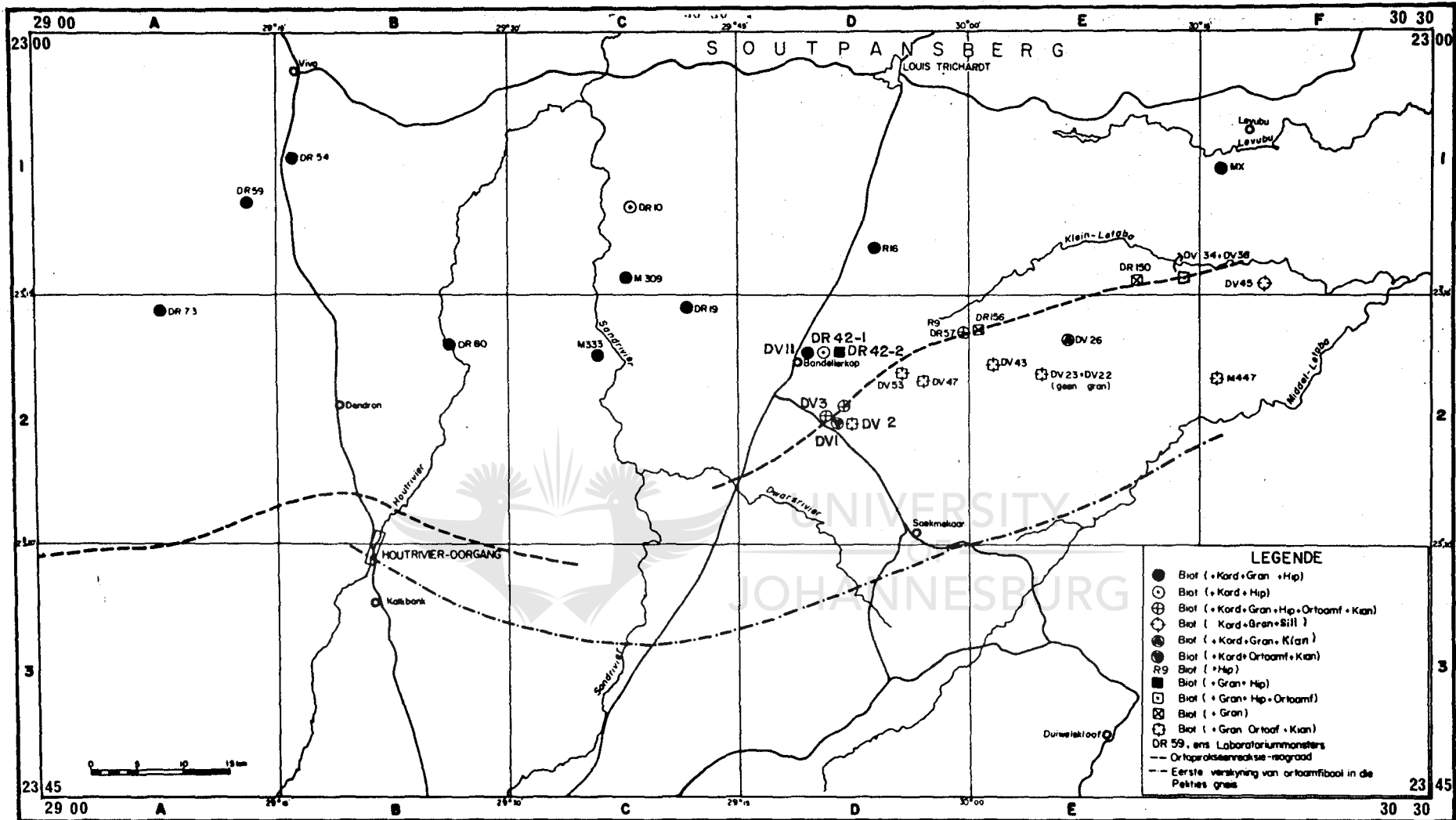
bg. simbole geld vir beide figure a en b

die hand van 'n diagram waarin die massapersent Al_2O_3 in hipersteen teen dié van die gesteente gestip is (Fig. 27b). Hierdie figuur illustreer 'n swak negatiewe korrelasie tussen die beskikbaarheid van aluminium en die samestelling van die geassosieerde hipersteen. Dit lyk dus asof die Al_2O_3 -inhoud van hipersteen in die granaatgranoliete moontlik nie geskik is vir gebruik as 'n potensiële geobarometer nie (Afd. X-2.1.2).

Hipersteen toon verder geen opvallende variasie in die MgO- en FeO-inhoud van een korrel na 'n ander in dieselfde gesteente nie. Die enigste uitsondering is die twee verskillende voorkomswyses van hipersteen in die kordiëriet-granaatgranoliet (Tabel 19) asook hipersteen van monsters langs die Ortopirokseenisograad (Tabel 18c). Die verskil in samestelling tussen die wurmagtige en grofkorrelrige hipersteen is egter klein. Dit geld vir beide XMg en die Al_2O_3 -inhoud. Hipersteen van monsters langs die Ortopirokseenisograad toon in die algemeen groter verskille in samestelling (Tabel 18c).

Die moontlikheid van sonering in hipersteen is nie sistematies ondersoek nie. In die geval van ses monsters waarin hipersteen wel getoets is vir moontlike sonering kon geen opvallende verskille in rand- en kernsamestellings gevind word nie.

Die chemiese samestelling van hipersteen is dus 'n aanduiding dat hierdie mineraal in ewewig is met die geassosieerde minerale. Die klein verskille in die samestellings van die wurmagtige en grofkorrelrige hipersteen kristalle is in ooreenstemming met die geringe afwykings vanaf chemiese ewewig soos geïllustreer word deur die sonering van kordiëriet in kontak met granaat (Afd. VII).

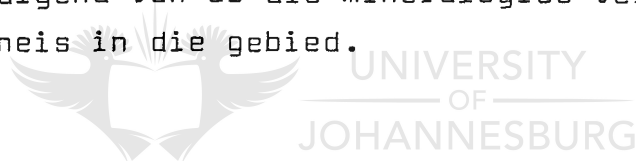


Figuur 28 : Lokaliteitskaart wat die verspreiding van mikrosonde analises vir biotiet aandui (Tabel 20). Die geassosieerde ferromagnetiese minerale word in hakies gegee.

1.4 BIOTIET

Biotiet is die mees verteenwoordigende ferromagnesiese mineraal in die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie en is 'n algemene mineraal in die gesteentes van die gebied suid van die Soutpansberge (Fig. 28). Die mineraal wissel grootliks in hoeveelheid van een gesteente na 'n ander (Tabelle 2 en 4) en die hoeveelheid biotiet neem merkbaar af van die Ortoamfiboolzone na die Ortopirokseensone.

Chemiese analyses en waardes vir MgO/FeO (mol) en $Mg/Mg+Fe^{+2}$ (atoom) vir biotiet in 30 monsters van die Pelitiese gneis word in tabelle 20a-d gegee. Veertien van die monsters is uit die Ortopirokseensone, ses is van die Ortopirokseenisograad en tien is uit die Ortoamfiboolzone. Die monsters is verteenwoordigend van al die mineralogies verskillende tipes Pelitiese gneis in die gebied.



1.4.1 Chemiese Formule van Biotiet

Die totale van die analyses in tabelle 20a-d varieer baie (vanaf 90,5-100 persent), maar die grootste persentasie analyses het totale tussen 93 en 98 persent. Die waterinhoud van biotiet is nie bepaal nie en gevolglik is dit nie moontlik om die rede vir hierdie variasie in die totale van die analyses te ondersoek nie. Biotiet se formule is bereken op 'n watervrye basis van 22 suurstowwe in die struktuurformule. Mikrosonde analyses onderskei nie tussen twee- en driewalente yster nie, en dit is dus moontlik dat 'n sekere persentasie van die totale yster as Fe^{+3} aanwesig is. Die teenwoordigheid van grafiet en sulfiedes in die Pelitiese gneis (Tabelle 2 en 4, Afd. IV) is egter 'n aanduiding van 'n reduserende metamorfe omgewing met die gevolg dat die grootste persentasie yster heelwaarskynlik as Fe^{+2} teenwoordig is, en dat Fe^{+3} so min as 2 persent van die totale

TABEL 20a Mikrosondeanalises van blotiet in die kordieriet-granaatgranoliets van die Ortopirokseensone

Monster- nommer	DR. 19 ¹	DR. 19 ²	DR. 19 ³	DR. 54 ¹	DR. 54 ⁴	DR. 59 ⁴	DR. 59 ⁵	DR. 73 ⁶	DR. 73 ⁵	DR. 80 ⁴	DR. 80 ⁴	M.X. ¹	M. 309 ⁴	M. 333 ¹	DV. 11 ⁵	R. 16 ¹
Kolom	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	37,17	37,69	37,59	36,94	36,74	37,30	37,26	37,55	38,21	35,69	36,25	38,00	36,48	36,68	37,29	38,21
Al ₂ O ₃	16,70	18,30	16,78	15,62	16,16	16,23	16,40	16,89	17,59	16,04	16,20	16,32	17,58	16,46	16,91	17,01
TiO ₂	4,94	3,72	4,73	5,93	5,19	4,14	4,53	4,59	3,36	4,13	4,19	4,85	2,80	4,85	4,58	6,22
MgO	15,05	17,88	16,73	15,54	14,95	13,79	13,27	14,13	15,22	11,81	12,22	15,48	16,34	14,67	16,86	17,36
FeO ^x	11,58	8,53	8,89	12,17	11,69	10,49	11,10	14,07	12,80	14,99	13,16	13,75	11,33	12,36	11,00	10,39
CaO	0,02	-	0,05	-	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MnO	n.b.	n.b.	n.b.	-	n.b.	0,09	0,09	n.b.	n.b.	0,10	0,08	0,02	0,02	0,02	0,05	0,01
Na ₂ O	0,09	0,32	0,13	0,11	0,05	-	-	0,04	0,02	-	-	0,20	0,13	0,14	0,16	0,03
K ₂ O	9,90	8,31	9,22	9,75	8,57	10,00	10,38	8,27	7,89	7,43	10,03	9,66	10,00	9,73	10,22	10,05
Cr ₂ O ₃	0,34	0,41	0,55	0,45	0,39	0,36	0,53	0,45	0,28	0,31	0,39	0,82	0,29	0,60	0,58	0,94
TOTAAL	95,79	95,44	94,68	96,50	93,80	92,40	93,56	95,98	95,38	90,49	92,52	99,10	94,98	95,51	97,64	100,22

Formule bereken op 'n basis van 22 aurotofatome

Si	5,443	5,412	5,475	5,396	5,468	5,631	5,587	5,487	5,554	5,554	5,554	5,423	5,388	5,415	5,358	5,321
Al ^{iv}	2,537	2,588	2,525	2,604	2,532	2,369	2,413	2,513	2,446	2,446	2,446	2,574	2,612	2,585	2,642	2,679
TOTAAL	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Al ^{vi}	0,326	0,510	0,356	0,086	0,300	0,519	0,486	0,397	0,568	0,480	0,480	0,173	0,449	0,279	0,223	0,114
Ti	0,544	0,402	0,518	0,651	0,580	0,470	0,511	0,505	0,367	0,483	0,483	0,521	0,311	0,538	0,495	0,651
Mg	3,284	3,826	3,632	3,383	3,312	3,103	2,965	3,077	3,297	2,790	2,790	3,294	3,597	3,227	3,611	3,603
Fe	1,418	1,024	1,083	1,487	1,453	1,324	1,392	1,720	1,556	1,686	1,686	1,642	1,400	1,526	1,322	1,210
Mn	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0,012	0,011	n.b.	n.b.	0,010	0,010	0,002	0,002	0,003	0,006	0,092
Cr	0,040	0,047	0,063	0,052	0,046	0,043	0,063	0,052	0,032	0,047	0,047	0,093	0,034	0,070	0,066	0,104
TOTAAL	5,612	5,809	5,652	5,659	5,691	5,471	5,428	5,751	5,820	5,496	5,496	5,725	5,793	5,643	5,723	5,684
Ca	0,003	-	0,008	-	0,003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na	0,026	0,089	0,037	0,031	0,014	-	-	0,011	0,006	-	-	0,055	0,037	0,040	0,045	0,008
K	1,850	1,522	1,713	1,817	1,625	1,926	1,986	1,542	1,463	1,961	1,961	1,760	1,884	1,832	1,874	1,786
TOTAAL	1,879	1,611	1,759	1,848	1,642	1,926	1,986	1,553	1,469	1,961	1,961	1,815	1,921	1,872	1,919	1,794
MgO/FeO	2,316	3,735	3,354	2,276	2,279	2,343	2,130	1,790	2,119	1,404	1,655	2,010	2,570	2,120	2,731	2,977
Mg/Mg,Fe ⁺²	0,698	0,789	0,770	0,695	0,695	0,701	0,681	0,642	0,679	0,584	0,623	0,667	0,720	0,679	0,732	0,749

FeO^x Totale yster as FeO. n.b. nie bepaal nie.

¹Matriks. ²Insluitsel in granaat. ³Insluitsel in kordieriet en in kontak met granaat. ⁴Insluitsel in kordieriet.

⁵Kontak met kordieriet. ⁶Kontak met hipersteen.

Analitikus: Anglo American Navorsingslaboratorium. ⁴Nasionale Instituut vir Metallurgie.

Lokaliteite vir monsters in Tabel 18a word in Fig. 28 geïllustreer.

TABEL 20b Mikrosonde analyses van biotiet in die granaatvrye kordierietgranoliete, kordierietvrye granaatgranoliet (DR.42-2) en hipersteen-biotietgranoliet (R.9)

Monster-nommer	DR. 10 ⁴	DR. 42-1 ¹	DR. 42-2 ⁷	DR. 42-2 ¹	R. 9 ¹
Kolom	1	2	3	4	5
SiO ₂	37,44	37,91	37,21	36,36	37,33
Al ₂ O ₃	16,99	16,79	17,41	15,76	16,83
TiO ₂	4,27	3,48	4,50	4,86	3,66
MgO	16,30	16,69	16,09	13,72	18,42
FeO ^x	10,74	9,55	10,70	12,40	8,62
CaO	0,02	0,04	-	0,06	0,03
MnO	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Na ₂ O	0,10	0,11	0,08	0,03	0,45
K ₂ O	8,20	8,20	8,06	10,11	8,52
Cr ₂ O ₃	0,53	0,90	0,05	-	0,57
TOTAAL	94,90	93,67	94,10	93,71	94,43

Formule bereken op n basis van 22 suurstofatome

Si	5,469	5,558	5,451	5,507	5,433
Al ^{iv}	2,531	2,442	2,549	2,493	2,567
TOTAAL	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Al ^{vi}	0,396	0,460	0,458	0,321	0,320
Ti	0,469	0,384	0,496	0,554	0,401
Mg	3,549	3,647	3,513	3,097	3,985
Fe	1,312	1,171	1,311	1,571	1,049
Mn	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Cr	0,061	0,104	0,006	-	0,066
TOTAAL	5,787	5,766	5,784	5,543	5,831
Ca	0,003	0,006	-	0,010	0,005
Na	0,028	0,031	0,023	0,009	0,127
K	1,528	1,534	1,506	1,954	1,582
TOTAAL	1,559	1,571	1,529	1,973	1,714
MgO/FeO	2,705	3,114	2,680	1,972	3,808
Mg/Mg+Fe ⁺²	0,730	0,757	0,728	0,664	0,792

FeO^x Totale yster as FeO. n.b. nie bepaal nie.

¹Matriks. ⁴Insluitsel in kordieriet. ⁷kontak met granaat.

Analitikus : Anglo American Navorsingslaboratorium.

Lokalisering vir monsters in Tabel 20b word in Fig. 28 geïllustreer.

yster kan verteenwoordig (Dallmeyer, 1974b, p. 331). Die hoë TiO₂-inhoud van biotiet in veral die Ortopirokseensone is kenmerkend van hoë-gradse metamorfe terreine (Dallmeyer, 1974b; Kwak, 1968).

Die samestelling van twee verteenwoordigende biotietanalises kan aan die hand van die volgende struktuurformules geïllustreer word - die TiO₂-ryke biotiet (DR 19, Tabel 20a) is van die Ortopirokseensone en die TiO₂-arme biotiet (DV 22, Tabel 20d) is van die Ortoamfiboolsone:

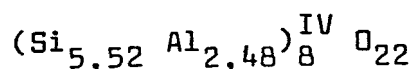
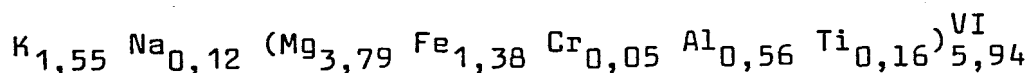
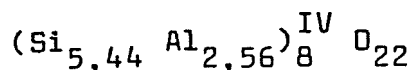
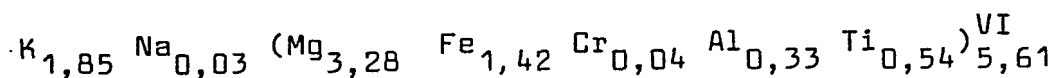
TABEL 20c: Mikrosonde analyses van biotiet in die kordieriet-granaatgranoliete (DR.157 en DV.3), kordierietvrye granaatgranoliete (DV.38 en DV.34) en die granaat-biotietgneis (DR.150 en DR.156) langs die Ortopirokseensisgraad.

Monster-nommer	DV. 38 ⁷	DV. 38 ¹	DV. 34 ¹	DR. 157 ¹	DV. 3 ¹	DV. 3 ⁴	DR. 150 ¹	DR. 156 ¹
Kolom	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	36,93	37,54	37,40	37,97	37,53	37,48	36,97	37,74
Al ₂ O ₃	17,04	17,08	17,24	17,06	17,49	17,09	17,20	16,81
TiO ₂	3,07	3,54	2,63	3,20	3,68	3,53	2,86	2,98
MgO	17,91	17,17	16,14	17,37	17,06	17,84	15,24	16,43
FeO ^x	11,11	11,47	11,44	11,67	11,64	11,09	13,01	12,07
CaO	-	-	-	-	-	-	-	-
MnO	-	-	0,01	-	-	-	0,01	-
Na ₂ O	0,45	0,29	0,69	0,37	0,28	0,24	0,28	0,31
K ₂ O	9,32	9,29	8,35	9,38	9,89	9,69	8,96	9,00
Cr ₂ O ₃	0,50	0,52	0,39	0,43	0,76	0,84	0,26	0,21
TOTAAL	96,32	96,91	94,28	97,45	98,32	97,79	94,79	95,56
Formule bereken op 'n basis van 22 suurstofatome								
Si	5,360	5,412	5,510	5,445	5,356	5,363	5,473	5,515
Al ^{iv}	2,640	2,589	2,490	2,555	2,644	2,638	2,525	2,485
TOTAAL	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Al ^{vi}	0,276	0,314	0,504	0,329	0,298	0,246	0,478	0,410
Ti	0,335	0,384	0,291	0,345	0,395	0,380	0,319	0,328
Mg	3,874	3,689	3,544	3,712	3,628	3,805	3,364	3,578
Fe	1,349	1,383	1,410	1,400	1,389	1,327	1,661	1,475
Mn	-	-	0,001	-	-	-	0,001	-
Cr	0,057	0,059	0,045	0,049	0,086	0,095	0,030	0,024
TOTAAL	5,891	5,829	5,795	5,835	5,796	5,853	5,853	5,815
Ca	-	-	-	-	-	-	-	-
Na	0,127	0,081	0,197	0,103	0,078	0,067	0,080	0,088
K	1,726	1,709	1,569	1,716	1,801	1,770	1,693	1,678
TOTAAL	1,853	1,790	1,766	1,819	1,879	1,770	1,773	1,766
MgO/FeO	2,873	2,668	2,514	2,652	2,612	2,871	2,087	2,426
Mg/Mg+Fe ⁺²	0,742	0,727	0,716	0,726	0,723	0,742	0,676	0,708

FeO^x Totale yster as FeO. ¹Matriks. ⁴Insluitsel in kordieriet. ⁷Kontak met granaat.
 Analitikus: Anglo American Navorsingslaboratorium.

Die kordieriet-granaatgranoliete bevat hier ook antofilliet, gedriet en kianiet. Die kordierietvrye granaatgranoliete bevat hier ook antofilliet.

Lokaliteite vir monsters in Tabel 20c word in Fig. 28 geïllustreer.



Die biotiet van die Pelitiese gneis is MgO-ryk, en Mg⁺² beslaan tussen 50 en 70 persent van die oktaëdriese posisies. Die klassifikasie van biotiet is grootliks arbitêr (Deer

TABEL 20d Mikrosonde analyses van biotiet in gesteentes van die Ortoamfiboolsone

Monster- nommer	DV. 45 ¹	DV. 53 ¹	DV. 1 ¹	DV. 2 ¹	DV. 43 ¹	M. 447 ¹	DV. 47 ⁸	DV. 23 ⁷	DV. 23 ¹	DV. 22 ¹	DV. 26 ⁵
Kolom	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	37,93	37,39	38,99	39,27	37,91	39,64	38,72	39,61	38,70	37,95	37,96
Al ₂ O ₃	17,92	18,11	17,59	18,04	18,42	17,87	18,03	18,39	18,04	17,68	17,86
TiO ₂	2,15	1,52	1,74	2,77	1,82	1,73	2,20	1,55	1,72	1,47	1,57
MgO	16,12	16,05	18,11	18,31	16,42	16,76	17,15	18,48	17,14	17,47	17,09
FeO ^x	13,10	11,82	8,99	9,83	12,70	11,61	12,78	11,39	12,01	11,37	11,61
CaO	-	0,01	0,01	-	-	0,02	-	-	-	0,01	-
MnO	0,04	0,04	-	0,01	0,02	0,03	0,02	-	-	0,03	-
Na ₂ O	0,31	0,51	0,50	0,31	0,53	0,50	0,35	0,52	0,43	0,44	0,36
K ₂ O	9,22	8,70	8,35	9,27	8,56	8,96	8,97	8,51	8,71	8,36	8,00
Cr ₂ O ₃	0,41	0,29	0,52	0,79	0,46	0,29	0,39	0,24	0,50	0,40	0,30
TOTAAL	97,20	94,42	94,79	98,60	96,84	95,40	98,61	98,71	97,26	93,20	94,74
Formule bereken op n basis van 22 suurstofatome											
Si	5,473	5,509	5,619	5,493	5,460	5,493	5,481	5,538	5,527	5,522	5,536
Al ^{iv}	2,527	2,492	2,381	2,507	2,540	2,507	2,519	2,462	2,473	2,478	2,464
TOTAAL	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Al ^{vi}	0,322	0,654	0,608	0,468	0,587	0,567	0,490	0,569	0,564	0,555	0,607
Ti	0,233	0,168	0,189	0,291	0,197	0,190	0,234	0,163	0,185	0,161	0,172
Mg	3,467	3,524	3,890	3,817	3,524	3,645	3,618	3,851	3,648	3,789	3,715
Fe	1,581	1,456	1,084	1,150	1,530	1,417	1,513	1,332	1,435	1,384	1,416
Mn	0,005	0,005	-	0,001	0,002	0,004	0,002	-	-	0,004	-
Cr	0,047	0,034	0,059	0,087	0,052	0,034	0,044	0,027	0,057	0,046	0,035
TOTAAL	5,855	5,841	5,830	5,814	5,892	5,857	5,901	5,942	5,889	5,939	5,945
Ca	-	0,002	0,002	-	-	0,003	-	-	-	0,002	-
Na	0,087	0,146	0,140	0,084	0,148	0,142	0,096	0,141	0,119	0,124	0,102
K	1,697	1,635	1,535	1,654	1,573	1,668	1,620	1,518	1,587	1,552	1,489
TOTAAL	1,784	1,783	1,677	1,738	1,721	1,813	1,716	1,659	1,706	1,676	1,591
MgO/FeO	2,192	2,420	3,590	3,319	2,304	2,573	2,391	2,891	2,543	2,738	2,623
Mg/Mg+Fe ⁺²	0,687	0,708	0,782	0,769	0,697	0,720	0,705	0,743	0,718	0,733	0,724

FeO^x Totale yster as FeO. ⁷Matriks. ⁵Kontak met kordieriet. ⁷Kontak met granaat. ⁸Insluitseel in antofilliet.

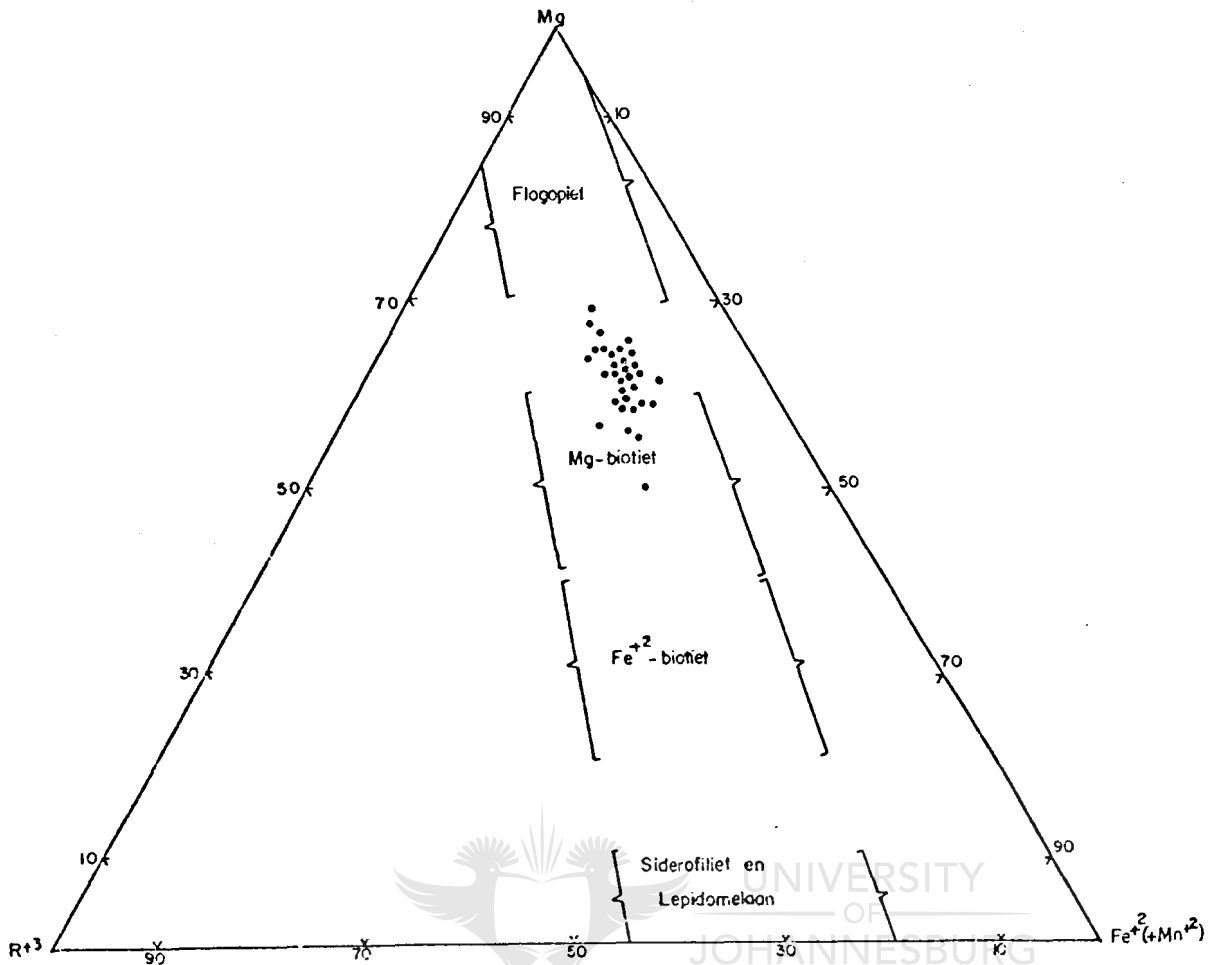
Analitikus: Anglo American Navorsingslaboratorium.

Lokalisering vir monsters in Tabel 20d word in Fig. 28 geïllustreer.

e.a., 1963), maar na aanleiding van Foster (1960) se klassifikasie kan al die biotiete as MgO-ryke biotiet geklassifiseer word (Fig. 29).

1.4.2 Substitusie van Ti⁺⁴ in biotiet

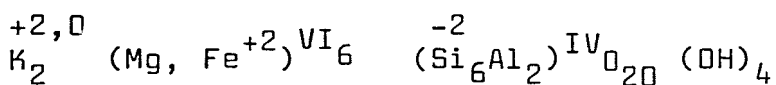
Die posisie wat Ti⁺⁴ in die biotietstruktuur inneem is onbekend aangesien geen struktuurbevestigings van natuurlike TiO₂-ryke biotiet tot op datum gepubliseer is nie. Ti⁺⁴ is dus in ooreenstemming met algemene gebruik (Dallmeyer, 1974b) aan die oktaëdriese groep toegeken. Aangesien die



Figuur 29 : Klassifikasie van biotiet in die Pelitiese gneis (Foster, 1960, Fig. 11). $R^{+3} = Al + Ti$

verdelingskoeffisiënt van Fe^{+2} en Mg^{+2} tussen biotiet en 'n samebestaande ferromagnesiese mineraal (bv. granaat) moontlik beïnvloed word deur die substitusie van Ti^{+4} , Al^{+3} en Fe^{+3} in biotiet (Dallmeyer, 1974a en b) is dit belangrik om die ladings-balansprobleem in biotiet kortliks te bespreek.

Die ideale formule van trioktaëdriese biotiet naamlik



is 'n aanduiding dat die oktaëdriese groep neutraal is met die inherente laagbalans op die tetraëdriese laag (Dallmeyer,

1974b, p. 333). Hierdie ideale formule moet aangepas word indien daar substitusie van Ti^{+4} , Fe^{+3} en Al^{+3} in die oktaëdriese posisie plaasvind. Foster (1960) het voorgestel dat die addisionele positiewe ladings op twee maniere deur biotiet geakkommodeer kan word, naamlik:

- (i) deur toenemende vervanging van tetraëdriese Si^{+4} deur Al^{+3} . As gevolg van hierdie substitusie is die positiewe lading op die tetraëdriese laag minder en die negatiewe lading neem natuurlik toe;
- (ii) deur die skepping van vakante oktaëdriese posisies en die gevolglike skepping van negatiewe ladings op die oktaëdriese laag.

Die grootste persentasie biotietanalises wat deur Foster (1960) opgestel is toon dat Al^{+3} in die tetraëdriese posisie groter is as die teoretiese 2 en dat die aantal gevulde oktaëdriese posisies minder is as die ideale 6. Dit blyk dus dat biotiet van beide meganismes gebruik maak om die ladingsbalans te neutraliseer.

Toepaslike chemiese data vir al die biotietanalises (40 analises) uit tabelle 20a-d word in tabel 21 opgesom.

Tabel 21 Opsomming van chemiese data vir al die beskikbare biotietanalises (Tabelle 20a-d) in die verskillende metamorfe sones. Gegevens is gemiddelde waardes vir elke metamorfe sone.

	Ti^{VI}	Al^{VI}	Si^{IV}	Al^{IV}	Gevulde oktaëdriese posisies	Gevulde tussenlaag-posisies
1. Ortopirokseensone 21 analises	0,492	0,368	5,470	2,529	5,70	1,750
2. Ortopirokseenslaagreed 9 analises	0,351	0,345	5,423	2,578	5,84	1,810
3. Ortoamfiboolasone 11 analises	0,199	0,563	5,514	2,466	5,88	1,710

Met verwysing na tabel 21 is dit eerstens opvallend dat al die biotietanalises deur vakante oktaëdriese posisies gekenmerk word. Dit is verder ook duidelik dat tetraëdriese Al altyd groter as 2 is. Dit lyk dus asof die huidige inligting

in ooreenstemming is met Foster (1960) se voorstel dat die ladingsbalans in biotiet (as gevolg van die substitusie van Ti^{+4}) deur beide die vervanging van Si^{IV} deur Al^{+3} en die skepping van vakante oktaëdriese posisies geneutraliseer word.

Dit is verder ook duidelik uit tabel 21 dat 'n toename in Ti^{VI} gepaard sal gaan met 'n ooreenstemmende toename in die ongevolde oktaëdriese posisies. Op soortgelyke wyse (en indien die analyses van die isograad buite rekening gelaat word) gaan 'n toename in Ti^{VI} ook gepaard met 'n afname in Si^{IV} en toename in Al^{IV} . Dit lyk dus nie asof Si^{IV} deur Ti^{VI} vervang word nie, maar dat Ti^{+4} dieselfde posisie in die biotietstruktuur inneem as die ander oktaëdries gekoördineerde katione.

Die tussenlaagposisie van biotiet is altyd kleiner as 2. Dit is egter normaal vir metamorfe biotiete (Butler, 1967).

Die substitusie van Ti^{+4} in biotiet is hier kortliks en uit 'n algemene oogpunt bespreek. Die moontlike implikasies hiervan op die verdeling van Mg^{+2} en Fe^{+2} tussen biotiet en granaat word meer volledig, en met verwysing na alternatiewe substitusiemeganismes, in Afdeling VII-2.1.2.3 bespreek.

1.4.3 Variasies in die samestelling van biotiet

1.4.3.1 XMg (biot) as 'n funksie van XMg (gest) en geassosieerde minerale

Die verskillende groepe gesteentes in tabel 22 is gegroepeer op grond van soortgelyke chemiese en ekwiwalente mineralogiese samestellings in die verskillende metamorfe sones. Hierdie onderverdeling is reeds in tabel 8 bespreek en in figuur 18c (Afd. V) geïllustreer.

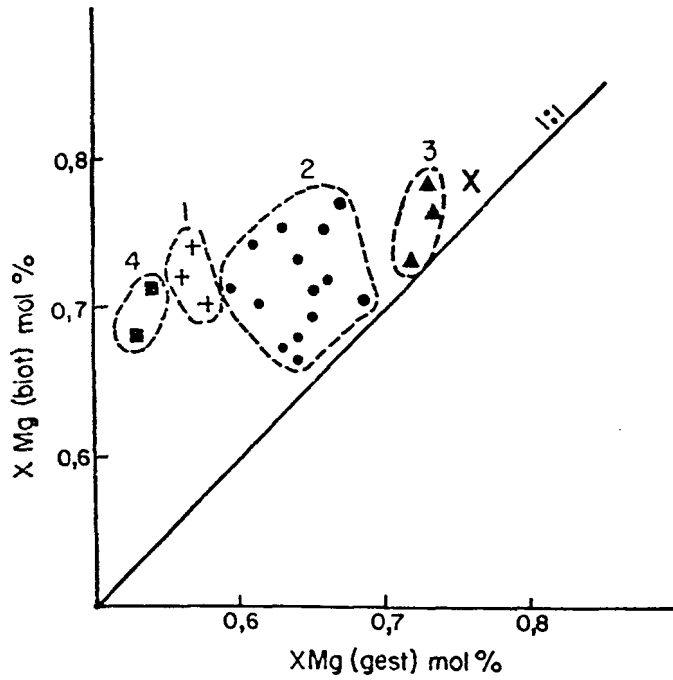
Tabel 22 Verwantskap tussen XMg van biotiet en die ooreenstemmende gesteentes in die verskillende metamorfe sones. XMg = $100 \text{ Mg}/\text{Mg}+\text{Fe}^{+2}$. Die verlaete in samestelling binne elke groep word in hakies geges.

Gesteente groepe	Metamorfe sone	XMg (Biot)	XMg (Gest.)
Groep 1	Ortopirokseensone	69,9 (66,4-72,8)	58,5
Groep 1	Ortopirokseenisograad	72,8 (71,6-74,2)	55,5 (53,9-57,0)
Groep 1	Ortoamfiboolsone	73,3 (71,8-74,3)	62,0
Groep 2	Ortopirokseensone	69,4 (58,4-78,9)	64,6 (61,6-68,6)
Groep 2	Ortopirokseenisograad	73,3 (72,3-74,9)	62,3 (60,6-64)
Groep 2	Ortoamfiboolsone	72,0 (69,7-76,9)	63,3 (59,0-66,9)
Groep 3	Ortopirokseensone	74,4 (73,0-75,5)	72,4 (72,2-72,5)
Groep 3	Ortoamfiboolsone	78,2	73,3
Groep 4	Ortopirokseenisograad	69,2 (67,6-70,8)	53,4 (52,5-54,2)
R 9	Ortopirokseensone	79,2	76,4

Die onderverdeling van die Pelitiese gneis in die vier hoofgroepe gesteentes word in tabel 8 (Afd. V) geges. Totale chemiese analiese word in tabelle 7a-e geges.

Met verwysing na tabel 22 is dit duidelik dat XMg van biotiet in die granaatryke gesteentes (Groepe 1, 2 en 4) onderling dieselfde variasie vertoon. In teenstelling hiermee is XMg (biot) van die granaatryke gesteentes (Groepe 3 en R 9) opvallend hoër as die vorige groepe. Indien slegs die granaatryke gesteentes beskou word is dit verder duidelik dat XMg van die gesteentes grootliks van een groep na 'n ander verskil. Hierdie verskille word in figuur 30 geïllustreer. Dit is ook duidelik dat die verskillende groepe gesteentes elk 'n omlynde veld in hierdie figuur beslaan.

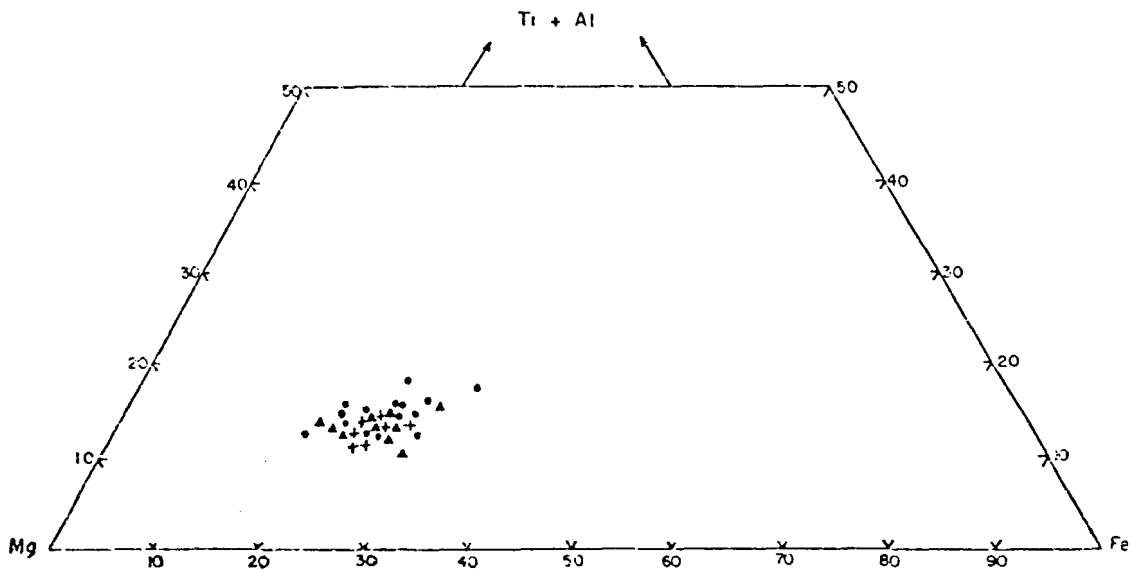
Die samestelling van biotiet is ook gestip as 'n persentasie van die gevulde oktaëdriese posisies (Figuur 31). In die geval van laasgenoemde diagram kon nie onderskei word tussen die verskillende gesteentegroepe van die metamorfe sones op grond van die samestelling van biotiet nie. Die samestelling van biotiet word dus nie beheer deur die samestelling van die gesteente of deur die teenwoordigheid en/of afwesigheid van kordiëriet of ortoamfibool nie. Die grootste verskille in die samestelling van biotiet word egter weerspieël deur die teenwoordigheid of afwesigheid van granaat. Die gemid-



Figuur 30 : Verwantskap tussen die MgO/MgO + FeO verhouding in biotiet en die ooreenstemmende gesteentes. Die onderverdeling van die Pelitiese gneis in groepe 1, 2, 3 en 4 word in tabel 6 gegee. X = Hipersteen-biotietgranoliet (R 9)



UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG



Figuur 31 : Gemiddelde samestelling van biotiet in individuele monsters uitgedruk as 'n persentasie van die gevulde oktaëdriese posisies

- = Ortopirokseenisone; + = Ortopirokseenisograad;
- ▲ = Ortoamfiboolsone

delde samestelling van biotiet (XMg) in die granaatryke gesteentes (Groepe 1, 2 en 4) is 71,4 teenoor 'n gemiddelde samestelling (XMg) van 77,3 in die geval van die granaatvrye gesteentes (Groep 3 en R 9, Tabel 22).

1.4.3.2 Die TiO_2 -inhoud van biotiet as 'n funksie van XMg (biotiet)

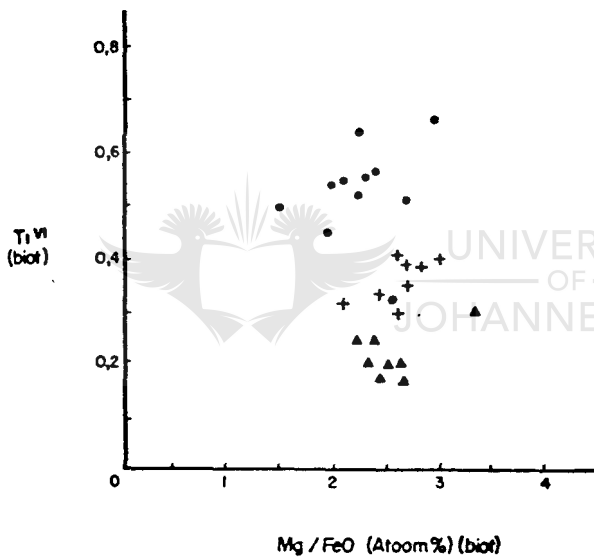
Die variasie in XMg van biotiet word kortliks met verwysing na 'n beperkte aantal toepaslike analyses in tabel 23 bespreek. Uit hierdie tabel lyk dit asof die samestelling van biotiet in individuele monsters afhanklik is van die relatiewe posisie ten opsigte van granaat. Die mees Mg-ryke biotiet kom voor as insluitels in, of in kontak met granaat terwyl die mees Fe-ryke biotiet nie met granaat geassosieer is nie. Hierdie waarneming is onafhanklik van die geassosieerde ferromagnetiese minerale en die metamorfe sone.

Tabel 23 Variasie in XMg (atoompersent) en TiO_2 (massapersent) van biotiet in individuele monsters. DR 19 en DR 42-2 is uit die Ortopirokseensone, DV 38 is van die Ortopirokseenisograad en DV 23 is uit die Ortoamfiboolsonne. Die mineralogiese samestelling van die gesteentes word in tabelle 2 en 4 (Afd. IV) gegee.

Monster	Posisie van analise					
	Insluitsel in granaat		Kontak met granaat		matriks	
	XMg	% TiO_2	XMg	% TiO_2	XMg	% TiO_2
DR 19	78,9	3,72	77,0	4,73	70,1	5,28
DR 42-2	-		72,8	4,5	66,4	4,86
DV 38	-		74,2	3,07	72,7	3,54
DV 23	-		74,3	1,55	71,5	1,72

Die TiO_2 -inhoud van biotiet (Tabel 23) in individuele monsters hou blykbaar ook verband met die teenwoordigheid of afwesigheid van granaat. Biotiet met die hoogste TiO_2 -

inhoud is nie met granaat geassosieer nie terwyl biotiet met die laagste TiO_2 -inhoud insluitels in granaat vorm (DR 19). Variasies in die TiO_2 -inhoud van biotiet in individuele monsters kan dus ook met variasies in XMg van biotiet gekorreleer word - 'n afname in XMg (biot) gaan gepaard met 'n ooreenstemmende afname in die TiO_2 -inhoud van biotiet. Dit is laastens met verwysing na figuur 32 egter duidelik dat daar geen opvallende verwantskap tussen die TiO_2 -inhoud en die MgO/FeO-verhouding van biotiet vir verskillende monsters van 'n spesifieke metamorfe sone is nie. Dit lyk dus nie asof die TiO_2 -inhoud van biotiet vir 'n gegewe graad van metamorfose gekoppel is aan die MgO/FeO-verhouding van die mineraal nie.



BH seems unrelated

Figuur 32 : Verwantskap tussen die Ti-inhoud en Mg/Fe-verhouding van biotiet. Waardes is gemiddeldes vir individuele monsters.

- = Ortopirokseensone; † = Ortopirokseenisograad;
- ▲ = Ortoamfiboolsone

1.4.3.3 Die samestelling van biotiet as 'n funksie van die graad van metamorfose

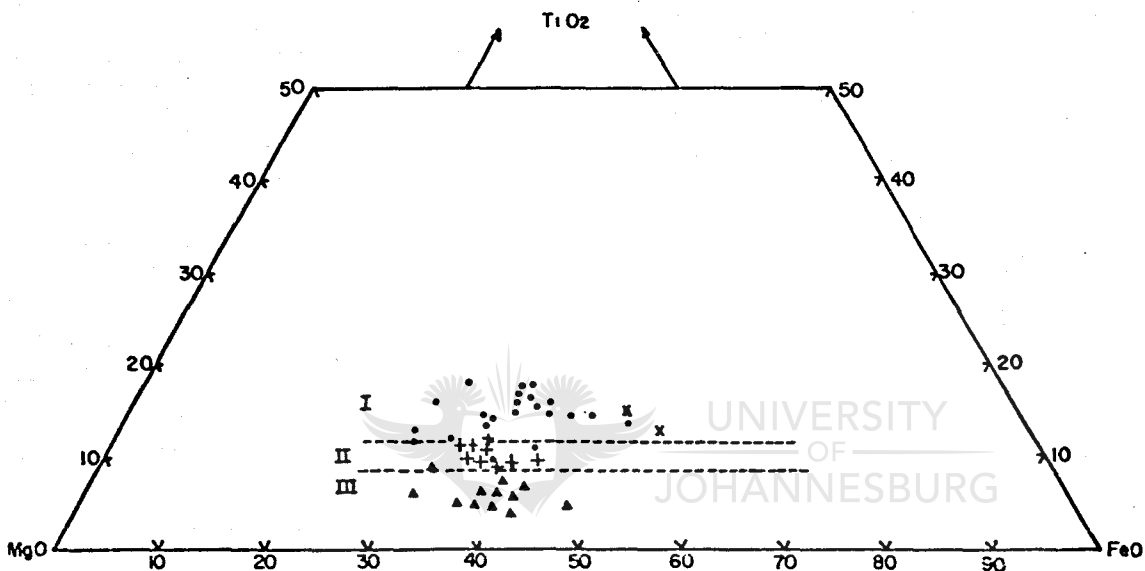
Die samestelling van biotiet is sensitief vir veranderinge in die fisiese toestande van metamorfose en 'n toename in die graad van metamorfose gaan algemeen gepaard met 'n toe-

name in die MgO- en TiO_2 -inhoud van biotiet (Binns, 1969a; Engel en Engel, 1960; Kwak, 1968; Schmid en Wood, 1976). Biotiet is dus potensieel belangrik as 'n indikator van die fisiese toestande van metamorfose, en dit is dus nodig om vas te stel tot watter mate die samestelling van biotiet in die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie gekoppel is aan variasies in die fisiese toestande van metamorfose.

Die variasie in die MgO-inhoud van biotiet met variasies in die graad van metamorfose is nie so sistematies as in die geval van die TiO_2 -inhoud van biotiet nie. Baie skrywers (Butler, 1967; Engel en Engel, 1960; Schmid en Wood, 1976) beskryf sistematiese toenames in XMg van biotiet met toenemende graad van metamorfose. Guidotti (1970, p. 297) beskryf egter 'n afname in XMg van biotiet met toenemende graad van metamorfose, en stel voor dat die aanname dat XMg toeneem met toenemende graad van metamorfose nie algemeen van toepassing is nie. In die huidige ondersoek het dit geblyk dat die MgO-inhoud van biotiet tot 'n groot mate deur die teenwoordigheid of afwesigheid van granaat beheer word (Tabel 22) terwyl variasies in die samestelling van die moedergesteentes 'n baie minder opvallende invloed uitoefen. Indien die samestelling van biotiet in gesteentes met 'n soortgelyke chemiese en mineralogiese samestelling beskou word (d.w.s. individuele groepe in Tabel 22) is dit egter duidelik dat XMg van biotiet redelik sistematies afneem met 'n toenemende graad van metamorfose. Dit is veral opvallend dat die afname binne elke groep presies dieselfde is vir al die individuele groepe (gemiddeld 3,8 mol persent). Dit lyk dus asof hierdie sistematiese afname in XMg van biotiet vanaf die Ortoamfiboolsone na die Ortopirokseensone slegs aan 'n toename in die graad van metamorfose toegeskryf kan word.

Die TiO_2 -inhoud van biotiet vertoon 'n baie meer sistematiese toename met toenemende graad van metamorfose (Kwak, 1968; Engel en Engel, 1960). Kwak (1968, Figuur 1, p. 1225) illustreer 'n lineêre toename in Ti^{+4} vanaf 0,2 tot 0,5

atome oor 'n temperatuurinterval van 465 tot 725°C. Engel en Engel (1960) illustreer 'n opvallend groter lineêre toename (0,36 - 0,60 atome) van Ti^{+4} in biotiet oor 'n baie korter temperatuurinterval van 500 tot 600°C. Guidotti (1970, p. 296) beskryf 'n skeilike toename van gemiddeld 1,22 tot 1,48 massapersent TiO_2 met oorgang vanaf die laer na die hoër sillimaniet sone en skryf hierdie sprong toe aan 'n isograadreaksie waarin muskowiet onder andere afbreek.



Figuur 33 : Sistematiese variasie in die samestelling van biotiet in die verskillende metamorfe sones.

I (●) Ortopirokseensone; II (+) Ortopirokseenisograad;
 III (▲) Ortoamfiboolzone

Die TiO_2 -inhoud van biotiet in die Pelitiese gneis vertoon 'n uitstekende korrelasie met die verskillende metamorfe sones (Fig. 32 en 33). Die gemiddelde TiO_2 -inhoud van biotiet styg vanaf 1,80 massapersent (0,20 katione) in die Ortoamfiboolzone na 3,22 massapersent (0,34 katione) langs die Ortopirokseenisograad tot 4,35 massapersent (0,49 katione) in die Ortopirokseensone. Uit figure 32 en 33 is dit duidelik dat die TiO_2 -inhoud van biotiet in die verskillende monsters en in die verskillende metamorfe sones streng afgebaken kan word en dat daar byna geen oorvleueling tussen die verskillende velde bestaan nie. Hierdie variasie in die

TiO₂-inhoud van biotiet is so sistematies dat (net soos in die geval van die samestelling van granaat, Figuur 24) dit moontlik is om die posisie van die isograad slegs op grond van hierdie parameter te karteer.

Tabel 24 Gebrek aan korrelasie tussen die TiO₂-inhoud (massapersent) van biotiet en van die gesteentes in die verskillende metamorfe sones. Die waardes is gemiddelde waardes vir elke groep gesteentes. Die onderverdeling in die verskillende groepe is dieselfde as in tabel 22.

	Metamorfe sone	TiO ₂ (Gest.)	TiO ₂ (Biot.)
Groep 1	Ortopirokseensone	0,52	4,68
Groep 1	Ortopirokseenisograad	0,65	3,08
Groep 1	Ortoamfiboolsone	0,70	1,64
Groep 2	Ortopirokseensone	0,71	4,79
Groep 2	Ortopirokseenisograad	0,75	3,48
Groep 2	Ortoamfiboolsone	0,63	2,01
Groep 3	Ortopirokseensone	0,76	3,88
Groep 3	Ortoamfiboolsone	0,58	1,74
Groep 4	Ortopirokseenisograad	0,72	2,92

Die samestelling van die moedergesteentes het geen invloed op die TiO₂-inhoud van biotiet nie. Uit tabel 24 is dit duidelik dat die hoeveelheid TiO₂ uiters min van een gesteente na 'n ander varieer, en dat die maksimum variasie in TiO₂-inhoud slegs 0,24 massapersent is. Dit is dus duidelik dat die sistematiese variasie in die TiO₂-inhoud van biotiet vanaf die Ortoamfiboolsone na die Ortopirokseensone slegs aan 'n toenemende graad van metamorfose toegeskryf kan word. Hierdie waargenome toename in TiO₂ met toenemende graad van metamorfose gaan verder gepaard met 'n ooreenstemmende afname in die modale hoeveelheid biotiet. Dit word veral duidelik geïllustreer in die geval van die Groep 2 gesteentes (dit wil sê die kordiëriet-granaatgranoliete, en laergraadse ekwivalente) waarvoor voldoende

inligting beskikbaar is (Tabelle 2 en 4). Die kordiëriet-granaatgranoliete bevat gemiddeld 12,2 volumepersent biotiet, teenoor 'n gemiddeld van 18,5 volumepersent biotiet in soortgelyke gesteentes van die Ortoamfiboolsone. Die toename in die TiO_2 -inhoud van biotiet is verder ook gekoppel aan 'n ooreenstemmende afname in Al^{VI} en Si^{IV} en 'n toename in Al^{IV} (Tabel 21). Soortgelyke variasies in die samestelling van biotiet met toenemende graad van metamorfose word ook deur López Ruiz e.a. (1978) beskryf.

1.4.4 Bespreking

Die variasie in XMg van biotiet ten opsigte van granaat in individuele monsters is blykbaar baie algemeen en is reeds in verskeie hoë-gradse metamorfose terreine beskryf (Hess, 1971; Gable en Sims, 1969; Grant en Weiblen, 1971; Kays en Medaris, 1976). Die waarneming dat biotiet in kontak met granaat meer MgO-ryk is as biotiet in die matriks word in al bogenoemde voorbeelde toegeskryf aan 'n periode van prograadmetamorfose wat opgevolg is deur 'n periode van retrograadmetamorfose. Gedurende laasgenoemde periode het 'n nuwe lokale ewewigstoestand ontwikkel tussen die minerale wat direk in kontak met mekaar is (d.w.s. die rand van granaat in direkte kontak met biotiet). Volgens hierdie model (Hess, 1971, p. 192) behoort die kernsamestelling van granaat en die matriksamestelling van biotiet verteenwoordigend te wees van die hoof (prograad) periode van metamorfose. Die hoë XMg van biotietinsluitels in granaat word deur Hess (1971, p. 193) toegeskryf aan die feit dat hierdie biotiet gedurende die groei van granaat ingesluit is en dus verteenwoordigend is van 'n laer temperatuursamestelling. Dit is egter ook moontlik dat die samestelling van die insluitels gedurende retrograad uitruilingsreaksies verander het. Misch en Onyeagocha (1976) kom op grond van 'n detail ondersoek van reaksies waarin granaat afbreek na plagioklaas, hornblende en biotiet ook tot die gevolgtrekking

dat biotiet in die matriks, wat nie met die reaksies geassosieer is nie, 'n samestelling het wat verteenwoordigend is van die hoofewig tussen granaat en biotiet. Hess (1971) gee geen gegewens vir TiO_2 nie, maar volgens Misch en Onyeagocha (1976, p. 213) is die TiO_2 -inhoud van biotiet in die matriks heelwat hoër (gemiddeld 1 massapersent) as dié wat by die granaatreaksie betrokke is.

Die variasie in die samestelling van biotiet in individuele monsters van die Pelitiese gneis (Tabel 23) kan moontlik toegeskryf word aan 'n toestand van lokale ewig tussen granaat en biotiet tydens 'n opeenvolgende periode van metamorfose (M_2 of M_3). Dit is in hierdie opsig interessant dat biotiet met die laagste TiO_2 -inhoud as insluitels in granaat voorkom terwyl biotiet met die hoogste TiO_2 -inhoud nie met granaat geassosieer is nie. Die hoër TiO_2 -inhoud van biotiet in die matriks is dus ook in ooreenstemming met die voorstel dat die samestelling van hierdie biotiet verteenwoordigend is van die hoofewig in die gesteente. Hierdie aspek word meer volledig bespreek in die afdeling oor die ewigswantskappe tussen samebestaande minerale (Afd. VII-2.1.2).

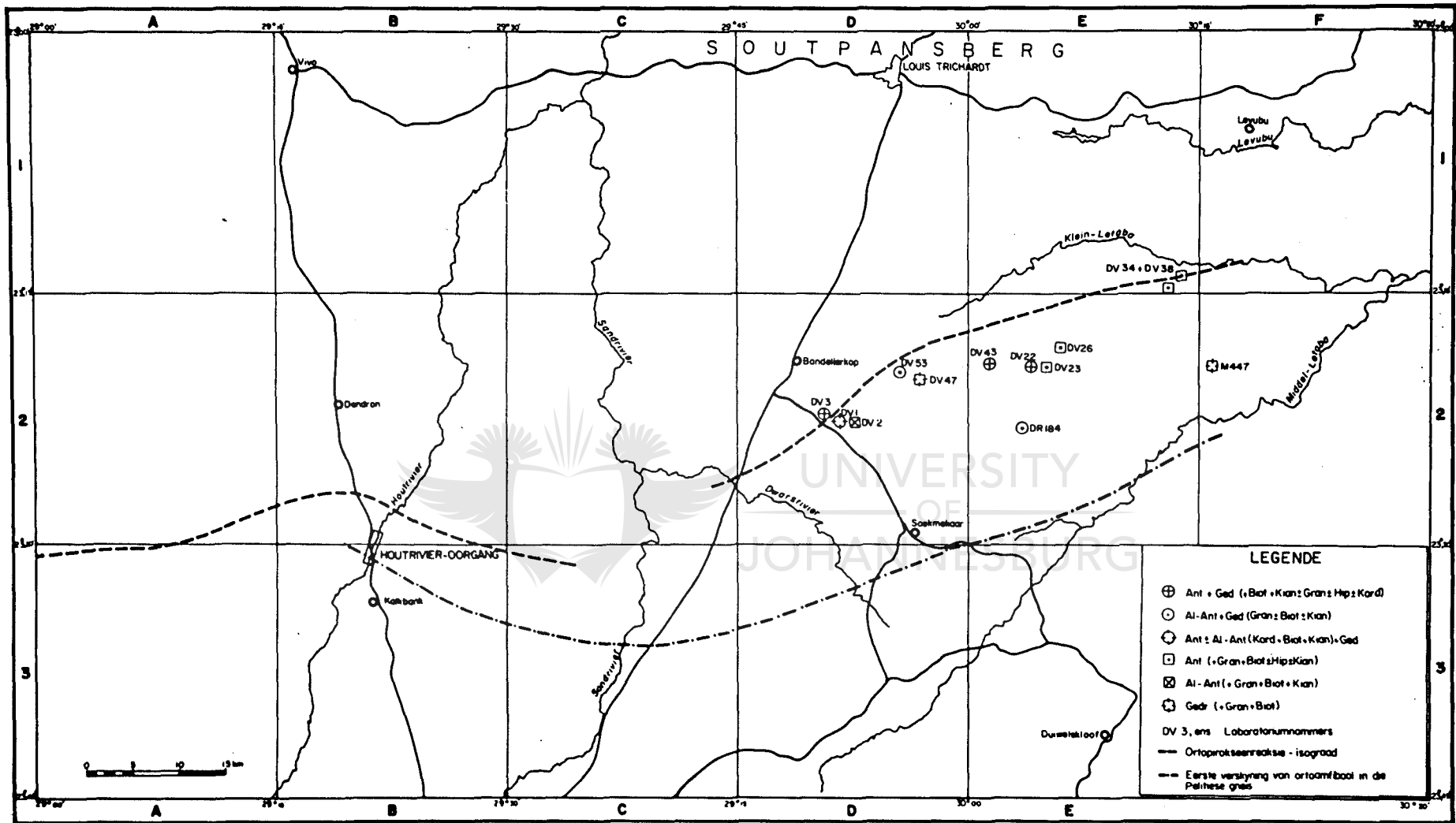
Die volgende algemene gevolgtrekkings kan verder op grond van hierdie ondersoek gemaak word:

- (i) Variasies in XMg (biot) van een monster na 'n ander is slegs gekoppel aan die teenwoordigheid of afwesigheid van granaat (Tabel 22). In die geval van die granaatryke gesteentes is dit duidelik dat variasies in die totale samestelling van die gesteentes of die teenwoordigheid of afwesigheid van ortoamfibool of kordiëriet, geen invloed het op die samestelling van biotiet nie (Tabel 22). Met die uitsondering van die teenwoordigheid of afwesigheid van granaat lyk dit dus nie of die samestelling van biotiet deur petrologiese faktore beheer word nie.

- (ii) XMg (biot) is nie gekoppel aan die variasie in die TiO_2 -inhoud van biotiet in verskillende monsters binne 'n spesifieke metamorfe sone nie (Figuur 32).
- (iii) XMg (biot) in gesteentes met soortgelyke chemiese en mineralogiese samestellings neem sistematies toe vanaf die Ortopirokseensone na die Ortoamfiboolzone (Tabel 22).
- (iv) Die TiO_2 -inhoud van biotiet neem sistematies af vanaf 'n gemiddelde waarde van 4,35 massapersent in die Ortopirokseensone na 1,80 massapersent in die Ortoamfiboolzone (Figuur 33).
- (v) Die variasie in XMg en die TiO_2 -inhoud van biotiet in individuele monsters is in ooreenstemming met die regionale variasie - 'n toename in XMg gaan dus gepaard met 'n afname in die TiO_2 -inhoud (Tabel 23). Hierdie waargenome verwantskap tussen XMg (biot) en die TiO_2 -inhoud van biotiet word nie deur petrologiese faktore beheer nie, maar kan duidelik in verband gebring word met variasies in die graad van metamorfose. Hierdie gevolgtrekking is veral belangrik in soverre dit die verdeling van MgO en FeO tussen biotiet en granaat betref (Afd. VII-2.1.2.3).

1.5 ANTOFILLIET EN GEDRIET

Ortorombiese amfibool is die mees kenmerkende metamorfe mineraal van die Ortoamfiboolzone. Die mineraal besit 'n wye verspreiding in die Pelitiese gneis van hierdie sone (Figuur 34) en is algemeen geassosieer met granaat, biotiet, kianiet, kwarts en plagioklaas. Kordiëriet is nie 'n stabiele mineraal in hierdie sone nie, en die versameling kordiëriet-antofilliet, wat baie algemeen in die literatuur beskryf word, is dus nie kenmerkend van die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie nie.



Figuur 34 : Lokaliteitskaart wat die verspreiding van mikrosonde analises vir antofilliet en gedriet aandui (Tabel 25). Die geassosieerde ferromagnetiese minerale word in hakies gegee.

Die mees opvallende eienskap van die ortoamfiboolgneis is die teenwoordigheid van meer as een tipe ortoamfibool in dieselfde gesteente. Samebestaande ortoamfibole word selde in die literatuur beskryf. Die eerste beskrywing van samebestaande primêre antofilliet en gedriet word waarskynlik deur Stout (1971) gegee van versamelings wat uit kummingtoniet/hornblende-antofilliet-gedriet bestaan. Robinson, e.a., (1969c) het op grond van enkelkristal-diffraksieanalises voorgestel dat antofilliet en gedriet diskrete ontmengingsprodukte vorm. Bogenoemde resultate is dus 'n aanduiding dat antofilliet en gedriet wel onder geskikte toestande 'n ewewigsversameling kan vorm. Hierdie resultate is in teenstelling met Rabbit (1948) se voorstel dat die naam gedriet nie gebruik moet word om 'n Al-ryke antofilliet te beskryf nie.

Die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie bevat bo en behalwe samebestaande antofilliet en gedriet ook Al-antofilliet en gedriet. Al hierdie fases vertoon verder ook tekens van ontmenging. Hierdie gesteentes het dus die geleentheid geskep om die probleem van samebestaande ortoamfibole en die chemiese samestelling van die antofilliet-gedrietreeks in meer detail te ondersoek.

Veertien verteenwoordigende monsters is vir hierdie doel vir mikrosondeanalises voorberei. Vier van hierdie monsters is van die Ortopirokseenisograad en die res is uit die Ortoamfiboolsonne. Die volledige analises, formules en waardes vir MgO/FeO (mol) en $Mg/Mg+Fe^{+2}$ (atoom) word in tabelle 25a en b gegee. Die verskillende assosiasies van ortoamfibool is reeds bespreek (Tabel 4).

Die struktuurformules van ortoamfibool in tabelle 25a en b is bereken op 'n basis van 23 suurstofatome, met die aanname dat $OH+F = 2,00$ atome. Die katioonposisies is as volg bereken (Grapes, e.a., 1977).

- (i) Agt tetraëdriese posisies wat deur Si^{+4} en Al^{+3} gevul word. Som = 8,00.

Tabel 25a. Mikrosonde analyses van antofilliet in gesteentes van die Ortopirokseeerisgraad (DV 38, DV 34, DV 3, DR 157) en uit die Ortoamfiboolsone. Die mineralogiese samestelling van gesteentes uit laesgnoemde metamorfe sone word in Tabel 4 gegee

Monster-nommer	DV 38	DV 34 ¹	DV 34 ¹	DR 157 ¹	DR 157 ¹	DV 3	DV 1	DV 43	DV 23	DV 22	DV 26 ¹	DV 26 ¹
Kolom	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	53,02	53,60	53,69	54,41	53,75	54,19	54,55	51,83	55,09	52,94	54,71	53,12
Al ₂ O ₃	3,99	3,03	2,68	3,15	3,96	2,47	3,36	4,89	3,13	3,67	2,23	4,55
TiO ₂	0,08	0,02	-	0,03	0,04	0,02	0,07	0,11	0,03	0,11	-	-
MgO	22,10	20,93	21,12	22,72	23,43	22,27	22,96	19,51	21,54	20,33	21,61	20,89
FeO ^x	17,85	18,25	18,70	17,96	15,57	18,15	15,06	20,17	19,66	19,46	18,59	18,55
CaO	0,21	0,19	0,16	0,16	0,20	0,16	0,24	0,25	0,23	0,30	0,24	0,24
MnO	0,08	0,08	0,08	0,14	0,16	0,09	0,12	0,27	0,24	0,23	0,10	0,11
Na ₂ O	0,29	0,22	0,16	0,22	0,27	0,17	0,22	0,38	0,19	0,21	0,12	0,39
Cr ₂ O ₃	0,17	0,10	0,09	0,16	0,16	0,20	0,42	0,14	0,10	0,17	-	-
TOTAAL	97,79	96,43	96,69	98,96	99,54	97,72	97,0	97,55	100,23	97,42	97,60	97,85

Formule bereken op 'n basis van 23 suurstofatome

Si	7,537	7,723	7,731	7,631	7,495	7,704	7,698	7,480	7,675	7,613	7,789	7,558
Al ^{IV}	0,463	0,277	0,269	0,365	0,505	0,296	0,302	0,520	0,325	0,387	0,212	0,442
TOTAAL	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Al ^{VI}	0,206	0,238	0,186	0,152	0,146	0,118	0,257	0,312	0,189	0,235	0,162	0,321
Mg	4,682	4,494	4,532	4,749	4,869	4,719	4,829	4,195	4,472	4,357	4,585	4,429
Fe	2,122	2,199	2,252	2,107	2,049	2,152	1,778	2,435	2,291	2,340	2,213	2,207
Ti	0,009	0,002	-	0,003	0,004	0,002	0,007	0,012	0,003	0,012	-	-
Cr	0,019	0,011	0,010	0,018	0,018	0,023	0,047	0,016	0,011	0,019	-	-
Ca	0,032	0,029	0,025	0,024	0,030	0,024	0,036	0,039	0,043	0,046	0,037	0,037
Mn	0,010	0,010	0,010	0,017	0,019	0,011	0,014	0,033	0,028	0,028	0,012	0,013
Na	-	0,017	-	-	-	-	0,032	-	-	-	-	-
[M ₁ -M ₆]	7,08	7,00	7,02	7,07	7,14	7,06	7,00	7,04	7,04	7,04	7,01	7,01
[Na (A)]	0,090	0,045	0,045	0,060	0,073	0,047	0,029	0,106	0,051	0,057	0,033	0,108
MgO/FeO	2,206	2,044	2,013	2,254	2,376	2,167	2,717	1,724	1,952	1,862	2,072	2,008
Mg/Mg+Fe ⁺²	0,688	0,672	0,668	0,693	0,704	0,636	0,731	0,633	0,661	0,651	0,674	0,667

FeO^x Totale yster as FeO. ¹Analises van twee verskillende korrels.

Analitikus: Anglo American Navorsingslaboratorium.

Lokalisering vir monsters in Tabel 25 word in Fig. 34 gegee.

- (ii) Vyf klein oktaëdriese posisies (M₁, M₂ en M₃) wat deur die oorblywende Al⁺³ en dan in die volgorde Ti⁺⁴, Fe⁺³, Mg⁺², Fe⁺² en Mn⁺², gevul word. Som = 5,00.
- (iii) Twee groot oktaëdriese posisies (M₄) wat deur Ca en dan in die volgorde Fe⁺², Mn⁺² en Na⁺¹, gevul word. Som = 2,00.
- (iv) Een A-posisie wat deur al die K⁺¹ en oorblywende Na⁺¹ gevul word.

In tabelle 25a en b word die verskillende oktaëdriese posisies nie onderskei nie en slegs die totaal van M₁+M₂+M₃+M₄ word gegee.

TABEL 25b Mikrosende analyses van Al-antofilliet (a) en gedriet (b) in monsters van die Ortopirokseenisograad (DN. 157, DV. 3) en uit die Ortoamfiboolsone. Die mineralogiese samestelling van gesteentes uit laasgenoemde metamorfe sone word in Tabel 4 gegee

Monster-nommer	^a DV. 53	^a DV. 1	^a DV. 2 ¹	^a DV. 2 ¹	^b DN. 184	^b DN. 157 ¹	^b DN. 157 ¹	^b DV. 3	^b DV. 53	^b DV. 1	^b DV. 43	^b M. 447	^b DV. 47	^b DV. 22 ¹	^b DV. 22 ¹	^b DR. 184
Kolom	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	49,93	49,11	49,44	51,54	46,68	41,65	44,54	42,45	45,53	43,73	45,15	44,28	46,67	46,18	46,34	45,62
Al ₂ O ₃	8,24	10,14	9,74	9,02	11,05	20,58	18,42	20,68	14,11	19,64	15,45	16,06	14,80	14,63	13,87	13,09
TiO ₂	0,18	1,01	0,31	0,35	0,06	0,17	0,19	0,04	0,44	-	0,23	0,46	0,53	0,09	0,08	0,49
MgO	17,84	19,56	20,08	21,03	17,11	16,56	17,37	15,19	15,60	17,76	15,53	15,95	17,04	16,56	16,68	16,17
FeO ^x	19,49	15,58	16,42	16,76	19,72	15,79	16,85	16,53	18,58	13,41	19,87	18,18	19,32	19,77	19,05	19,61
CaO	0,33	0,34	0,42	0,35	0,42	0,21	0,27	0,14	0,37	0,25	0,41	0,37	0,30	0,29	0,34	0,49
MnO	0,25	0,13	0,21	0,20	0,05	0,15	0,15	0,10	0,24	0,14	0,31	0,27	0,31	0,30	0,28	0,06
Na ₂ O	0,60	0,86	0,94	0,81	0,93	2,23	1,81	2,27	1,31	1,76	1,42	1,43	1,38	1,29	1,25	1,00
Cr ₂ O ₃	0,14	0,75	0,49	0,48	0,15	0,06	0,02	0,02	0,26	-	0,17	0,32	0,26	0,17	0,13	0,26
TOTAAL	97,20	97,50	98,04	100,54	96,16	97,41	99,63	97,43	96,50	96,69	98,55	97,32	100,61	99,28	98,03	96,80

Formule bereken op 'n basis van 23 suurstofatome

Si	7,224	7,003	7,014	7,117	6,860	5,977	6,248	6,086	6,652	6,210	6,496	6,419	6,557	6,600	6,660	6,679
Al ^{iv}	0,776	0,997	0,986	0,883	1,140	2,023	1,752	1,914	1,348	1,790	1,504	1,581	1,443	1,400	1,340	1,321
TOTAAL	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Al ^{vi}	0,630	0,708	0,643	0,586	0,774	1,459	1,294	1,581	1,094	1,498	1,117	1,164	1,009	1,065	1,010	0,938
Mg	3,847	4,157	4,246	4,328	3,747	3,542	3,631	3,246	3,397	3,759	3,334	3,446	3,568	3,527	3,573	3,528
Fe	2,358	1,858	1,948	1,936	2,424	1,893	1,977	1,982	2,270	1,593	2,391	2,204	2,270	2,279	2,290	2,401
Ti	0,020	0,108	0,033	0,036	0,007	0,018	0,020	0,004	0,048	-	0,025	0,050	0,056	0,010	0,009	0,054
Cr	0,016	0,085	0,055	0,052	0,017	0,005	0,002	0,002	0,030	-	0,019	0,037	0,029	0,019	0,015	0,030
Ca	0,051	0,042	0,064	0,052	0,066	0,032	0,041	0,022	0,058	0,038	0,063	0,058	0,045	0,044	0,052	0,077
Mn	0,031	0,016	0,025	0,023	0,006	0,018	0,018	0,012	0,030	0,017	0,038	0,033	0,037	0,036	0,034	0,007
Ni	0,047	0,016	-	-	-	0,031	0,017	0,151	0,073	0,095	0,013	0,008	-	0,020	0,017	-
[M ₁ -M ₆]	7,00	7,00	7,01	7,01	7,04	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,01	7,00	7,00	7,04
[Na (A)]	0,177	0,222	0,259	0,217	0,265	0,589	0,475	0,480	0,298	0,390	0,383	0,394	0,376	0,338	0,331	0,284
MgO/FeO	1,631	2,237	2,179	2,236	1,546	1,869	1,837	1,633	1,496	2,360	1,395	1,563	1,572	1,493	1,560	1,469
Mg/(Mg+Fe ⁺²)	0,620	0,691	0,686	0,691	0,607	0,651	0,648	0,621	0,599	0,702	0,582	0,610	0,611	0,599	0,609	0,595

FeO^x Totale yster as FeO.. ^aAl-antofilliet. ^bGedriet.

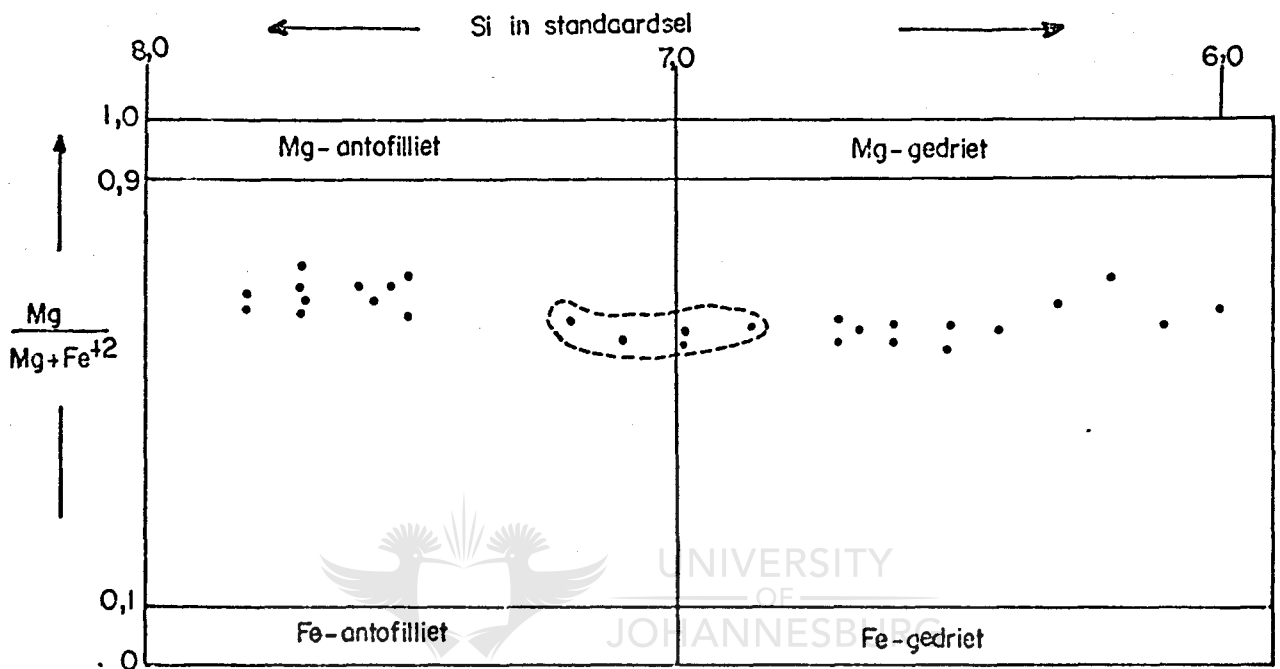
¹Analiese van twee verskillende korrels.

Analitikus: Anglo American Navorsingslaboratorium

Lokalisering vir monsters in Tabel 25b word in Fig. 34 geïllustreer.

1.5.1 Chemiese klassifikasie van ortorombiese amfibool

Die chemiese klassifikasie van ortoamfibool in hierdie ondersoek word in figuur 35 geïllustreer.



Figuur 35 : Klassifikasie van ortoamfibool in die Pelitiese gneis.
Die veld vir Al-antofilliet word met 'n stippellyn aangedui

Die chemiese onderskeid tussen die verskillende ortoamfibole berus op die volgende parameters:

antofilliet	:	$Al^{vi} < 0,5$;	$Si > 7,0$
Al-antofilliet	:	$Al^{vi} > 0,5 < 0,9$;	$Si > 7,0$
gedriet	:	$Al^{iv} > 0,99$;	$Si < 7,0$

Die voorgestelde klassifikasie kan prakties maklik toegepas word alhoewel die onderskeid tussen gedriet en Al-antofilliet in die huidige ondersoek in baie gevalle arbitrêr is. Vir die doeleindes van hierdie ondersoek word al die omlýnde analyses in figuur 35 (en Tabel 25b) as Al-antofilliet beskou.

1.5.2 Struktuurformule van antofilliet en gedriet

Twaalf chemiese analyses vir antofilliet word in tabel 25a gegee. XMg (100 Mg/Mg+Fe⁺²) wissel tussen 63,3 en 73,1 persent, en die Al₂O₃-inhoud wissel tussen 2,23 en 4,89 massapersent. Oktaëdriese aluminium neem toe van 0,257 atome in die mees magnesiumryke antofilliet (XMg = 73,1 monster DV 1) tot 0,312 atome in die mees ysterryke antofilliet (XMg = 63,3 monster DV 43).

Stout (1972) illustreer twee tipes substitusiemeganismes in antofilliet, naamlik 'n nie-gekoppelde 1:1 substitusie van Fe⁺² vir Mg⁺² in antofilliet met XMg groter as 70,4, en 'n gekoppelde MgSi-Al₂ substitusie vir antofilliet met XMg kleiner as 70,4. Hierdie substitusie meganismes kan deur die volgende formule voorgestel word:



Die substitusie van Fe⁺² vir Mg⁺² strek tot die geordende samestelling van Fe₂Mg₅Si₈O₂₂(OH)₂. Die struktuur kan slegs addisionele Fe⁺² opneem indien dit gepaard gaan met 'n toename in oktaëdriese aluminium.

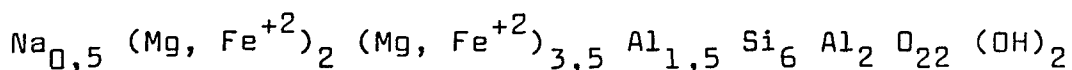
Vyf chemiese analyses vir Al-antofilliet en elf analyses vir gedriet word in tabel 25b gegee. Die Al₂O₃-inhoud wissel onderskeidelik tussen 9,02 en 11,05 massapersent en 13,09 en 20,68 massapersent. XMg vir beide ortoamfibole varieer tussen ongeveer dieselfde grense as in die geval van antofilliet. Antofilliet is egter altyd meer magnesiumryk as samebestaande Al-antofilliet of gedriet.

Die chemiese samestelling van natuurlike gedriet is nie naastenby in ooreenstemming met die ideale natriumvrye formule wat dikwels in die literatuur gegee word nie (Deer e.a., 1963; Ernst, 1968). Die verhouding van Na+K tot tetraëdriese Al is nie 1:1 soos in die geval van 'n edinitiese

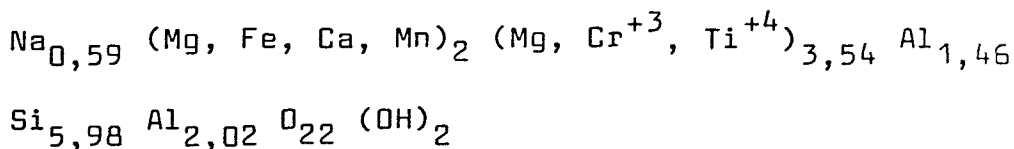
substitusie nie, en ook nie 1:2 soos in die geval van 'n pargasitiese substitusie nie, maar wel baie naby aan 1:4 (Robinson e.a., 1971). Vir elke 0,1 Na-atome per formule eenheid is daar dus 0,4 Al-atome wat Si^{+4} vervang. Die ladingsbalans veroorsaak deur die addisionele 0,3 Al-atome, word voor gekompenseer deur die substitusie van Al^{+3} , Fe^{+3} of Ti^{+4} vir Mg^{+2} en Fe^{+2} in die oktaëdriese posisie. Twee belangrike gekoppelde substitusiemeganismes is dus hier ter sprake:

- (i) die substitusie van Na^{+1} in die andersins vakante A-posisie, gekoppel met die vervanging van Si^{+4} deur Al^{+3} in die T-posisies, en
- (ii) die substitusie van R^{+3} vir R^{+2} (kyk 1.5.3) in die M-posisies gekoppel met die vervanging van Si^{+4} deur Al^{+3} in die T-posisies (kyk p.222).

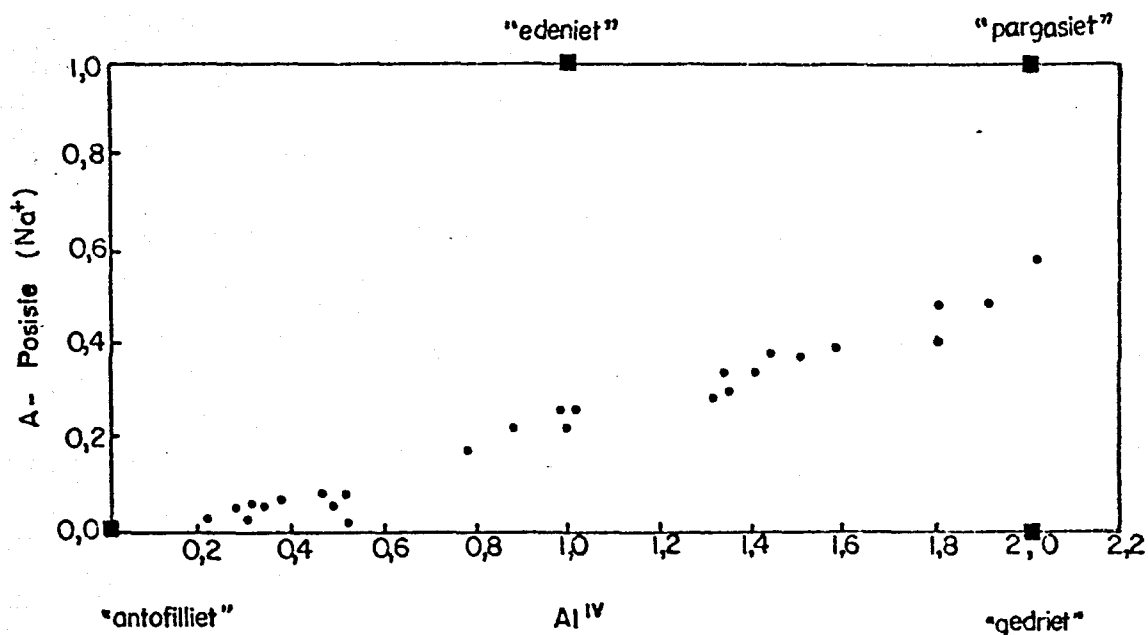
Hierdie gekoppelde substitusiemeganismes gee aanleiding tot die volgende ideale endlidsamestelling van gedriet (Robinson e.a., 1971, p. 1009).



Die chemiese analises van gedriet in die huidige ondersoek is in goeie ooreenstemming met dié van Robinson e.a. (1971). Dit word duidelik geïllustreer indien die gevulde A-posisie in antofilliet en gedriet gestip word teen tetraëdriese Al (Figuur 36). Die verhouding van $\text{Na}:\text{Al}^{iv}$ in hierdie figuur is baie naby aan die teoretiese waarde van 1:4. Die chemiese samestelling van gedriet in monster DR 157 (Tabel 25b) is waarskynlik die mees natriumryke gedriet wat tot dusver in die literatuur beskryf is. Die formule van hierdie mineraal, naamlik:



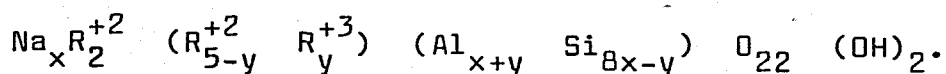
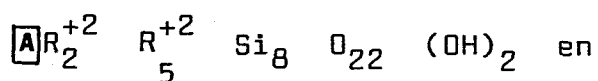
stem goed ooreen met dié van ideale gedriet.



Figuur 36 : Reëlmatige verwantskap tussen die gevulde A-posisie en tetraëdriese aluminium in ortoamfibool van die Pelitiese gneis. Die samestelling van sommige ideale ortoamfibool-endlede word ook aangedui (Robinson e.a., 1971, Fig. 1)

1.5.3 Die antofilliet-gedrietreeks

Die analyses van ortoamfibool in tabelle 25a en b, en die reëlmatige verwantskap van Na⁺ en Al^{iv} (Figuur 36) is in ooreenstemming met Robinson e.a. (1971) se voorstel van die bestaan van 'n vaste oplossingsreeks by hoë temperatuur tussen antofilliet en gedriet met die volgende endlidformules:



Na^+ vul die andersins vakante A-posisie;

$$R^{+2} = \text{Mg, Ni, Fe}^{+2}, \text{Mn en Ca};$$

$$R^{+3} = \text{Al} + \text{Fe}^{+3} + \text{Cr}^{+3} + \left(\text{Ti}^{+4} + R^{+2}\right)_{\frac{1}{2}}$$

x = gevulde A-posisie en

$$y = \text{som van Al}^{iv} + \text{Fe}^{+3} + \text{Cr}^{+3} + 2\text{Ti}^{+4}$$

Die ideale formule van gedriet is 'n aanduiding dat die som van x+y gelyk is aan Al^{iv} . Die verskil tussen x+y en Al^{iv} (die residuele waarde) is 'n aanduiding van analitiese foute of van 'n tipe substitusie wat nie deur die ideale formule beskryf word nie.

Tabel 26 Geïdealiseerde formule vir ortoamfibool gebaseer op die volgende formule
 $\text{Na}_x \text{R}_2^{2+} (\text{R}_5^{2+} \text{R}_y^{3+}) (\text{Al}_{x+y} \text{Si}_{8-x-y}) \text{O}_{22} (\text{OH})_2$. x = gevulde A-posisie en y =
 oktaedriese $\text{Al}^{3+} + \text{Cr}^{3+} + 2\text{Ti}^{4+}$

Monster- nommer		(1) x	(2) y	(3) x+y	(4) Al^{iv}	(5) $(x+y) - \text{Al}^{iv}$ (Res. waarde)	(6) x/Al^{iv}	(7) $x/(x+y)$
DV. 38	(Antof)	0,080	0,243	0,323	0,463	- 0,140	0,173	0,248
DV. 34	(Antof)	0,045	0,253	0,298	0,277	0,021	0,163	0,151
DR. 157	(gedriet)	0,589	1,500	2,089	2,023	0,066	0,291	0,282
DR. 157	(Antof)	0,060	0,176	0,236	0,369	- 0,133	0,163	0,254
DV. 3	(gedriet)	0,480	1,591	2,071	1,914	0,157	0,251	0,232
DV. 3	(Antof)	0,047	0,145	0,192	0,296	- 0,104	0,159	0,245
EV. 53	(Al-Antof)	0,177	0,686	0,863	0,776	0,087	0,228	0,205
DV. 53	(gedriet)	0,298	1,220	1,518	1,348	0,170	0,221	0,196
DV. 1	(Antof)	0,028	0,318	0,346	0,302	0,044	0,093	0,081
DV. 1	(Al-Antof)	0,222	1,009	1,231	0,997	0,234	0,223	0,180
DV. 1	(gedriet)	0,390	1,498	1,888	1,790	0,095	0,218	0,207
DV. 2	(Al-Antof)	0,259	0,764	1,023	0,986	0,037	0,263	0,253
DV. 43	(Antof)	0,106	0,352	0,458	0,520	- 0,062	0,204	0,231
DV. 43	(gedriet)	0,383	1,186	1,569	1,504	0,065	0,255	0,244
M. 447	(gedriet)	0,394	1,200	1,594	1,581	0,013	0,249	0,247
DV. 47	(gedriet)	0,376	1,150	1,526	1,443	0,083	0,261	0,246
DV. 23	(Antof)	0,051	0,206	0,257	0,325	- 0,068	0,157	0,198
DV. 22	(Antof)	0,057	0,278	0,335	0,387	- 0,052	0,147	0,170
DV. 22	(gedriet)	0,338	1,104	1,442	1,400	0,042	0,234	0,241
DV. 26	(Antof)	0,033	0,162	0,195	0,212	- 0,017	0,156	0,169
DR. 184	(Al-Antof)	0,265	0,805	1,070	1,140	- 0,070	0,233	0,248
DR. 184	(gedriet)	0,284	1,076	1,360	1,321	0,039	0,215	0,209

Die ideale formule van gedriet word in tabel 26 vergelyk met twee en twintig ortoamfiboolanalises in die huidige ondersoek. Die residuele waardes in hierdie tabel is oor die algemeen klein en wissel vanaf positief tot negatief. 'n Positiewe residuele waarde mag 'n aanduiding wees van addisionele gloukofaan - of richteriet-tipe substitusies, of analitiese foute, terwyl 'n negatiewe residuele waarde moontlik toegeskryf kan word aan 'n foutiewe aanname (in die geval van mikrosondeanalises) dat al die yster as Fe^{+2} teenwoordig is. Uit tabel 26 is dit duidelik dat slegs antofilliet 'n negatiewe residuele waarde besit. Die aanname dat al die yster as Fe^{+2} teenwoordig is, is dus moontlik nie heeltemal geldig in die geval van antofilliet nie. Dit word ook geïllustreer deur die waarneming dat die gevulde oktaëdriese posisies in antofilliet (Tabel 25a) effens groter is as die ideale 7. Die gevulde oktaëdriese posisies in gedriet en Al-antofilliet (Tabel 25b) is egter gelyk aan 7 en daar kan gevolglik aanvaar word dat laasgenoemde twee minerale geen of baie min Fe^{+3} bevat. Hierdie gevolgtrekking is nie in ooreenstemming met die literatuur nie. Volgens Lal en Moorehouse (1969) kan tot 25 persent van die totale yster in gedriet in die ferri-toestand wees terwyl antofilliet (Deer e.a., 1963) weer geen of baie min Fe_2O_3 bevat.

1.5.4 Ontmengingslamelle in ortoamfibool

Ontmengingsverskynsels in ortoamfibool is reeds by verskeie geleenthede in die literatuur beskryf (Robinson e.a., 1969c; Ross e.a., 1969; Robinson e.a., 1971). Die teenwoordigheid van ontmengingslamelle is oorspronklik in enkelkristal-diffraksieopnames waargeneem (Ross e.a., 1969) en is later ook opties bevestig as mikroskopiese of submikroskopiese lamelle van antofilliet en gedriet wat parallel aan die (010) kristallografiese rigting in ortoamfibool ontwikkel. Hierdie verskynsel kan egter nie altyd opties waargeneem word

nie (Robinson e.a., 1971, p. 1026).

In die huidige ondersoek is ontmengingslamelle in enkele monsters eers na 'n deeglike petrografiese ondersoek onder 'n 40 X vergroting waargeneem. Die identifikasie van die lamelle word ook bemoeilik aangesien die verskynsel slegs in snedes loodreg tot die kristallografiese c-as waargeneem kan word. Die beste voorbeelde van ontmengingslamelle in ortoamfibool kan in monsters DV 43 en DV 54 (Fig. 37) waargeneem word. Bogenoemde monsters bevat al drie verskillende ortoamfibole en die ontmengingslamelle kon in almal waargeneem word. Dit is in teenstelling met die voorstel (Robinson e.a., 1971, p. 1029) dat ontmengingslamelle beperk is tot die mees Al-ryke ortoamfibole. Tekens van ontmenging is verder ook waargeneem in monsters DV 22, DV 23 en M 447. Die lamelle is hier egter baie swak ontwikkel en is ook nie deurlopend nie.



Figuur 37 : Mikrofoto wat ontmengingslamella parallel aan die (010) kristallografiese rigting van gedriet aandui (DR.53). Die snit is loodreg tot die C-as. Hierdie ontmengingslamella is identies aan dié wat deur Robinson e.a. (1971, Fig. 12) beskryf word

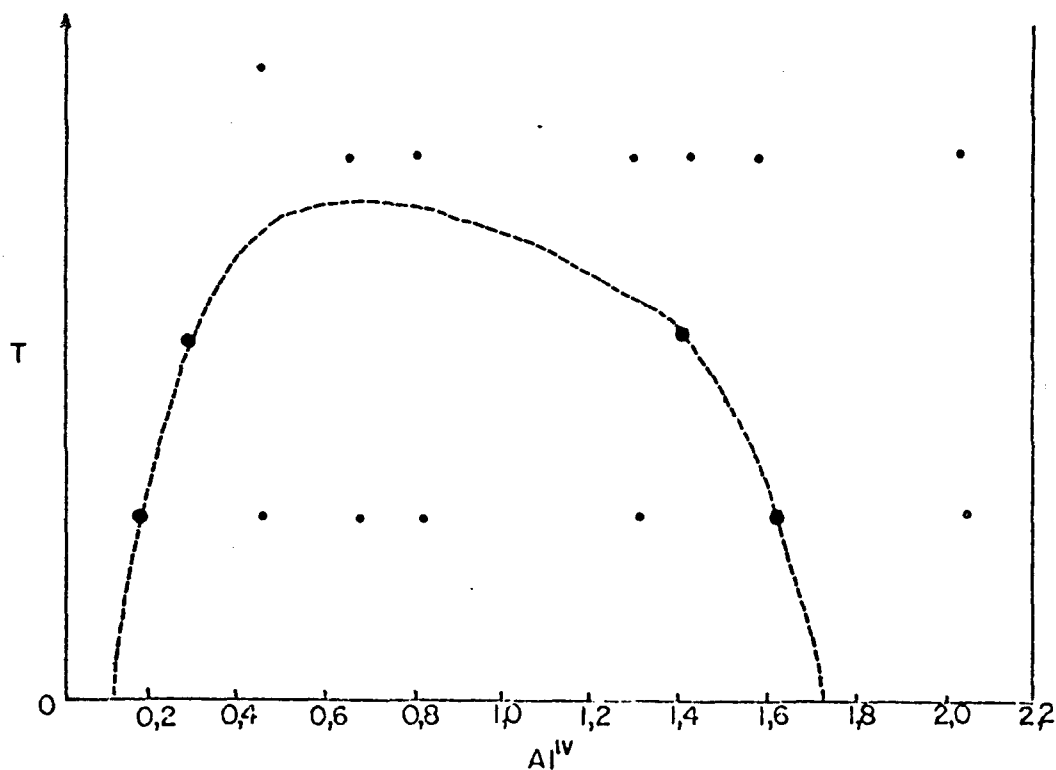
Komplekse vergroeiingsteksture in amfibole word in die literatuur op verskillende wyses geïnterpreteer (Ross e.a. 1969):

- (i) primêre vergroeiing van een amfibool met 'n ander;
- (ii) vervanging van een amfibool deur 'n ander;
- (iii) vergroeiing van een amfibool met 'n ander;
- (iv) ontmenging van twee amfibole uit 'n homogene primêre amfibool.

Die "vergroeiingsteksture" in figuur 37 kan moeilik aan die hand van die eerste drie moontlikhede verklaar word. Hierdie teksture is in die eerste plek in alle opsigte identies aan dié wat deur Robinson e.a. (1971, Fig. 12) as ontmengingslamelle geïdentifiseer is. Die konstante samestelling van verskillende korrels van antofilliet in monster DV 23, en van gedriet in monster M 447, kan tweedens ook nie met die eerste drie moontlikhede vereenselwig word nie.

1.5.5 Die antofilliet-gedrietsolvus

Die teenwoordigheid van ontmengingslamelle in ortoamfibool is 'n aanduiding van die bestaan van 'n ontmengingsveld in die antofilliet-gedrietreeks. Antofilliet en gedriet vorm dus 'n volledige vaste oplossingsreeks by hoë temperature. Met afkoeling vind ontmenging plaas met die ontwikkeling van 'n mikroskopiese vergroeiing tussen antofilliet en gedriet. By temperature benede die solvus kan antofilliet en gedriet dus saam voorkom as primêre en fisies diskrete fases wat geen tekens van ontmenging vertoon nie. Laasgenoemde voorkomsyde van antofilliet en gedriet word in suidelike Noorweë deur Stout (1971) beskryf.



Figuur 38 : Tentatiewe temperatuur-samestellingsdiagram vir die antofilliet-gedrietreels (Robinson e.a., 1971, Fig. 15). Boonste simbole verteenwoordig primêre homogene antofilliet of gedriet (Robinson e.a.). Middelste simbole verteenwoordig primêre samebestaande antofilliet en gedriet (Stout, 1971, 1972). Onderste simbole verteenwoordig sekondêre ontmengingslamella in ortoamfibool (Robinson e.a.)

'n Hoogs spekulatiewe temperatuur-samestellingsdiagram vir die antofilliet-gedrietreels word in figuur 38 geïllustreer (Robinson e.a., 1971, Fig. 15). Die konstruksie van hierdie figuur is gebaseer op (beperkte) inligting van monsters uit die sillimanietzone van suidwes New Hampshire en Massachusetts (Robinson en Jaffe, 1969a en b) en suidelike Noorweë (Stout, 1971). Beide die temperatuurskaal en die vorm van die solvus in hierdie figuur is onseker. Die rede hiervoor is eerstens die gebrek aan kwantitatiewe inligting in verband met die relatiewe PT-toestande in bogenoemde twee metamorfe terreine, en tweedens die gebrek aan voldoende petrografiese en chemiese inligting. 'n Temperatuur-samestellingsdiagram kan slegs kwantitatief wees indien so 'n diagram gebaseer is op monsters wat ver-

teenwoordigend is van die hele samestellingsspektrum en PT-interval waarin antofilliet en gedriet stabiel is.

1.5.6 Samebestaande ortoamfibole in die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie

Die teenwoordigheid van 'n primêre ontmengingsveld in die vaste-oplossingsreeks tussen antofilliet en gedriet vorm 'n basis vir die studie van samebestaande ortoamfibole in die huidige ondersoek. Die ewewigsaspekte van hierdie versamelings word in die res van hierdie bespreking uit beide 'n petrografiese en chemiese oogpunt beskou.

Die petrografiese ondersoek van ewewig word bemoeilik as gevolg van die probleme gekoppel aan die optiese onderskeid tussen antofilliet en gedriet. Gedriet word in die algemeen gekenmerk deur 'n meer intense pleochroïsme as antofilliet, maar hierdie onderskeid kan soms twyfelagtig wees indien die twee minerale nie gelyktydig onder die gesigsveld beskou word nie. Die optiese assehoek van antofilliet, Al-antofilliet en gedriet verskil ook baie min en wissel vanaf $2V_z = \pm 74^\circ$ in die geval van antofilliet, tot $2V_z = \pm 81^\circ$ in die geval van gedriet. Al-antofilliet kan natuurlik glad nie opties van gedriet (of antofilliet) onderskei word nie.

Vir die doeleindes van die chemiese ondersoek is gebruik gemaak van subtiele verskille in beide pleochroïsme en dubbelbreking in 'n poging om verteenwoordigende mikrosonde analyses van die verskillende fases in dieselfde gesteentes te verkry. Hierdie metode was redelik suksesvol en het die teenwoordigheid van samebestaande ortoamfibole sonder twyfel in sewe van die veertien monsters bevestig. In die geval van monsters DV 34 en DV 38 kan daar met 'n redelike mate van sekerheid aanvaar word dat slegs antofilliet aanwesig is. In die res van die monsters mag die teenwoordigheid

van slegs een ortoamfibool moontlik 'n weerspieëling wees van onvoldoende mikrosondeanalises. Die resultate van hierdie ondersoek word in tabel 27 opgesom.

Tabel 27 Samebestaende ortoamfibool in monsters van die ortoamfiboolgneis

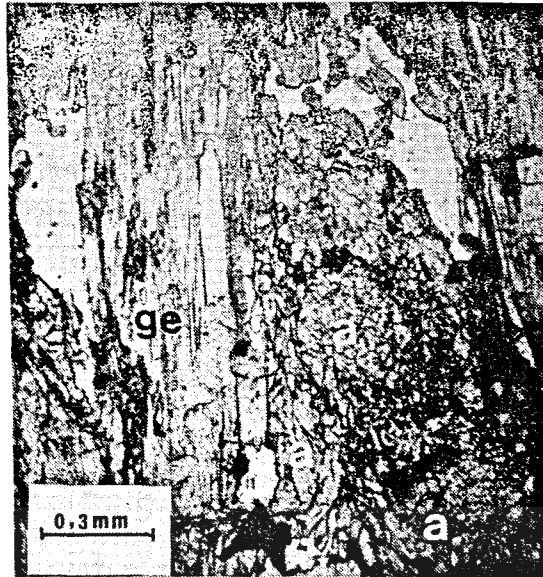
Tipe ortoamfibool	Gesteente
antofilliet	DV. 38, DV. 34, DV. 23, DV. 26
gedriet	DV. 47 en M. 447
Al-antofilliet	DV. 2
antofilliet+gedriet	DV. 3, DR. 157, DV. 43 en DV. 22
Al-antofilliet+gedriet	DV. 53 en DR. 184
antofilliet+Al-antofilliet+gedriet	DV. 1

Die inligting uit bogenoemde tabel is 'n aanduiding dat antofilliet en gedriet die mees algemene assosiasie vorm en dat al drie verskillende ortoamfibole tot een monster beperk is. Die monster (DV 1) word gekenmerk deur groot kristalle van antofilliet en Al-ryke antofilliet terwyl gedriet beperk is tot fynkorrelrige vergroeiings met relikte van kordiëriet. Gedriet is in kontak met antofilliet maar dit is twyfelagtig of al drie minerale in kontak met mekaar is. Hierdie monster word nie verder bespreek nie.

1.5.6.1 Petrografiese aspekte van samebestaende ortoamfibole

Die teenwoordigheid van meer as een tipe ortoamfibool in dieselfde gesteente is natuurlik nie 'n aanduiding dat hierdie minerale vanselfsprekend ook onderling in ewewig is met mekaar nie. Die basiese vereiste vir 'n ewewigsversameling is dat die verskillende minerale, wat as deel van hierdie versameling beskou word, in direkte kontak met mekaar moet wees sonder enige opvallende tekens van reaksie.

Die probleem gekoppel aan die positiewe optiese identifikasie van die verskillende ortoamfibole is reeds bespreek. Die volgende inligting is egter 'n goeie aanduiding dat die verskillende mineraalversamelings in tabel 27 wel in teksturele ewewig is.



Figuur 39 : Samebestaande antofilliet (a) en gedriet (ge) in die ortoamfiboolgneis van die Ortoamfiboolsone

Die chemiese identifikasie van die verskillende ortoamfibole in dieselfde gesteentes is in die eerste plek gebaseer op subtiele verskille in die optiese eienskappe van die betrokke minerale. Vir die doeleindes van die chemiese identifikasie van die verskillende minerale is die mees opvallende optiese verskille egter as 'n basis geneem met die gevolg dat die verskillende ortoamfibole nie altyd direk in kontak met mekaar geanaliseer is nie. Die voorstel dat veral antofilliet en gedriet algemeen in kontak met mekaar is, is egter redelik indien die goeie korrelasie tussen die optiese identifikasie en daaropvolgende chemiese bevestiging in ag geneem word. Die teenwoordigheid van kontakversamelings kan egter chemies sonder enige twyfel in die geval van monster DV 22 bewys word. Hierdie monster bevat min of meer gelyke hoeveelhede antofilliet en gedriet wat beide as groot en goed gevormde primatiese kristalle algemeen in kontak met mekaar is. Die reëlmatige en skoon korrelgrensverwantskappe word duidelik in figuur 39 geïllustreer.

1.5.6.2 Chemiese aspekte van samebestaande Ortoamfibole

Hierdie ondersoek word beperk deur onvoldoende mikrosonde-analises. Geen poging is byvoorbeeld aangewend om moontlike variasies in die samestelling van individuele kristalle te ondersoek nie, en die bespreking wat volg het slegs toepassing op variasies in die samestelling van een kristal na 'n ander. In baie gevalle is voldoende inligting ook slegs van toepassing op een van die twee samebestaande fases. Nieteenstaande bogenoemde beperkings is dit tog belangrik om die beskikbare inligting in redelike detail te bespreek, veral gesien in die lig van die beperkte inligting wat uit die literatuur beskikbaar is in verband met samebestaande ortoamfibole. Die resultate van hierdie ondersoek word in tabel 28 gegee.

Tabel 28 Variasie in die samestelling van verskillende ortoamfiboolkorrels in dieselfde monster. Waardes word as massapersentasie gegee.

		Al ₂ O ₃	MgO	FeO	Na ₂ O
A. Ortopirokseenisograad					
DV. 34	antofilliet	3,03	20,93	18,25	0,22
		2,68	21,12	18,70	0,16
DR. 157	a. antofilliet	3,15	22,72	17,96	0,22
		3,56	23,43	17,57	0,27
	b. gedriet	20,65	16,56	15,79	2,23
		18,42	17,37	16,85	1,81
B. Ortoamfiboolzone					
DV. 2	Al-antofilliet	9,74	20,08	16,42	0,94
		9,02	21,03	16,76	0,81
DV. 22	gedriet	14,63	16,56	19,77	1,29
		13,87	16,68	19,05	1,25
DR. 184	Al-antofilliet	11,05	17,11	19,72	0,93
	gedriet	13,03	16,17	19,61	1,00
DV. 26	antofilliet	2,23	21,61	18,59	0,12
		4,55	20,89	18,55	0,39

Ortorombiese amfibool het geen opvallende tekens van variasie in samestelling in ses van die veertien monsters wat ondersoek is vertoon nie (monsters DV 38, DV 3, DV 53, M 447, DV 47 en DV 23). In ses van die agt oorblywende monsters word opvallende verskille in samestelling van een korrel na 'n ander deur een of albei fases geïllustreer.

Hierdie inligting word in tabel 28 opgesom.

Die waargenome variasie in die samestelling van samebestaan-
de ortoamfibole in tabel 28 is moontlik 'n aanduiding van
afwykings vanaf chemiese ewewig. Die chemiese inligting is
dus nie heeltemal in ooreenstemming met die petrografiese
inligting nie. Die vraag is dus of hierdie variasies in
chemiese samestelling die gevolg is van 'n gebrek aan
chemiese ewewig tydens primêre kristallasie, en of die
resultate moontlik ook aan die hand van 'n ander model ver-
klaar kan word.

Die eerste verskyning van antofilliet en gedriet langs die
Ortopirokseenreaksie-isograad (monsters DV 34, DV 38, DV 3
en DR 157) kan sonder enige twyfel gekoppel word aan die
hidrasie van kordiëriet en hipersteen tydens die laaste
waarneembare (M_3) periode van metamorfose (Afd. IV-1.2.2,
en Tabel 6). Hierdie monsters word gekenmerk deur die
teenwoordigheid van hipersteen+antofilliet of hipersteen+
antofilliet+kordiëriet+gedriet. Ortoamfibool in twee van
hierdie monsters (DV 34 en DR 157, Tabel 28) toon opvallende
variasies in samestelling van een korrel na 'n ander. Hier-
die waarneming is dus moontlik 'n aanduiding van tekens van
afwyking vanaf chemiese ewewig tydens primêre kristallasie.
So 'n voorstel word egter moeilik in verband gebring met
die waarneming dat antofilliet in monster DV 38, wat van
dieselfde dagsoom as monster DV 34 afkomstig is, geen
variasie in samestelling vertoon nie. Voorstelle vir
betekenisvolle afwyking vanaf ewewig tydens primêre kristal-
lissie word egter nog moeiliker in verband gebring met die
goed gedefinieerde karakter van hierdie isograad.

Die twee geanaliseerde ortoamfibole in monster DR 184 uit
die Ortoamfiboolsonne (Tabel 28) vertoon die mees opvallende
verskille in samestelling nieteenstaande die feit dat die
twee minerale duidelik in teksturele ewewig is (Fig. 10a).
Die variasie in samestelling van een korrel na 'n ander in
die res van die gesteentes uit hierdie metamorfe sone is oor

die algemeen egter klein (Tabel 28).

Uit bogenoemde bespreking lyk dit nie asof die waargenome variasies in die samestelling van ortoamfibool gekoppel kan word aan enige grootskaalse afwykings vanaf chemiese ewewig nie. Hierdie voorstel word ondersteun deur die konstante samestelling van ortoamfibool in ses van die veertien monsters.

1.5.6.3 Bespreking

Die ewewigsaspekte van samebestaande ortoamfibole in die Pelitiese gneis is in die vorige afdeling uit beide 'n petrografiese en chemiese oogpunt ondersoek en die gevolgtrekking is gemaak dat samebestaande antofilliet+gedriet wel moontlik as 'n ewewigsversameling beskou kan word.

Bogenoemde gevolgtrekking is veral van toepassing op monsters uit die Ortoamfiboolzone. Die teenwoordigheid van antofilliet en gedriet in dieselfde monsters langs die Ortopirokseenisograad skep egter in hierdie opsig 'n probleem. Die petrografiese ondersoek van samebestaande ortoamfibole in hierdie gesteentes word grootliks beperk deur die fynkorrelrige voorkoms van die minerale (Fig. 14a) en die komplekse geassosieerde teksture van die gesteentes (Fig. 14c en d). Daar bestaan egter geen twyfel dat antofilliet en gedriet wel saam as diskrete en primêre fases in hierdie gesteentes ontwikkel het as gevolg van die hidrasie van hipersteen en kordiëriet tydens M_3 nie. Indien daar egter aanvaar word dat hierdie twee minerale ook in ewewig met mekaar is volg dit logies dat beide minerale as primêre fases benede die solvus in figuur 38 gekristalliseer het. So 'n voorstel is egter nie in ooreenstemming met die inligting op grond waarvan die posisie van die solvus in die antofilliet-gedrietreeks opgestel is nie (Robinson e.a., 1971). Die ortoamfibole wat in hierdie figuur as homogene

mengkristalle bokant die solvus gestip is verteenwoordig monsters wat tot die amfibolietfasies behoort. Die PT-toestande waaronder hierdie homogene mengkristalle gekristalliseer het behoort dus laer te wees as die ooreenstemmende fisiese toestande langs die Ortopirokseenisograad in die geval van die huidige ondersoek. Dit is so omdat samebestaande antofilliet en gedriet in laasgenoemde monsters verteenwoordigend is van die maksimum PT-toestande waaronder ortoamfibole in natuurlike gesteentes stabiel is. Figuur 38 is dus of nie korrek nie, of antofilliet en gedriet is nie langs die isograad in ewewig met mekaar nie. Eersgenoemde moontlikheid kan nie verder ondersoek word nie. Daar is egter reeds genoem dat figuur 38 hoogs spekulatief is en op beperkte inligting gebaseer is. Die tweede moontlikheid, naamlik dat antofilliet en gedriet nie 'n ewewigsversameling verteenwoordig nie is ook onwaarskynlik indien die goed gedefinieerde karakter van die Ortopirokseenisograad in aanmerking geneem word. Die moontlikheid bestaan egter dat die samestelling van ortoamfibool langs hierdie isograad deur 'n lokale ewewigsmodel tydens primêre kristallasie beheer is (Zen, 1963; Osberg, 1971).

Na aanleiding van hierdie lokale ewewigsmodel kan die samestelling van kontakversamelings van een beperkte domain in 'n gesteente na 'n ander verskil as gevolg van beperkte en onvolledige chemiese uitruiling oor groter volumes. Dit is verder ook na aanleiding van hierdie model moontlik dat slegs die randsamestellings van die individuele minerale in ewewig is, en dat die variasie in samestelling beperk is tot die interne samestelling van die betrokke minerale (Hess, 1971; Chinner en Fox, 1974).

Die primêre ontwikkeling van antofilliet en gedriet in dieselfde gesteentes langs die Ortopirokseenisograad is in goeie ooreenstemming met 'n model vir lokale chemiese ewewig. Die twee betrokke hidrasiereaksies vind waarskynlik onafhanklik van mekaar plaas (Afd. IV-1.2.2), en dit is dus moontlik dat die ontwikkeling van antofilliet en gedriet in hierdie

gesteentes, tydens die derde (M_3) periode van metamorfose, beheer is deur lokale mikroskopiese omgewings wat grootliks in aluminium- en natriuminhoud verskil het.

Die teenwoordigheid van grofkorrelrige samebestaande antofiliet en gedriet (Fig. 39) in gesteentes van die Ortoamfiboolsonne is 'n bewys dat hierdie twee minerale as diskrete primêre fases benede die solvus in die antofiliet-gedrietreeks gekristalliseer het. Die PT-toestande van kristallisasie was waarskynlik laer as in die geval van die Ortopirokseenisograad. Die teenwoordigheid van ontmengingslamelle in ortoamfibool van die Ortoamfiboolsonne (Fig. 37) is 'n aanduiding dat ontmenging op 'n latere stadium en by 'n laer temperatuur plaasgevind het (Robinson e.a., 1971, p. 1033). Die ewewigsaspekte van samebestaande ortoamfibole word in latere afdelings (Afd. VII-2.1.3.1 en X-3) uit 'n meer kwantitatiewe oogpunt ondersoek.

1.6 ALUMINIUMSILIKATE



Aluminiumsilikate (sillimaniet en kianiet) is nie kenmerkende minerale van die Ortopirokseensone nie. Sillimaniet in hierdie metamorfe sone is beperk tot 'n bykomstige mineraal in die Leukokratiese graniet wat met die granaat-granoliet geassosieer is (Afd. II-2.3). Kianiet is in klein hoeveelhede in die kordiërietryke granoliete teenwoordig waarin dit as klein kristalle vergroei is met biotiet (Fig. 9b). Die mineraal is met behulp van X-straalmetodes geïdentifiseer. Kianiet is egter soms 'n algemene bestanddeel in die ortoamfiboolgneis van die Ortoamfiboolsonne. Die mineraal kom voor as klein stomp kristalle geassosieer met ortoamfibool en is ook baie algemeen met hierdie mineraal vergroei. In enkele monsters kom kianiet in redelike groot hoeveelhede as meer grofkorrelrige kristalle voor (Fig. 10c). Die teenwoordigheid van kianiet in die Ortoamfiboolgneis kan gekoppel word aan die reaksie waarin kordiëriet langs

die Ortopirokseenisograad hidreer om gedriet en kianiet te vorm (Fig. 14).

Sillimaniet is slegs in een monster in die Ortoamfiboolsone geïdentifiseer (Tabel 4). Hierdie monster (DV 45) word ook gekenmerk deur die teenwoordigheid van kordiëriet wat koronas om granaat vorm. Die sillimaniet kom as insluit-sels in kordiëriet in hierdie koronas voor.

TABEL 29 Mikrosonde analyses vir kianiet en sillimaniet (DV.45) in die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie

Monster- nommer	DV.11 ¹	DR.157 ²	DV.43 ³	DV.26 ³	DV.45
Kolom	1	2	3	4	5
SiO ₂	34,90	41,52	36,88	36,85	36,94
Al ₂ O ₃	60,52	55,53	62,21	60,04	60,83
MgO	0,32	0,04	-	0,35	0,01
FeO ^x	1,16	0,34	0,20	0,46	0,33
CaO	-	0,02	-	-	-
K ₂ O	0,02	-	0,01	0,06	0,01
Na ₂ O	0,06	-	-	-	-
Cr ₂ O ₃	0,82	0,07	0,01	-	0,48
TOTAAL	97,80	97,53	99,31	97,76	98,59

Formule bereken op 'n basis van 20 suurstofatome

Si	3,893	4,570	4,010	4,076	4,052
Al	7,958	7,206	7,974	7,829	7,867
Mg	0,053	0,007	-	0,058	0,002
Fe	0,108	0,031	0,018	0,043	0,030
Ca	-	0,002	-	-	-
Na	0,013	-	-	-	-
K	0,003	-	0,001	0,009	0,001
Cr	0,072	0,006	0,001	-	0,042
TOTAAL	8,207	7,252	7,994	7,939	7,942

FeO^x Yster as totale FeO

¹Kordieriet-granaatgranoliet (Ortopirokseensone)

²Kordieriet-granaatgranoliet (Ortopirokseenisograad)

³Ortoamfiboolgneis (Ortoamfiboolsone)

Analitikus : Anglo American Navorsingslaboratorium

Lokalisering vir monsters in Tabel 29 word in Fig. 34 geïllustreer.

Vier chemiese analises vir kianiet en een analise vir sillimaniet word in tabel 29 gegee. Die minerale is suiwer aluminiumsilikate en bevat slegs klein hoeveelhede Mg^{+2} , Fe^{+2} en Cr^{+3} .

1.7 SPINEL

Groen spinel is 'n bykomstige mineraal in die kordiërietryke granoliete van die Ortopirokseensone. Die mineraal kom voor as druppelvormige insluitels in kordiëriet en is verder slegs in kontak met biotiet en kianiet. Enkele klein insluitels van spinel in plagioklaas is ook in monster R 9 waargeneem. Hierdie monster bevat geen kordiëriet nie en bestaan slegs uit hipersteen, biotiet en plagioklaas. Die voorkoms van spinel is dus beperk tot gesteentes van die Ortopirokseensone en is ook nie in monsters langs die Ortopirokseenisograad waargeneem nie.

Gedeeltelike chemiese analises vir spinel in drie monsters word in tabel 30 gegee. Die mineraal bevat redelike groot hoeveelhede chroom (tot 6,84 massapersent) en kan as 'n Cr-ryke hersiniet beskryf word. Spinel in die hipersteen-biotietgranoliet is opvallend meer magnesiumryk as dié in die kordiërietryke granoliete. Hierdie waarneming is in ooreenstemming met die magnesiumryke karakter van monster R 9 (Tabel 7b) en ook van die geassosieerde hipersteen en biotiet (Tabelle 18 en 20b).

Die twee analises van spinel in monster DR 19 is van twee insluitels in twee verskillende korona-assosiasies. Die redelike groot verskille in hierdie twee analises is nie duidelik nie. Die geassosieerde kordiëriet verskil egter nie in samestelling nie en dit is dus moontlik dat spinel nie heeltemal in ewewig met kordiëriet is nie. Tekens van nie-ewewig kon egter nie petrografies waargeneem word nie. Die beperkte chemiese inligting laat egter nie 'n volledige

ondersoek van die ewewigsverwantskappe van spinel toe
nie.

TABEL 30 Mikrosonde analyses van spinel in die
kordieriet-granaatgranoliet (DR.19) en
die granaatvrye kordierietgranoliet (DR.10)

Monster- nommer	DR. 19 ²	DR. 19 ²	DR. 10
Kolom	1	2	3
A ₁ 2O ₃	57,25	53,31	52,45
MgO	7,78	6,54	7,24
FeO ^x	26,60	28,66	28,09
CaO	0,03	0,03	-
Na ₂ O	0,01	0,01	0,07
Cr ₂ O ₃	1,66	4,94	6,84
TOTAAL	93,33	93,49	94,68

Formule bereken op 'n basis van 32 suurstofatome

Al	15,754	15,020	14,634
Cr	0,306	0,933	1,280
TOTAAL	16,06	15,953	15,914
MgO	2,707	2,330	2,554
FeO	5,193	5,729	5,560
CaO	0,008	0,008	-
Na ₂ O	0,005	0,005	0,032
TOTAAL	7,913	8,072	8,146

FeO^x Yster as Totale FeO

¹ en ² Analises van twee korrels in twee verskillende
koronateksture.

Analitikus : Anglo American Navorsingslaboratorium

Lokaliteite vir monsters in Tabel 30 word in Fig. 22
geïllustreer.

1.8 VELDSPAAT

Plagioklaas is die enigste veldspaat wat algemeen teenwoor-
dig is in al die monsters van die Pelitiese gneis wat
ondersoek is. K-veldspaat, daarenteen, het 'n baie beperkte
voorkoms en kon slegs geïdentifiseer word in monsters van
die kordieriet-granaatgranoliet. Die res van die gesteentes,

TABEL 31a Mikrosonde analyses van plagioklaas in die kordieriet-granaatgranoliete, granaatvrye-kordierietgranoliet (DR.42-1) en die kordierietvrye granaatgranoliet (DR.42-2)

Monster- nommer	DR.19	DR.54	DR.59	DR.73	M.X.	M.309	M.333	DV.11	R.16	DR.42-1	DR.42-2
Kolom	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	62,55	60,29	60,64	60,70	61,93	59,78	62,08	59,78	63,12	60,59	59,23
Al ₂ O ₃	23,26	24,17	24,06	24,16	24,74	25,05	23,53	24,89	24,18	24,42	25,63
MgO	-	-	-	0,01	-	-	-	-	-	-	-
FeO	-	0,01	0,01	0,01	-	-	-	-	-	-	-
CaO	4,79	5,76	6,03	6,05	6,76	6,94	5,10	6,51	6,07	6,38	7,77
MnO	-	0,03	0,01	-	-	0,01	-	-	0,01	-	0,01
Na ₂ O	9,42	6,49	8,13	8,59	7,88	7,63	8,62	8,26	8,14	8,29	8,07
K ₂ O	0,18	0,45	0,44	0,35	0,14	0,26	0,28	0,26	0,51	0,17	0,25
TOTAAL	100,20	99,20	99,33	99,88	101,46	99,68	99,61	99,72	102,04	99,84	100,96

Formule bereken op 'n basis van 32 suurstofatome

Si	11,082	10,836	10,873	10,840	10,854	10,695	11,051	10,702	10,944	10,811	10,524
Al	4,859	5,121	5,089	5,087	5,112	5,283	4,938	5,253	4,965	5,137	5,369
Mg	-	-	-	0,003	-	-	-	-	-	-	-
Fe	-	0,002	0,002	0,002	-	-	-	-	-	-	-
Ca	0,909	1,109	1,159	1,158	1,270	1,310	0,973	1,249	1,133	1,220	1,479
K	0,041	0,103	0,101	0,080	0,031	0,059	0,064	0,066	0,113	0,039	0,057
Na ₂ O	3,236	2,959	2,827	2,975	2,678	2,647	2,975	2,867	2,749	2,868	2,780
MnO	-	0,005	0,002	-	-	0,002	-	-	0,002	-	0,002
Ab	77,30	69,50	69,17	70,62	67,30	65,59	74,15	68,56	68,81	69,49	64,40
An	21,72	29,60	28,36	27,49	31,92	32,25	24,25	29,87	28,37	29,56	34,30
Or	0,98	0,90	2,47	1,90	0,78	1,46	1,60	1,58	2,83	0,95	1,32

Analitykus : Anglo American Navorsingslaboratorium



UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG

TABEL 31b Mikrosonde analyses van plagioklaas in die Pelitiese gneis langs die Oropirokese-siggraad (DV.38-DV.156) en in die Ortoamfiboolzone. Die mineralogiese samestelling van die ortoamfiboolgneise word in Tabel 4 gegee.

Monster- nommer	DV.38	DV.34	DR.157	DV.3	DR.150	DR.156	DV.53	DV.1	DV.2	DV.43	M.447	DV.47	DV.23	DV.22
Kolom	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO ₂	59,32	59,85	60,29	59,10	61,64	60,39	61,06	59,90	60,70	59,76	60,31	62,45	61,83	59,76
Al ₂ O ₃	25,15	24,57	24,64	25,44	23,80	24,75	24,42	25,56	25,81	25,06	24,94	24,57	24,94	24,87
MgO	-	-	-	-	0,01	-	0,01	-	-	-	-	-	-	-
FeO ^x	-	0,03	0,04	-	-	0,11	0,02	-	-	-	-	-	-	-
CaO	6,80	6,35	6,16	6,78	5,37	6,33	5,77	7,31	7,93	6,45	6,44	6,44	7,65	6,71
MnO	-	-	0,01	-	0,01	-	-	0,01	-	-	-	-	-	0,02
Na ₂ O	8,12	8,20	8,22	8,09	8,95	8,50	8,87	7,78	7,23	8,37	8,65	8,10	7,99	8,01
K ₂ O	0,12	0,06	0,08	0,08	0,14	0,05	0,22	0,06	0,07	0,06	0,09	0,09	0,07	0,06
TOTAAL	99,51	99,25	99,42	99,70	99,91	100,14	100,36	99,62	101,74	99,70	100,42	101,65	101,78	99,42

Formule bereken op 'n basis van 32 suurstofatome

Si	10,643	10,75	10,747	10,616	10,964	10,754	10,840	10,564	10,638	10,689	10,718	10,911	10,811	10,713
Al	5,320	5,203	5,20	5,369	4,991	5,196	5,111	5,404	5,333	5,285	5,225	5,061	5,141	5,256
Mg	-	-	-	-	0,003	-	0,003	-	-	-	-	-	-	-
Fe	-	0,005	0,006	-	-	0,016	0,003	-	-	-	-	-	-	-
Ca	1,307	1,257	1,182	1,30	1,023	1,208	1,098	1,405	1,489	1,236	1,226	1,206	1,321	1,289
K	0,028	0,014	0,018	0,018	0,032	0,011	0,049	0,014	0,016	0,014	0,200	0,020	0,016	0,014
Na	2,825	2,856	2,833	2,808	3,087	2,935	3,053	2,706	2,437	2,903	2,981	2,744	2,858	2,784
Mn	-	-	0,002	-	0,002	-	-	0,002	-	-	-	-	-	0,003
Ab	67,70	69,20	70,40	68,00	74,53	70,66	72,70	65,60	62,00	69,90	70,50	69,10	66,70	68,12
An	31,40	30,46	29,20	31,50	24,70	29,68	24,10	34,10	37,60	27,76	29,00	30,40	32,90	31,54
Or	0,67	0,34	0,44	0,44	0,77	0,27	1,20	0,34	0,40	0,34	0,47	0,50	0,38	0,34

FeO^x Totale yster as FeO.

Analitykus : Anglo American Navorsingslaboratorium

asook die monsters van die Ortoamfiboolstone, bevat uiters min of geen K-veldspaat nie (Tabelle 2 en 4). Die teenwoordigheid of afwesigheid van K-veldspaat is in alle gevalle bevestig deur middel van ets en vlektoetse.

Plagioklaas is soms teenwoordig as beide homogene kristalle en antipertiet. Laasgenoemde voorkomswyse van plagioklaas is egter byna uitsluitlik beperk tot die kordiëriet-granaat-granoliëte. Die tweelinglamelle in plagioklaas is deurgaans baie smal en dit het die bepaling van die samestelling deur middel van optiese metodes bemoeilik. Die samestelling van plagioklaas in sewe en twintig monsters van die Pelitiese gneis is egter chemies met behulp van die mikrosonde bepaal. Die analyses word in tabelle 31a en b gegee. Die An-inhoud van plagioklaas in vyf van hierdie monsters is ook opties bepaal en die resultate stem binne twee persent ooreen met die mikrosonde analyses. In die geval van drie monsters is slegs optiese bepalings beskikbaar.

Tabel 32 Variasie in die samestelling van plagioklaas in monsters van die Pelitiese gneis. Die gemiddelde waarde vir groep word in die eerste kolom gegee en die variasie in die tweede kolom. Die onderverdeling van die Pelitiese gneis in die verskillende groepe is in tabel 8 (Afd. V) bespreek.

	1	2
A. Ortopirokseensone		
Groep 1	An 34,30	een monster
Groep 2	An 23,29	An 21,72 - An 32,95 (9 monsters)
Groep 3	An 29,56	een monster
Groep 4	nie verteenwoordig	
B. Ortopirokseensogroep		
Groep 1	An 30,93	An 30,46 - An 31,40 (2 monsters)
Groep 2	An 30,70	An 29,20 - An 31,50 (2 monsters)
Groep 3	nie verteenwoordig	
Groep 4	An 26,89	An 24,70 - An 29,08 (2 monsters)
C. Ortoamfiboolstone		
Groep 1	nie verteenwoordig	
Groep 2	An 30,47	An 26,1 - An 32,90 (7 monsters)
Groep 3	An 34,10	een monster
Groep 4	nie verteenwoordig	

Die variasie in die samestelling van plagioklaas in die Pelitiese gneis word in tabel 32 opgesom. Indien chemies en mineralogies soortgelyke gesteentes (bv. groepe 2 en 3) in hierdie tabel beskou word lyk dit asof daar 'n klein toename in die An-inhoud vanaf die Ortopirokseensone na die Ortoamfiboolstone is. Hierdie voorgestelde verandering in

die samestelling van plagioklaas is nie op statisties aanvaarbare inligting gebaseer nie maar kan tog met die hidrasie van kordiëriet langs die Ortopirokseenisograad in verband gebring word (Afd. IX-3.1).

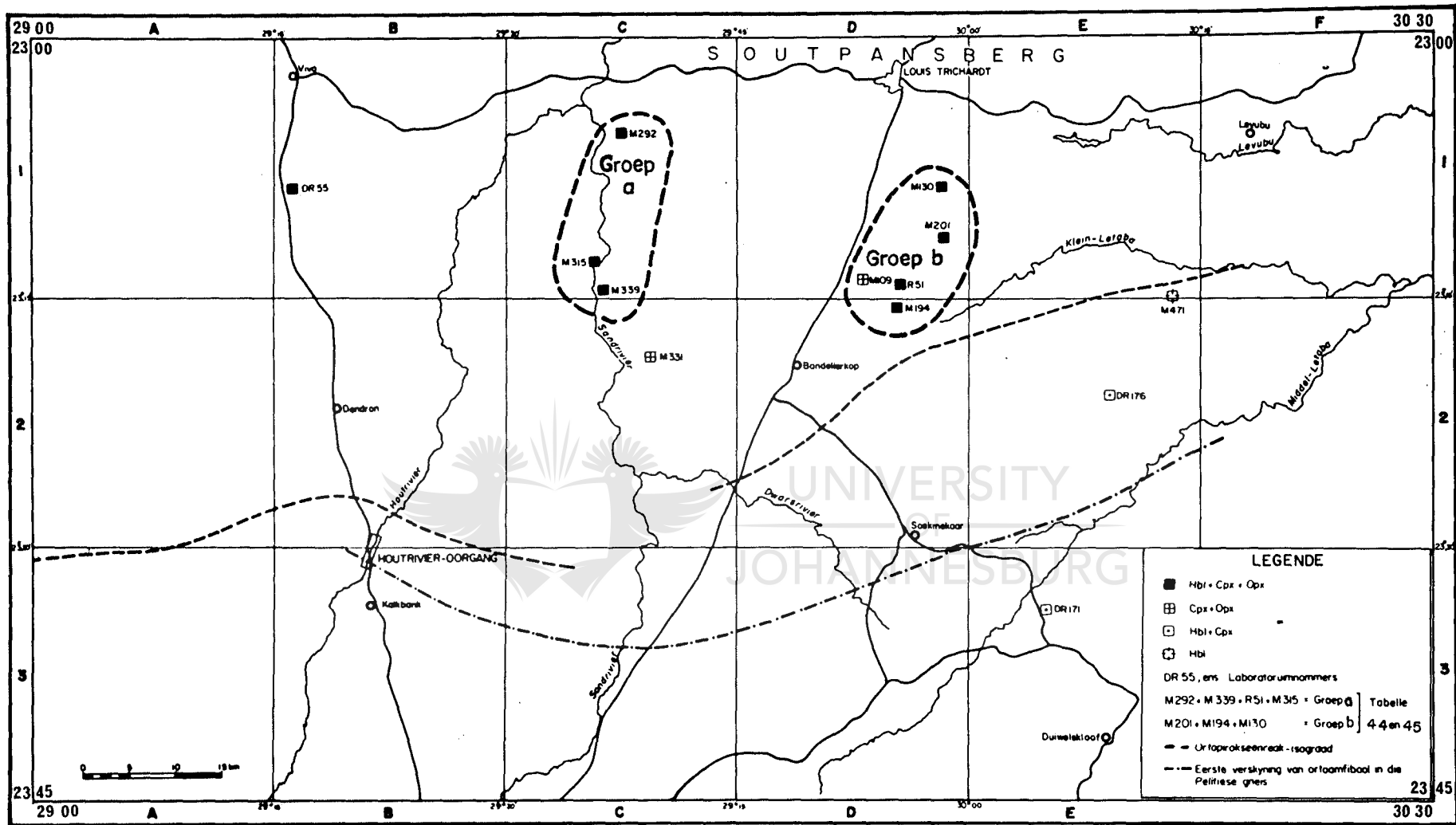
2. DIE MAFIESE GNEIS

2.1 HORNBLLENDE

Hornblende is 'n hoofbestanddeel van die amfiboliete maar is soms ook 'n kenmerkende mineraal in die hipersteen-ou#gietgranoliete (Tabel 5, Afd. IV). Die amfiboliete dagsoom egter baie swakker as die granoliete en die beskikbare chemiese inligting vir hornblende is hoofsaaklik tot laasgenoemde groep gesteentes beperk. Die samestelling van amfibool word egter algemeen gekoppel aan die fisiese toestande van metamorfose (Binns, 1965; Miyashiro, 1973), en in die lig hiervan is dit tog belangrik om die beskikbare chemiese inligting vir hornblende in die twee metamorfe sones so volledig as moontlik te bespreek. Die verspreiding van monsters waarvoor chemiese analises vir hornblende beskikbaar is word in figuur 40 geïllustreer.

2.1.1 Chemiese samestelling en nomenklatuur

Elf chemiese analises vir hornblende en waardes vir MgO/FeO (mol) en $Mg/Mg+Fe^{+2}$ (atoom) word in tabel 33 gegee. Drie van die analises is van hornblende in die amfibolite en die res is van hornblende in die hipersteen-ougietsgranoliete. Die waardes in hierdie tabel is gemiddeldes vir twee tot drie analises per gesteente. Ses van die analises is met behulp van 'n JEOL model JXA-5A elektronmikrosonde by die Geologiese Opname gedoen, en die res met behulp van 'n ARL



Figuur 40 : Lokaliteitskaart wat die verspreiding van mikrosonde analyses vir hornblende, hipersteen en augiet in die Mafesie gneis aandui (Tabelle 33, 34 en 35).

model SEMQ elektronmikrosonde by die Anglo American Navorsingslaboratorium.

TABEL 33 Mikrosonde analises van hornblende in die hipersteen-ougietgranoliet en amfiboliet (DR.176, DR.171 en M.471)

Monster-nommer	a M.130	a R.51	a M.292	a M.339	b DR.55	a M.315	b M.201	a M.194	b DR.176	b DR.171	b M.471
Kolom	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	42,82	42,68	44,29	44,80	43,05	43,44	43,22	43,56	48,18	42,83	43,77
Al ₂ O ₃	11,26	10,61	11,05	9,54	12,09	9,43	10,81	11,62	7,63	11,01	10,82
TiO ₂	2,19	1,77	1,52	1,99	1,89	1,94	1,94	2,01	0,72	1,19	1,09
MgO	13,21	13,76	12,58	12,33	13,55	12,88	9,89	11,68	14,78	10,51	11,18
FeO ^x	13,47	14,70	14,42	13,83	10,90	13,79	17,53	14,28	12,23	17,62	16,41
CaO	11,45	11,21	11,54	11,39	11,74	11,28	11,08	11,83	12,24	11,95	11,86
MnO	0,34	0,42	0,33	0,39	0,08	0,38	0,32	0,08	0,18	0,21	0,18
Na ₂ O	1,40	1,18	1,22	2,23	1,91	1,17	1,54	1,52	1,24	1,79	1,49
K ₂ O	1,08	1,28	0,87	0,44	1,13	0,38	0,67	1,13	0,50	1,29	0,45
Cr ₂ O ₃	0,34	0,15	0,17	0,18	0,27	0,14	0,13	0,06	0,22	0,09	0,04
NiO	0,29	0,23	0,30	0,26	n.b.	0,24	0,22	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
TOTAAL	97,85	98,00	98,27	97,36	96,61	95,07	97,36	97,78	97,90	94,46	97,28

Formule bereken op 'n basis van 23 suurstofatome

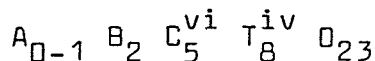
Si	6,350	6,361	6,528	6,656	6,381	6,602	6,528	6,462	7,003	6,441	6,566
Al ^{iv}	1,650	1,639	1,472	1,344	1,619	1,398	1,472	1,538	0,997	1,559	1,435
[TeT]	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Al	0,321	0,229	0,448	0,327	0,494	0,291	0,453	0,494	0,311	0,393	0,479
Cr	0,040	0,018	0,020	0,021	0,032	0,017	0,016	0,007	0,025	0,011	0,005
Ti	0,244	0,198	0,169	0,223	0,221	0,222	0,220	0,224	0,078	0,134	0,123
Ni	0,035	0,028	0,036	0,031	n.b.	0,030	0,027	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Mg	2,921	3,057	2,764	2,730	2,993	2,917	2,226	2,582	3,203	2,356	2,499
Fe	1,439	1,470	1,563	1,669	1,270	1,523	2,058	1,693	1,383	2,106	1,494
[M1-M3]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Fe	0,232	0,362	0,215	0,050	0,081	0,230	0,157	0,079	0,104	0,110	0,165
Mn	0,043	0,053	0,041	0,049	0,010	0,049	0,041	0,010	0,022	0,026	0,024
Ca	1,725	1,585	1,744	1,813	1,865	1,721	1,793	1,880	1,874	1,364	1,811
Na	-	-	-	0,088	0,044	-	0,009	0,031	-	-	-
[M4]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Na	0,403	0,341	0,349	0,466	0,461	0,345	0,443	0,375	0,348	0,521	0,434
K	0,204	0,243	0,164	0,083	0,214	0,074	0,128	0,214	0,093	0,247	0,085
Ca	0,095	0,205	0,079	-	-	0,116	-	-	0,033	0,061	0,055
[A]	0,702	0,789	0,592	0,549	0,675	0,535	0,571	0,589	0,474	0,829	0,614
MgO/FeO	1,748	1,668	1,555	1,589	2,215	1,664	1,010	1,458	2,160	1,063	1,215
Mg/Mg+Fe ⁺²	0,636	0,625	0,609	0,614	0,689	0,625	0,501	0,593	0,683	0,516	0,548

FeO^x Yster as Totale-FeO. n.b. Nie bepaal nie.

Analitikus : ^a Geologiese Opname. ^b Anglo American Navorsingslaboratorium.

Lokalisiteite vir monsters in Tabel 33 word in Fig. 40 se illustreer.

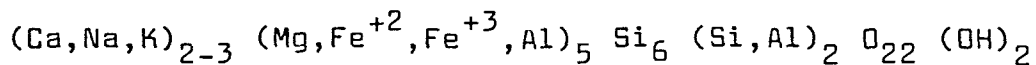
Die struktuurformules in tabel 33 is bereken op 'n watervrye basis van 23 suurstofatome (Robinson e.a., 1971). Indien water en fluoor dus buite rekening gelaat word kan die algemene struktuurformule vir amfibool as volg geskryf word:



Waar 'T' die tetraëdries-gekoördineerde katione (Si en Al^{iv}) voorstel; 'C' stel die 6-voudig gekoördineerde katione in die M₁, M₂ en M₃ struktuurposisies voor (Mg, Fe, Al^{vi}, Ti, Mn); 'B' stel die 6- of 8-voudig gekoördineerde katione (hoofsaaklik Ca) in die M₄ struktuurposisie voor; 'A' stel die 10- of 12-voudig gekoördineerde katione voor (Na+K+Ca) wat nie in die 'B'-groep geakkommodeer kan word nie.

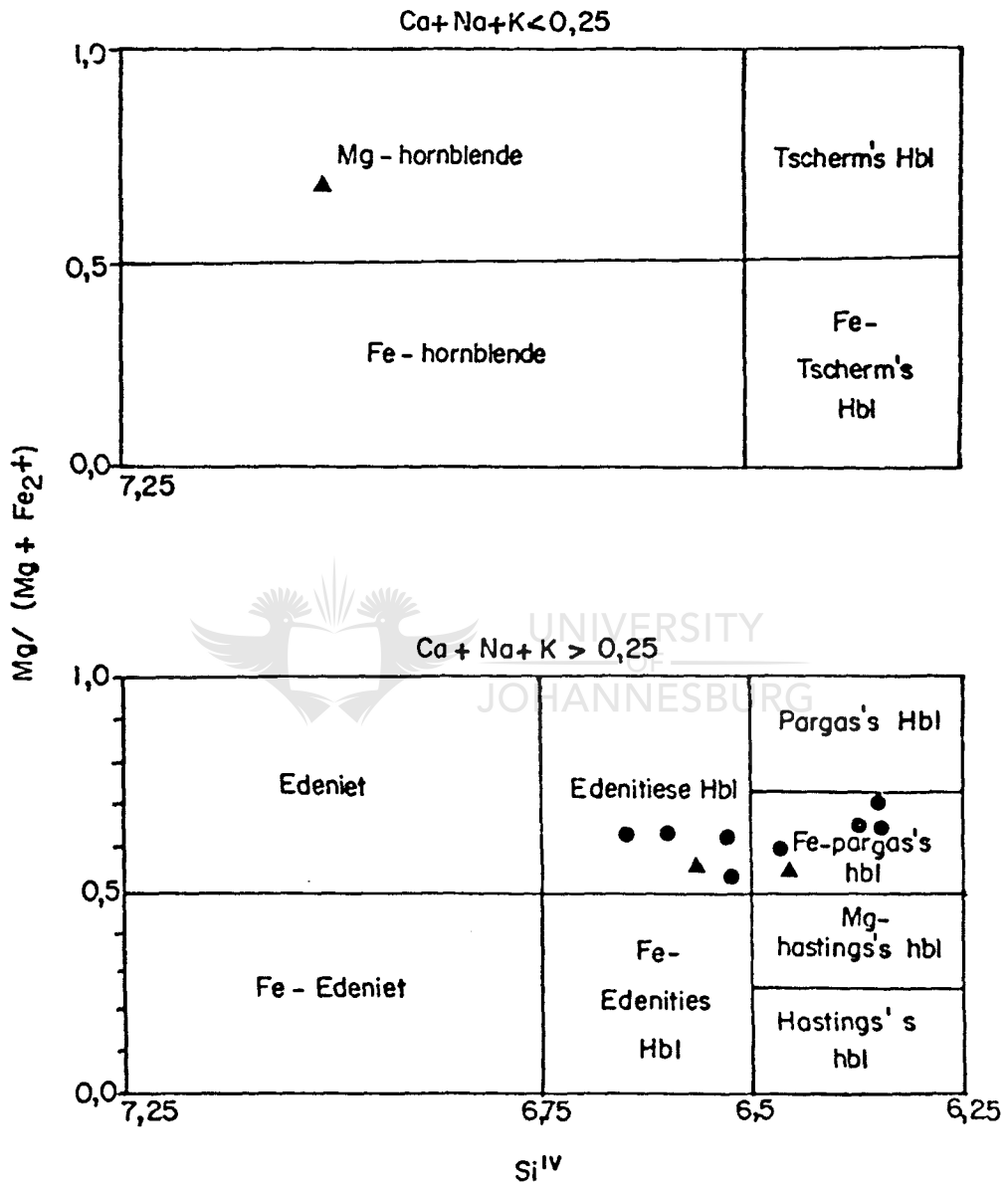
Hierdie formuleeenheid bevat agt tetraëdriese posisies en stem ooreen met 'n halwe eenheidsel vir klinoamfibool. Die toekenning van katione tot die verskillende struktuurposisies is reeds volledig by die ortoamfibole bespreek (Afd. VI-1.5) en word nie weer herhaal nie. Dit is egter belangrik om daarop te let dat sommige van die analyses in tabel 33 onvoldoende kalsium bevat om die M₄ posisie volledig te vul. Hierdie vakante posisies word deur natrium gevul en die oorblywende alkalies vul die aanliggende A-posisie. Baie gepubliseerde analyses van hornblende is in ooreenstemming hiermee (Binns, 1965; Leake, 1965). Die oorblywende analyses in tabel 33 bevat egter meer kalsium as wat benodig word om die M₄ posisie te vul en in hierdie gevalle word al die beskikbare alkalies in die A-posisie opgeneem (kyk Jackson, 1976, p. 131). Die alkalies wat die A-posisie vul is na aanleiding van Binns (1965) bekend as "edenitiese alkalies".

'n Algemene chemiese formule vir hornblende kan as volg geskryf word (Miyashiro, 1973):



Die klinoamfibole in die Mafiese gneis van die Bandelierkop-Formasie is almal lede van die kalsiese amfiboolgroep (Ca = 1,5-2,0 katione per 23 suurstofatome). Die klassifikasie van amfibole in hierdie ondersoek is in ooreenstemming met die voorstel van Leake (1968) en word hier in figuur 41 geïllustreer. Slegs die toepaslike gedeelte van die figuur word hier weergegee. Die amfibole val almal in die volgende

groepe: magnesio-hornblende, edenitiese hornblende en Fe-pargasitiese hornblende.

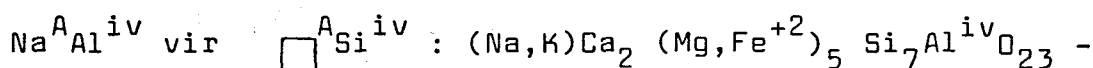


Figuur 41 : Klassifikasie van hornblende in die Mafiese gneis (Leake, 1963)
 ● = Hipersteen-ougielgranoliete: ▲ = amfiboliete

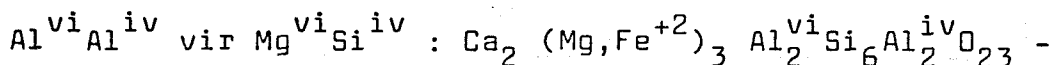
2.1.2 Gekoppelde substitusies in hornblende

Die substitusie van Fe^{+2} vir Mg^{+2} gee aanleiding tot groot variasies in die samestelling van amfibole. Dit is egter 'n eenvoudige tipe substitusie wat nie ladingsbalansprobleme tot gevolg het nie, en kan maklik beskryf word deur gebruik te maak van toepaslike voorvoegsels soos magnesio- en ferro. Meer komplekse samestellings kan egter afgelei word uit gekoppelde substitusies waarby Na^{+1} en Al^{+3} betrek word. Indien hierdie gekoppelde substitusies volledig verloop, gee dit aanleiding tot die ideale endlede wat dikwels in die literatuur na verwys word (Robinson e.a., 1971).

Twee basiese substitusie-meganismes is in hierdie ondersoek ter sprake. Die eerste is die substitusie van aluminium vir silika en is bekend as tschermakitiese substitusie. Die tweede substitusiemeganisme verwys na die akkommodasie van natrium en kalsium in die andersins vakante A-posisie en is bekend as edenitiese substitusie. Hierdie twee neigings kan as volg geskryf word:



edeniet-ferro-edeniet.

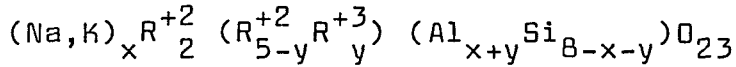


tschermakiet-ferro-tschermakiet.

Beide substitusie-meganismes hou verband met die graad van metamorfose en word later in hierdie afdeling meer volledig bespreek.

Die variasie in die chemiese samestelling van hornblende in die amfiboliete en hipersteen-ougietgranoliete kan, in terme van bogenoemde twee gekoppelde substitusies in die basiese

tremolietformule ($\square^A \text{Ca}_2^{\text{M4}} \text{Mg}_5^{\text{vi}} \text{Si}_8^{\text{iv}} \text{O}_{23}$), deur die volgende algemene skema voorgestel word (Robinson e.a., 1971, p. 1010):

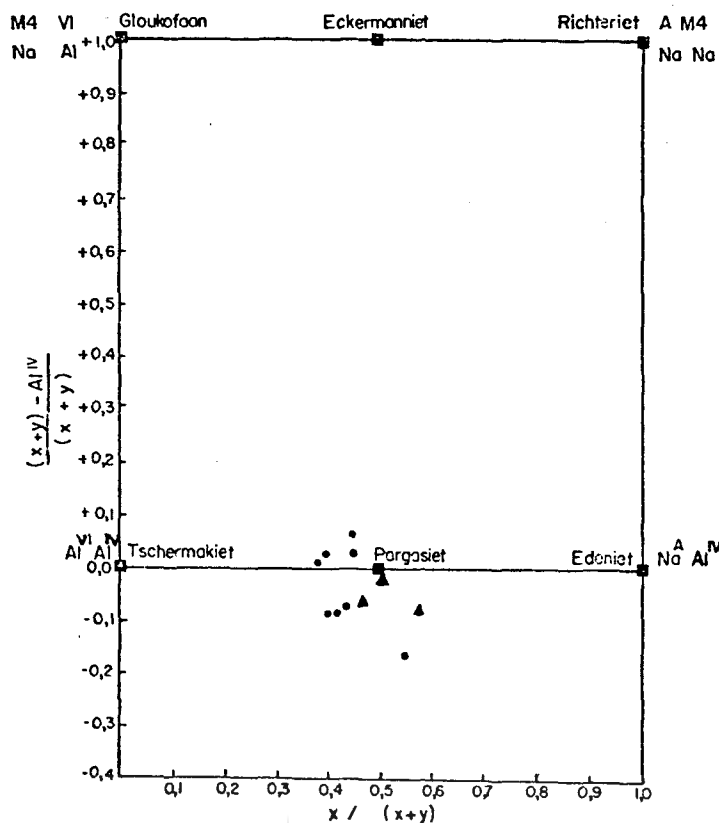


waar x = gevulde A-posisies en y = oktaëdriese $\text{Al}^{+3} + \text{Cr}^{+3} + 2\text{Ti}^{+4}$.

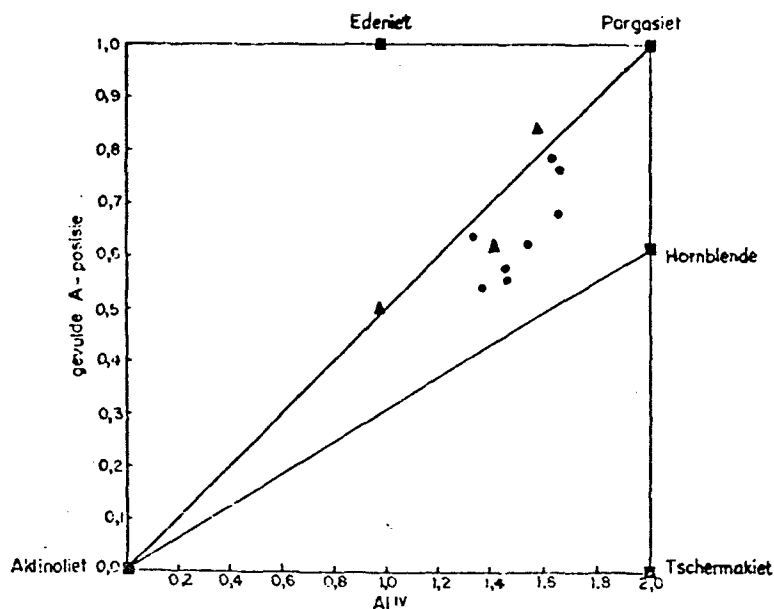
Die samestelling van hornblende in die Mafiese gneis is in figuur 42a gestip in terme van $X/(x+y)$ teenoor $(x+y)\text{-Al}^{\text{iv}}/(x+y)$ (Robinson e.a., 1971). Die koördinate in hierdie figuur illustreer die rigting waarin die samestelling van hornblende afwyk vanaf die struktuurformule van ideale tremoliet. Die analyses in hierdie figuur stip almal naby pargasiet op die verbindingslyn tussen tschermakiet en edeniet. Die residuele waardes $((x+y)\text{-Al}^{\text{iv}})$ wissel vanaf effens positief tot 'n gemiddelde negatiewe waarde in die omgewing van $-0,10$. Die positiewe residuele waarde is 'n aanduiding van die hoeveelheid Na in M_4 (of analitiese foute) terwyl die negatiewe residuele waarde of 'n analitiese fout is, of gekoppel is aan die verkeerde aanname van totale yster as FeO.

Die inligting in figuur 42a is 'n aanduiding dat hornblende in hierdie ondersoek hoofsaaklik gekenmerk word deur pargasitiese substitusie; dit wil sê, 'n kombinasie van edenitiese en tschermakitiese substitusies. Dit blyk dus dat hornblende in die amfiboliete meer edenitiese en minder tschermakitiese is as dié in die hipersteen-ougietgranoliete.

Figuur 42a illustreer die rigting van afwyking vanaf die basiese tremolietformule, maar nie die hoeveelheid afwyking nie. Die hoeveelheid afwyking vanaf ideale tremoliet word in figuur 42b geïllustreer (Robinson e.a., 1971). Hierdie inligting is nie in goeie ooreenstemming met die gegewens van Robinson e.a. (1971) nie. Hierdie skrywers het op grond van die ondersoek van gepubliseerde analyses van hornblende tot die gevolgtrekking gekom dat hornblende met



Figuur 42a : Die samestelling van hornblende gestip in terme van die residuele waarde, $(x+y) - Al^{iv}$, en die verhouding $x/(x+y)$.
 ● = Hipersteen-ougietgranoliet. ▲ = Amfiboliet



Figuur 42b : Die samestelling van hornblende gestip in terme van die gevulde A-posisie en Al^{iv} . Hierdie diagram illustreer die hoeveelheid afwyking vanaf die ideale formule vir tremoliet. ● = Hipersteen-ougietgranoliet.
 ▲ = Amfiboliet

'n pargasitiese samestelling redelik skaars is. Die meeste gepubliseerde analises is 'n aanduiding van die bestaan van 'n vaste oplossingsreeks tussen aktinoliet en hornblende met 'n ideale formule wat goed ooreenstem met die ideale formule van gedriet (Afd. VI-1.5.2).

2.1.3 Die samestelling van hornblende as 'n funksie van die graad van metamorfose

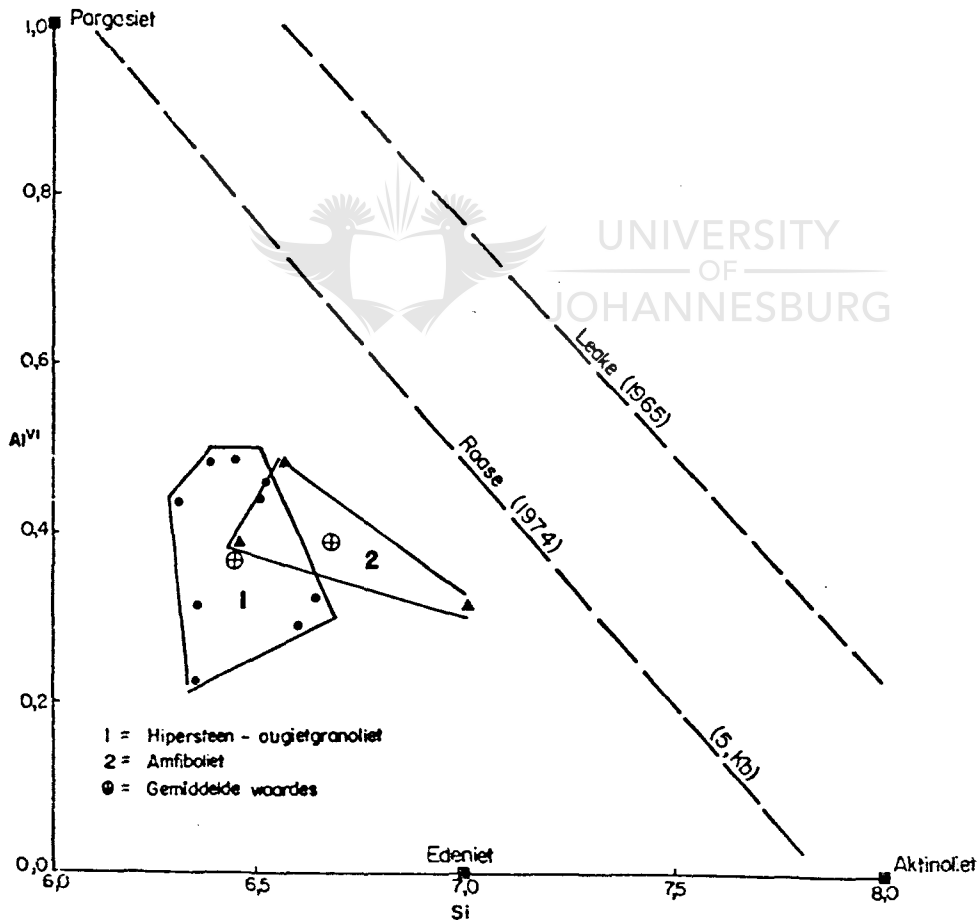
Detail studies in verskeie metamorfe terreine het aangetoon dat die chemiese samestelling van hornblende gekoppel kan word aan beide die graad van metamorfose en die samestelling van die moedergesteentes (Binns, 1965; Bard, 1970; Jackson, 1976). Raase (1974) het verder op grond van 'n kompilasie van gepubliseerde analises voorgestel dat die chemie van hornblende ook opvallende verskille vertoon in verskillende metamorfe fasies-reekse. Die waargenome variasies in die samestelling van hornblende, wat hoofsaaklik gekoppel word aan die graad van metamorfose, hou verband met die substitusie van natrium en aluminium, en die titaaninhoud.

2.1.3.1 Die Al_2O_3 - en SiO_2 -inhoud van hornblende

Leake (1971) het voorgestel dat die Al^{vi} -inhoud van hornblende drukafhanklik is en dat hoeveelheid Al^{vi} in kalsiese en subkalsiese amfibole reëlmatig toeneem met 'n toename in Al^{iv} . Hornblende met 'n samestelling die naaste aan teoretiese tschermakiet ($Al^{vi} = 2$) is dus kenmerkend geassosieer met hoë-drukminerale soos kianiet, gloukofaan en jadeiet. Raase (1974) het gevind dat hornblende van verskillende drukomgewings (verskillende fasiesreekse) twee goed gedefinieerde groepe op 'n diagram vorm waarin Al^{vi} teenoor Si gestip word. Analises van hornblende uit lae-

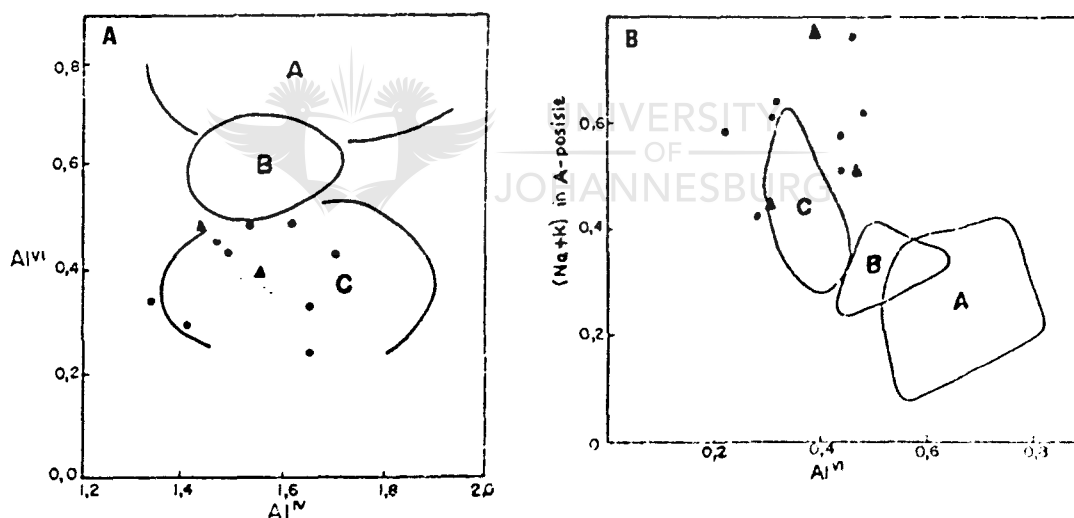
drukterreine word deur 'n lyn by ongeveer 5 Kb geskei van dié uit hoë drukomgewings. Hornblende uit gesteentes van hoë-druk metamorfe fasiesreeks word dus deur meer gevorderde tschermakitiese substitusies gekenmerk.

Die samestelling van hornblende in die mafiese gneis word op 'n soortgelyke diagram in figuur 43 geïllustreer. Uit hierdie figuur is dit duidelik dat al die waardes in die veld van lae-druk regionale metamorfose stip. 'n Drukombing van minder as 5 Kb is egter nie in ooreenstemming met die berekende waarde van 7-8 Kb vir die druktoestande in die gebied onder bespreking nie (Afd. X).



Figuur 43 : Verwantskap tussen die Al^{VI} en Si-inhoud van hornblende in die Mafiese gneis. Die boonste stippellyn dui die maksimum hoeveelheid Al^{VI} aan (Leake, 1965) terwyl die onderste stippellyn die grens tussen hornblende van lae- (onder) en hoë-drukombings (bo) aandui (Raase, 1974)

Die Al^{VI} -inhoud van hornblende is egter nie slegs druk-afhanklik nie maar kan ook gekoppel word aan variasies in temperatuur. Binns (1965) en Bard (1970) het byvoorbeeld gemerk dat 'n afname in Al^{VI} (en Fe^{+3}) algemeen gepaard gaan met 'n toename in die graad van metamorfose. Hierdie variasie kan dus gesien word as 'n verandering vanaf 'n tschermakitiese samestelling in die laer-graadse amfiboliet-fasies teenoor 'n pargasitiese samestelling in die hornblende-granulietfasies (Raase, 1974, p. 232). Dit word in figuur 44a geïllustreer. Uit hierdie figuur is dit duidelik dat hornblende van beide die amfiboliete en hipersteen-ougiet-granoliete in die veld van die hornblende-granulietfasies stip. Dit is dus duidelik dat die aluminiuminhoud van hornblende in die huidige ondersoek geen toepassing het as 'n moontlike indikator van die graad van metamorfose nie.



Figuur 44a en b : Diagramme waarin Al^{VI} teen Al^{IV} , en Al^{VI} teen edenitiese alkalies vir hornblende van die Mafiese gneis gestip is. Die omlýnde velde (A, B en C) is gegewens vir hornblende uit amfiboliete (A en B) en hornblende-granuliete (C) van Broken Hill (Binns, 1965). ● = hipersteen-ougietgranoliet; ▲ = amfiboliet

2.1.3.2 Substitusie van alkalies in die A-struktuur- posisie van hornblende

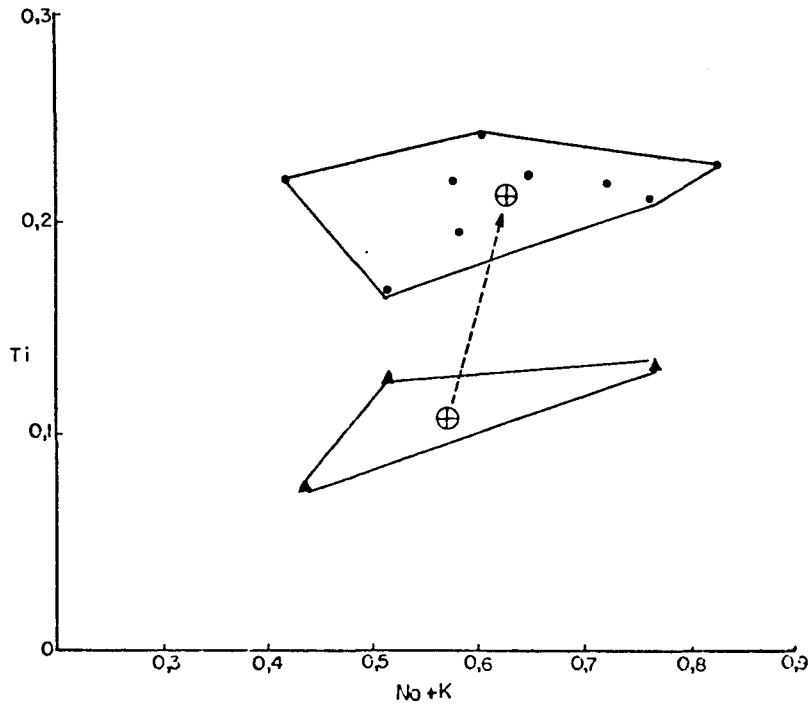
'n Toename in edenitiese alkalies met 'n toename in die graad

van metamorfose is 'n opvallende verskynsel in verskeie metamorfe terreine (Binns, 1965; Bard, 1970; Jackson, 1976). Binns (1965) het dit beklemtoon dat slegs die edenitiese alkalies gekoppel kan word aan variasies in die fisiese toestande van metamorfose. Hierdie variasies in die samestelling van hornblende word in figuur 44b geïllustreer. Dit is weer eens duidelik dat hornblende uit beide metamorfe sones in die veld van die hornblende-hornfelsfasies stip. Slegs die edenitiese alkalies is in hierdie diagram gestip en nie ook kalsium wat soms ook in die A-posisie substiteer nie (kyk Tabel 33). Die kalsium-inhoud van hornblende in beide die Ortoamfibool- en Ortopirokseensones varieer redelik baie (Tabel 33), maar daar is tog 'n duidelike afname in hierdie waarde vanaf 'n gemiddelde van 1,913 atome in die Ortoamfiboolsone tot 1,832 atome in die Ortopirokseensone.

2.1.3.3 Variasie in die TiO_2 -inhoud van hornblende

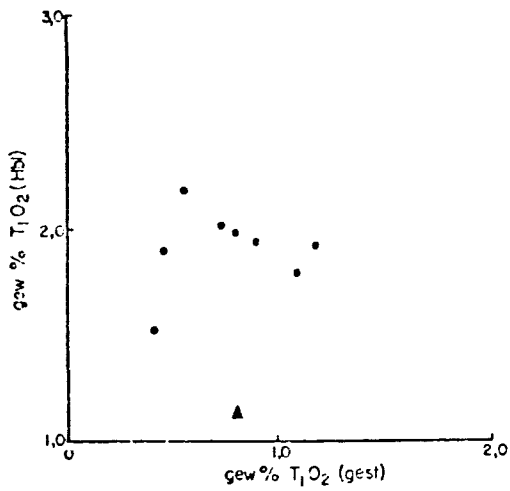
Die kleur van hornblende varieer vanaf groen in die amfiboliete tot groenbruin en kakiekleurig in die hipersteen-ougietgranoliete. Hierdie kleurverandering gaan gepaard met 'n toename in die gemiddelde titaaninhoud vanaf 0,112 atome in die amfiboliete tot 0,215 atome in die granoliete (Fig. 45a). Die positiewe korrelasie tussen die kleur van hornblende en toenemende titaaninhoud is 'n welbekende waarneming uit talle metamorfe terreine (Binns, 1965; Jackson, 1976; Miyashiro, 1973).

Raase (1974) het die gemiddelde titaaninhoud van hornblende uit verskillende metamorfe terreine opgesom en sy bevinding is 'n aanduiding dat die maksimum TiO_2 -inhoud in elke statistiese monster 'n styging toon vanaf 0,08 atome (op 'n basis van 23 suurstofatome) in die oorgangsonne tussen die groenskies- en amfibolietfasies deur 0,20 atome in die hoër-amfibolietfasies tot 0,29 atome in die granulietfasies.



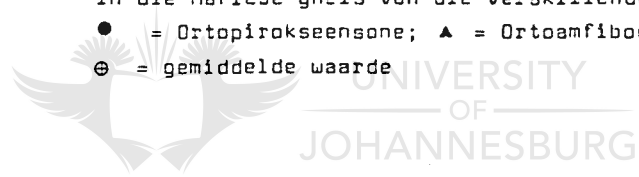
Figuur 45a : Variasie in die titaan- en alkali-inhoud van hornblende in die Mafiese gneis van die verskillende metamorfe sones.

● = Ortopirokseensone; ▲ = Ortoamfiboolzone;
 ⊕ = gemiddelde waarde



Figuur 45b : Gewigspersentasie titaan in hornblende gestip teen dieselfde waarde in die Mafiese gneis.

● = Ortopirokseensone; ▲ = Ortoamfiboolzone



Die meeste waarnemers (Binns, 1965; Leake, 1965) is dit eens dat die waargenome verryking van titaan in hornblende deur 'n styging in temperatuur beheer word en grootliks onafhanklik is van die samestelling van die moedergesteentes; dit is, indien die gesteentes voldoende titaan bevat. Grapes e.a. (1977) het egter aangetoon dat hornblende in assosiasie met sfeen, rutiel en Fe-Ti-oksiedes opvallend minder titaan bevat as in gesteentes waarin hornblende die enigste Ti-ryke mineraal is. In beide hierdie gevalle is die totale titaanhoud van die gesteentes dieselfde.

In die huidige ondersoek kan hornblende in die hipersteen-ougietgranoliete as versadig ten opsigte van titaan beskou word. Dit word geïllustreer deur die teenwoordigheid van ilmeniet. Die amfiboliete word egter gekenmerk deur die byna totale afwesigheid van ilmeniet en ook van sfeen. Die massapersent TiO_2 in hornblende is in figuur 45b gestip teen dieselfde waarde in die gesteentes. Ongelukkig is die chemiese samestelling van slegs een van die drie betrokke amfiboliete beskikbaar. Nieteenstaande hierdie beperking is die gebrek aan 'n sistematiese verwantskap tussen die titaanhoud van hornblende en die gesteentes tog opvallend. Dit is verder ook duidelik dat die totale titaanhoud van die een amfiboliet nie verskil van dié in die hipersteen-ougietgranoliete nie. Dit word bevestig deur 'n gemiddelde titaanhoud van 0,72 massapersent in vyf addisionele chemiese analises vir amfiboliete in tabel 9b (Afd. V).

Uit die voorafgaande bespreking is dit dus duidelik dat 'n toename in die titaanhoud van hornblende vanaf die Ortoamfiboolsone na die Ortopirokseensone hoofsaaklik beheer word deur 'n toename in die graad van metamorfose. Die teenwoordigheid of afwesigheid van ander titaanryke minerale speel geen opvallende rol nie. Die waargenome verryking in titaan is egter nie vanselfsprekend gekoppel aan die vermoë van hornblende om toenemende hoeveelhede titaan met 'n styging in temperatuur op te neem nie. Die rede vir die toename in titaan is eerder gekoppel aan die waargenome

vermindering in die modale persentasie hornblende vanaf 'n gemiddelde waarde van 55 volume persent in die amfiboliete tot 7 volume persent in die hipersteen-ougietgranoliete (Fig. 16). Dit word verder geïllustreer deur die waarneming dat die totale titaaninhoud van die amfiboliete nie verskil van dié van die granoliete nie.

2.1.4 Bespreking

Die gebrek aan voldoende chemiese analyses vir hornblende in die amfiboliete beperk enige positiewe afleidings wat gekoppel is aan die verwantskap tussen die samestelling van hierdie mineraal en die graad van metamorfose. Sekere afleidings kan egter wel gemaak word, maar moet steeds in die lig van bogenoemde beperking gesien word.

- (i) Die samestelling van hornblende kan hoofsaaklik in terme van 'n pargasitiese substitusie beskryf word.
- (ii) Die Al^{vi} -inhoud van hornblende vertoon geen opvallende verwantskap met variasies in die graad van metamorfose nie. Dit is in teenstelling met die waarneming dat die samestelling van hornblende algemeen verander vanaf tschermakities na pargasities met 'n toename in die graad van metamorfose.
- (iii) Die edenitiese alkalies in hornblende is nie gekoppel aan die graad van metamorfose nie. Dit stem ook nie ooreen met die waarneming dat die edenitiese alkalies algemeen toeneem met 'n toename in die graad van metamorfose nie.
- (iv) Die toename in die titaaninhoud van hornblende is in ooreenstemming met die literatuur en kan verder ook in verband gebring word met soortgelyke variasies in die titaaninhoud van biotiet (Afd. VI-1.4.3.3).
- (v) In hierdie bespreking is geen poging aangewend om

op chemiese gronde tussen moontlike primêre (prograad) en sekondêre (retrograad) hornblende in die hipersteen-ougietgranoliete te onderskei nie. Die probleem van die metamorfe status van hornblende in hierdie gesteentes word volledig in Afdeling VII-2.2.2.1 bespreek.

2.2 PIROKSENE

Die Mafiese gneis in die Ortopirokseensone word gekenmerk deur die teenwoordigheid van beide orto- en klinopirokseen. Ortopirokseen is uitsluitlik beperk tot hierdie sone terwyl klinopirokseen soms ook in klein hoeveelhede in die amfiboliete van die Ortoamfiboolsone waargeneem is. Klinopirokseen is heelwaarskynlik nie 'n stabiele mineraal in die amfiboliete nie (Afd. IV-2.2), en die beskikbare chemiese inligting vir hierdie mineraal is hoofsaaklik beperk tot die granoliete. Die regionale verspreiding van die monsters waarin analitiese gegewens vir piroksene beskikbaar is, word in figuur 40 geïllustreer.

2.2.1 Chemiese samestelling

2.2.1.1 Klinopirokseen

Chemiese analyses, struktuurformules en waardes van MgO/FeO (mol) en $Mg/Mg+Fe^{+2}$ (atoom) vir twaalf klinopiroksene word in tabel 34 gegee. Tien van hierdie analyses is uit die Ortopirokseensone en twee is uit die Ortoamfiboolsone.

Die klinopiroksene bestaan hoofsaaklik uit Ca^{+2} , Mg^{+2} en Fe^{+2} , en die samestelling van hierdie minerale kan akkuraat in terme van hierdie drie komponente geïllustreer word

TABEL 34 Mikrosonde analyses van ougiet in die hipersteen-ougietgranoliete en amfiboliete (DR.176, DR.171)

Monster- nommer	a											
	M.130	M.331	R.51	N.292	M.339	DR.55	M.109	M.315	M.201	M.194	DR.176	DR.171
Kolon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	51,20	48,15	49,41	50,12	50,30	51,65	49,73	49,69	50,65	51,02	53,06	52,16
Al ₂ O ₃	2,84	1,89	2,27	2,61	2,38	3,19	2,66	2,49	2,31	2,55	1,17	1,96
TiO ₂	0,39	0,31	0,42	0,38	0,38	0,40	0,35	0,38	0,35	0,64	0,02	0,11
MgO	14,65	12,59	14,58	13,38	13,57	13,08	13,81	14,07	12,18	13,81	14,05	12,31
FeO ^x	7,90	12,15	10,13	9,40	10,05	6,76	9,49	9,72	11,67	9,04	7,40	9,85
CaO	21,94	21,86	21,78	22,28	21,62	21,89	22,31	21,12	21,31	21,75	23,64	23,22
MnO	0,52	0,34	0,73	0,43	0,47	0,38	0,43	0,55	0,46	0,64	0,22	0,25
Na ₂ O	0,61	0,37	0,57	0,52	0,64	0,85	0,56	0,47	0,48	0,47	0,65	0,83
K ₂ O	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,07	-	-
Cr ₂ O ₃	0,16	0,27	0,10	0,19	0,12	0,20	0,11	0,12	0,13	0,11	0,06	0,04
NiO	0,22	0,31	0,24	0,25	0,26	0,28	0,24	0,24	0,24	0,29	n.b.	n.b.
TOTAAL	100,48	98,31	100,28	99,61	99,84	98,72	99,94	98,88	99,83	100,39	100,28	100,73

Formule bereken op 'n basis van 6 suurstofatome

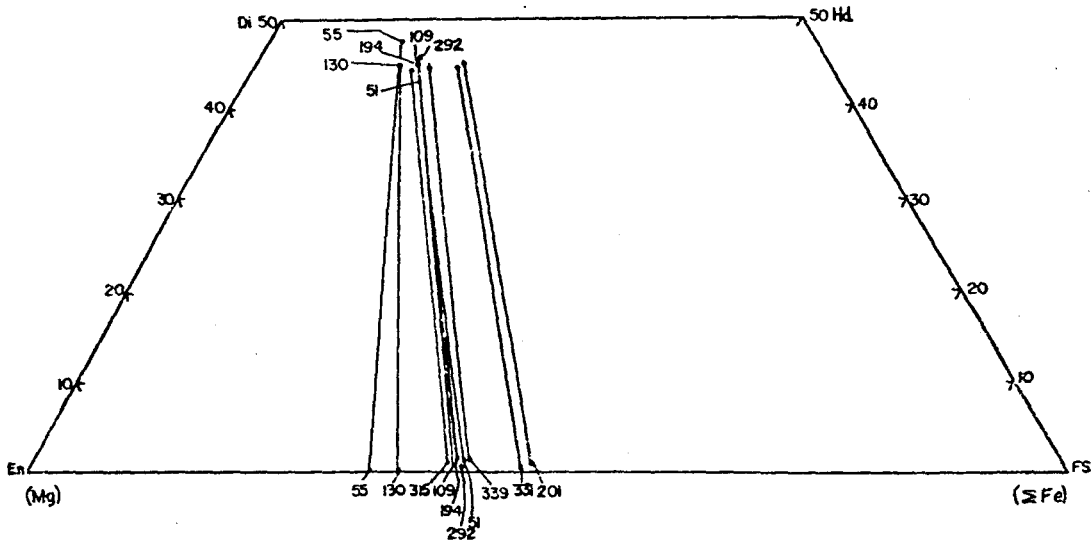
Si	1,904	1,880	1,870	1,898	1,903	1,940	1,887	1,895	1,925	1,909	1,971	1,951
Al ^{IV}	0,096	0,087	0,101	0,102	0,097	0,060	0,113	0,105	0,075	0,091	0,029	0,049
TOTAAL	2,00	1,967	1,971	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Al ^{VI}	0,029	-	-	0,015	0,009	0,081	0,005	0,007	0,028	0,021	0,022	0,037
Ti	0,011	0,009	0,012	0,011	0,011	0,011	0,010	0,011	0,010	0,018	0,001	0,003
Mg	0,812	0,732	0,823	0,755	0,765	0,732	0,778	0,800	0,690	0,770	0,778	0,686
Fe	0,246	0,397	0,321	0,298	0,318	0,212	0,300	0,310	0,371	0,283	0,230	0,308
Ca	0,874	0,914	0,883	0,904	0,877	0,881	0,503	0,863	0,808	0,872	0,941	0,937
Mn	0,016	0,011	0,021	0,014	0,015	0,012	0,014	0,018	0,015	0,020	0,007	0,008
Na	0,044	0,028	0,042	0,018	0,047	0,062	0,041	0,035	0,035	0,034	0,047	0,061
K	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	-	-
Cr	0,005	0,008	0,003	0,006	0,004	0,006	0,003	0,004	0,004	0,003	0,002	-
Ni	0,007	0,010	0,007	0,008	0,008	0,009	-	0,007	0,007	0,009	-	-
TOTAAL	2,046	2,112	2,116	2,051	2,056	2,008	2,056	2,057	2,039	2,033	2,028	2,040
MgO/FeO	3,305	1,847	2,565	2,536	2,406	3,458	2,593	2,580	1,860	2,722	3,383	2,227
Mg/(Mg+Fe ⁺²)	0,768	0,649	0,720	0,717	0,706	0,775	0,722	0,721	0,650	0,731	0,772	0,699

FeO^x Totale yster as FeOAnalitikus: ^a Geologiese Opname^b Anglo American Smeltinglaboratorium

Lokalisering vir monsters in Tabel 34 word in Fig. 40 geïllustreer.

(Fig. 46). Die meeste analyses val naby die grens tussen saliet en ougiet indien die nomenklatuur van Deer e.a. (1963, Fig. 1) gebruik word. Die twee analyses van die amfiboliete is saliet (nie in Fig. 46 gestip), terwyl die piroksene in die granoliete (met die uitsondering van DR 55) almal as ougiet beskryf kan word.

Die analyses in tabel 34 word almal gekenmerk deur 'n redelike lae aluminiumhoud (die maksimum Al₂O₃ is 3,2 massapersent) en XMg wat wissel tussen 65 en 77,5. Na⁺, Ti⁺⁴ en Mn⁺² is in klein hoeveelhede teenwoordig.



Figuur 46 : Die samestelling van piroksene in die hipersteen-ougiet-granoliete gestip in terme van die Ca^{+2} , Mg^{+2} en totale Fe ($\text{Fe}^{+2} + \text{Mn}$). Verbindingslyne verbind samebestaande piroksene. Monsternommers is dieselfde as in tabelle 34 en 35.

Die kalsiuminhoud van die klinopiroksene is redelik wisselvallig maar vertoon geen sistematiese neiging nie (Fig. 46). Die algemene toename in die kalsiuminhoud vanaf die amfiboliete na die granoliete (Tabel 34) is in ooreenstemming met die waarneming dat die samestelling van klinopirokseen verander vanaf saliet na ougiet met 'n toename in die graad van metamorfose (Binns, 1965; Miyashiro, 1973).

Die aluminiuminhoud van klinopirokseen in twee monsters (M 331 en R 51) is onvoldoende om te kompenseer vir die tekort aan silika in die Z-posisie. Dit is waarskynlik te danke aan analitiese foute. Die klein hoeveelheid aluminium in die Y-posisie van drie monsters (M 339, M 109 en M 315) is ook baie min en gevolglik kan geen betekenisvolle afleidings uit die waardes vir Al^{iv} en Al^{vi} in tabel 34 gemaak word nie.

2.2.1.2 Ortopirokeen

Tien chemiese analyses vir ortopirokeen en waardes vir MgO/FeO (mol) en Mg/Mg+Fe⁺² (atoom) word in tabel 35 gegee. Die ortopirokeene is almal in ewewig met klinopirokeen en die analyses in tabelle 34 en 35 is van samebestaande pirokeene in die hipersteen-ougietgranoliete.

TABEL 35 Mikrosonde Analises van hipersteen in die hipersteen-ougietgranoliete

Monster- nommer	M.130	M.331	R.51	M.292	M.339	DR.55	M.109	M.315	M.201	M.194
SiO ₂	50,79	48,90	50,12	51,41	52,04	53,02	50,51	50,19	50,50	48,89
Al ₂ O ₃	1,92	1,34	1,42	1,52	1,64	1,93	1,58	1,53	1,37	1,43
TiO ₂	0,09	0,17	0,18	0,15	0,18	0,16	0,13	0,19	0,17	0,28
MgO	23,62	18,88	21,15	20,25	19,11	23,11	21,34	21,22	17,45	21,11
FeO ^X	22,89	29,72	25,91	25,26	24,23	19,43	25,66	24,88	28,76	25,32
CaO	0,28	0,53	0,58	0,48	0,71	0,33	0,49	0,52	0,63	0,99
MnO	0,43	0,66	1,19	0,70	0,77	0,63	0,61	1,05	0,80	1,14
Na ₂ O	0,12	0,13	0,09	0,14	0,21	0,15	0,14	0,14	0,13	0,10
K ₂ O	0,03	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,03	0,09
Cr ₂ O ₃	0,15	0,09	0,11	0,13	0,11	0,15	0,14	0,12	0,11	0,09
NiO	0,25	0,26	0,23	0,33	0,21	0,30	0,21	0,29	0,27	0,25
TOTAAL	100,57	100,73	101,02	100,42	99,26	99,26	100,87	100,18	100,24	100,73
Formule bereken op 'n basis van 6 suurstofatome										
Si	1,897	1,893	1,900	1,943	1,977	1,965	1,908	1,908	1,947	1,896
Al ^{iv}	0,085	0,061	0,064	0,057	0,023	0,035	0,070	0,067	0,053	0,064
TOTAAL	1,982	1,954	1,964	2,000	2,000	2,000	1,978	1,975	2,000	1,960
Al ^{vi}	-	-	-	0,011	0,050	0,050	-	-	0,010	-
Ti	0,003	0,005	0,005	0,004	0,005	0,005	0,004	0,005	0,005	0,008
Mg	1,315	1,089	1,195	1,141	1,082	1,277	1,202	1,203	1,093	1,106
Fe	0,715	0,962	0,822	0,799	0,770	0,602	0,811	0,791	0,921	0,805
Ca	0,011	0,022	0,024	0,019	0,029	0,013	0,020	0,021	0,026	0,043
Mn	0,014	0,022	0,038	0,022	0,025	0,020	0,020	0,034	0,025	0,037
Na	0,009	0,010	0,007	0,010	0,016	0,011	0,010	0,010	0,010	0,007
K	0,001	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,004
Cr	0,004	0,003	0,003	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003
Ni	0,008	0,008	0,007	0,010	0,006	0,009	0,006	0,009	0,009	0,007
TOTAAL	2,080	2,124	2,103	2,022	1,988	1,993	2,040	2,070	2,022	2,109
MgO/FeO	1,839	1,132	1,455	1,429	1,405	2,120	1,482	1,520	1,081	1,387
Mg/Mg+Fe ⁺²	0,648	0,531	0,593	0,588	0,584	0,679	0,597	0,603	0,520	0,593

FeO^X Totale yster as FeO

Analitikus : Geologiese Oname

Lokalisering vir monsters in tabel 35 word in Fig. 40 geïllustreer.

Die ortopirokeene is almal hipersteen met 'n ferrosiliet-inhoud wat wissel tussen 33 en 49 mol persent. Hipersteen bevat meer mangaan maar minder natrium en titaan as die klinopirokeene. Die maksimum aluminiuminhoud (1,93 massapersent) is heelwat minder as in samebestaande klinopiroke-

seen en verskil ook grootliks van die hoë aluminiumhoud van hipersteen in die granaatgranoliet (gemiddelde waarde 5,99 massapersent).

Die kalsiuminhoud van hipersteen is laag en ook baie minder wisselvallig as in die geval van klinopirokseene (Fig. 46).

Die meeste struktuurformules van hipersteen in tabel 35 word gekenmerk deur 'n tekort aan aluminium, en die enkele waardes wat vir Al^{vi} gegee word is waarskynlik betekenisloos.

2.2.2 Die Al_2O_3 -inhoud van samebestaande piroksene as 'n funksie van die graad van metamorfose

Wilson (1976) het op grond van 'n studie van samebestaande piroksene in mafiese granoliete voorgestel dat die aluminiumhoud van hierdie piroksene drukafhanklik is. Sy inligting is 'n aanduiding dat Al^{vi} toeneem met 'n toename in druk en dus gebruik kan word om moontlike drukverskille in hoë-graadse metamorfe terreine te ondersoek. Hy beklemtoon dit egter dat slegs gesteentes met soortgelyke chemiese en modale samestellings vir hierdie doel vergelyk kan word.

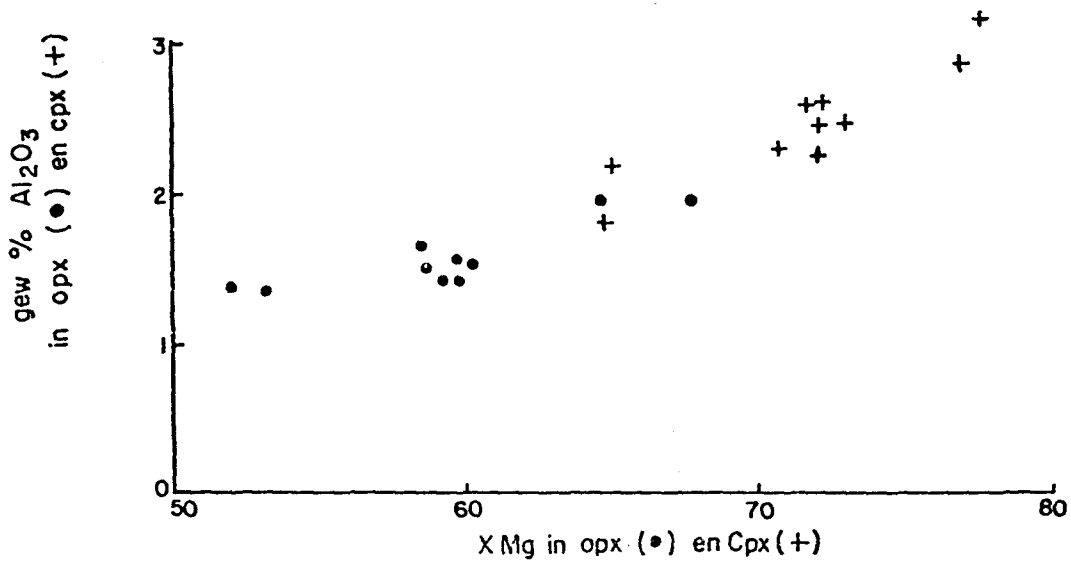
Die Mafiese gneis voldoen aan hierdie vereiste maar, soos reeds genoem, kan geen betekenis geheg word aan die waardes vir Al^{vi} en Al^{iv} in die samebestaande piroksene nie. Die rede hiervoor is moontlik hoofsaaklik te wyte aan die onakkurate mikrosonde-analises vir SiO_2 wat aanleiding gee tot wisselvallige en misleidende waardes vir Al^{iv} en Al^{vi} . Die analitiese gegewens vir totale Al_2O_3 in tabelle 34 en 35 kan egter steeds akkuraat wees, en hierdie waardes kan wel as 'n eerste benadering gebruik word om vas te stel of die samebestaande piroksene binne dieselfde drukinterval gekristalliseer het (Wilson, 1976, Fig. 2). Laasgenoemde

figuur illustreer 'n noue verwantskap tussen die massapersentasie Al_2O_3 in samebestaande piroksene en die ooreenstemmende XMg ($100 \cdot \text{MgO}/\text{MgO}+\text{FeO}$ as massapersent). Die positiewe korrelasie tussen hierdie twee waardes lê egter by 'n hoër aluminiuminhoud vir piroksene wat by hoë druk gekristalliseer het, en daar is ook 'n opvallende breuk in die neigings vir samebestaande piroksene.

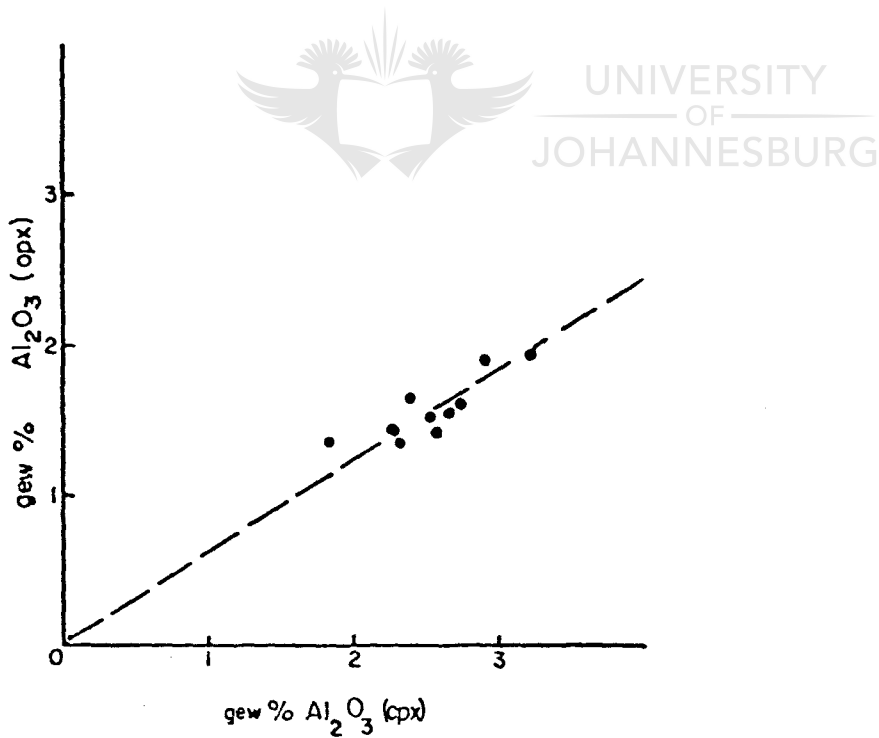
Die samestelling van die samebestaande piroksene in die huidige ondersoek word op 'n soortgelyke diagram in figuur 47a geïllustreer. Die lineêre verwantskap tussen die aluminium-inhoud van piroksene en XMg is onmiddellik opvallend. Die massapersent Al_2O_3 neem reëlmatig toe met 'n toename in XMg vanaf 1,34 persent in hipersteen tot 3,2 persent in ougiet. Die enigste logiese verklaring hiervoor is dat die samestelling van die twee piroksene grootliks afhanklik van mekaar is. 'n Verdere uitvloeisel hiervan is dat hipersteen en ougiet in chemiese ewewig met mekaar is en dus binne dieselfde PT-interval gekristalliseer het. Hierdie voorstel word ondersteun deur die lineêre verwantskap tussen die aluminium-inhoud van die twee piroksene (Figuur 47b), en ook deur die gebrek aan betekenisvolle kruisende verbindingslyne in figuur 46.

Bogenoemde inligting is 'n aanduiding dat die Al_2O_3 -inhoud van piroksene nie deur die beskikbaarheid van aluminium in die moedergesteentes beheer word nie. Dit word in figuur 48 geïllustreer. Uit hierdie figuur is dit duidelik dat die aluminiuminhoud van beide hipersteen en ougiet effens afneem met 'n toename in aluminium van die gesteentes.

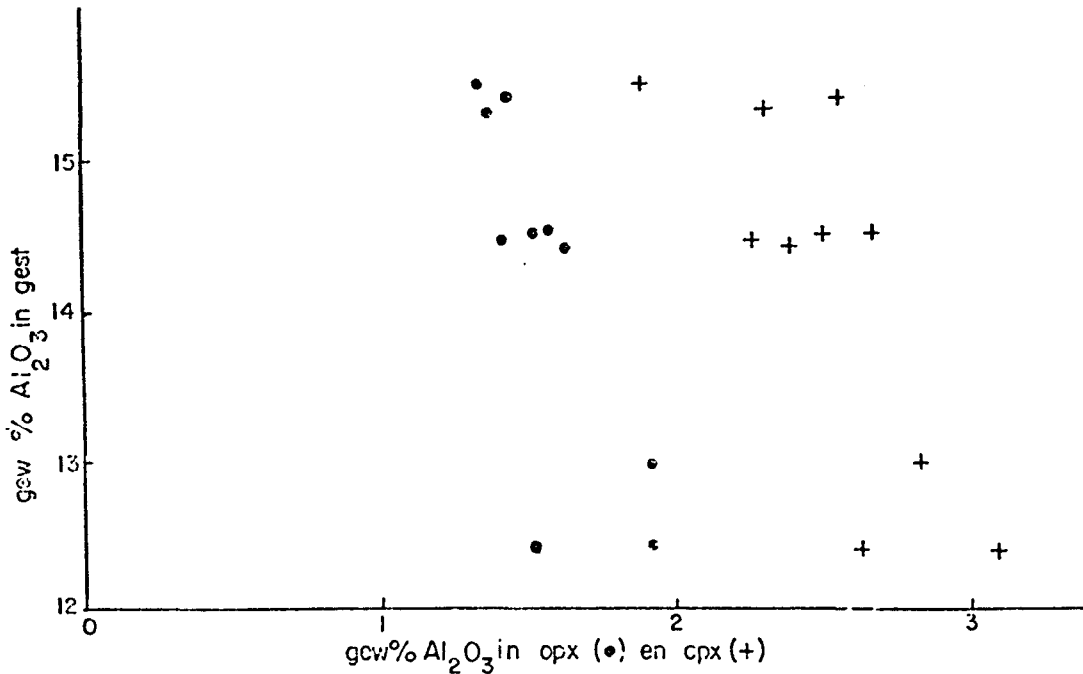
'n Algemene gebrek aan 'n duidelike korrelasie tussen die Al_2O_3 -inhoud van piroksene en die moedergesteentes is ook vir die Pelitiese gneis geïllustreer (Fig. 27b). In laasgenoemde geval is die verwantskap egter meer kompleks en die Al_2O_3 -inhoud van hipersteen is ook nie gekoppel aan die ooreenstemmende XMg nie (Fig. 27a).



Figuur 47a : Gewigspersentasie Al_2O_3 gestip teen XMg (gewigspersentasie) vir samebestaande piroksene van die Mafiese gneis



Figuur 47b : Reëlmatige verwantskap tussen die Al_2O_3 -inhoud van samebestaande piroksene in die hipersteen-ougietgranoliet



Figuur 48 : Verwantskap tussen die Al_2O_3 -inhoud van samebestaande piroksene en die Al_2O_3 -inhoud van die hipersteenoogietgranoliet

Die gegewens in tabel 36 is 'n verdere aanduiding dat die aluminiuminhoud van piroksene afhanklik is van die geassosieerde minerale in die gesteente.

Tabel 36 Opsomming van gemiddelde waardes vir die massapersent Al_2O_3 in piroksene en in die ooreenstemmende moedergesteentes vir die Pelitiese en Mafiese gneis

Gesteentetipe	Piroksene		Gesteente
	ortopiroksene	klinopiroksene	
Pelitiese gneis			15,9
1. Ortopirokseensone	5,99		
2. Ortoamfiboolsone	3,10		
Mafiese gneis			14,2
1. Ortopirokseensone	1,57	2,52	
2. Ortoamfiboolsone		1,52	

Die gemiddelde aluminiumhoud van die twee verskillende gesteentetipes in hierdie tabel verskil selgs met 1,7 massapersent en tog is die aluminiumhoud van die piroksene grootliks verskillend. Dit is verder ook duidelik dat die aluminiumhoud van die piroksene in beide die Pelitiese en Mafiese gneis afneem met 'n afname in die graad van metamorfose. Dit is dus duidelik dat die samebestaande minerale, en die reaksieverwantskappe tussen hierdie minerale, 'n groot invloed uitoefen op die Al_2O_3 -inhoud van die piroksene.

2.3 PLAGIOKLAAS

Mikrosonde analyses vir plagioklaas in vyf monsters van die hipersteen-ougietgranoliete en drie monsters van die amfiboliete word in tabel 37 gegee.

Die samestelling van plagioklaas verskil redelik baie van een monster na 'n ander in die verskillende metamorfe sones. Die mees opvallende waarneming wat egter met verwysing na tabel 37 (en Tabel 5, Afd. IV-2.1) gemaak kan word is dat beide die hoeveelheid plagioklaas, en die anortietinhoud van plagioklaas, opvallend toeneem vanaf die Ortoamfibool-sone na die Ortopirokseensone. Hierdie verandering in die samestelling en hoeveelheid plagioklaas met oorgang van die een metamorfe sone na die ander is reeds in figuur 16 geïllustreer en kan gekoppel word aan die reaksie waarin samebestaande hornblende en kwarts afbreek om pirokseen te vorm. Hierdie reaksie word meer volledig in afdeling VII-2.2.2.1(b) bespreek.

TABEL 37 Mikrosonde analises van plagioklaas in die hipersteen-ougieelgranoliete (a) en amfiboliete (b)

Monster- nommer	DR.55 ^a	M.109 ^a	M.315 ^a	M.201 ^a	M.194 ^a	DR.176 ^b	DR.171 ^b	M.471 ^b
Kolom	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	52,89	58,15	53,65	51,43	57,39	61,43	60,54	54,84
Al ₂ O ₃	28,98	26,27	29,05	30,62	26,67	23,97	24,41	27,30
FeO ^x	0,08	0,04	0,06	0,10	0,07	0,04	-	0,06
CaO	12,08	8,50	12,27	13,98	9,19	5,54	6,06	10,15
MnO	0,02	0,02	0,02	0,01	-	0,01	-	0,01
Na ₂ O	4,66	6,81	4,85	3,85	6,44	8,85	8,49	6,09
K ₂ O	0,19	0,31	0,10	0,10	0,30	0,26	0,19	0,12
TOTAAL	98,90	100,09	100,00	100,09	100,08	100,14	99,69	98,56

Formule bereken op 'n basis van 32 suurstofatome

Si	9,689	10,412	9,718	9,358	10,301	10,921	10,817	10,035
Al	6,258	5,546	6,203	6,568	5,644	5,021	5,142	5,890
TOTAAL	15,947	15,958	15,921	15,926	15,945	15,945	15,959	15,925
Fe	0,012	0,006	0,009	0,015	0,011	0,006	-	0,009
Ca	2,371	1,631	2,381	2,726	1,768	1,055	1,160	1,990
Mn	0,003	0,003	0,003	0,002	-	0,002	-	0,002
Na	1,656	2,364	1,703	1,358	2,241	3,061	2,942	2,160
K	0,044	0,071	0,023	0,023	0,069	0,059	0,033	0,028
TOTAAL	4,086	4,075	4,119	4,121	4,089	4,183	4,145	4,189
Ab	41,8	58,14	41,50	33,10	54,95	73,30	71,00	51,70
An	58,28	40,10	57,97	66,40	43,40	25,30	28,00	47,60
Or	1,07	1,80	0,60	0,60	1,70	1,40	1,00	0,67

* Yster as totale FeO

Analitikus : Anglo American Navorsingslaboratorium

AFDELING V11

CHEMIESE ONDERSOEK

VAN DIE

EWEWIGSVERWANTSKAPPE



INDIVIDUELE MINERAALPARE

1. ALGEMEEN

Teksturele en mineralogiese inligting gebaseer op die petrografiese ondersoek van die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie het positiewe bywyse gelewer vir 'n komplekse metamorfe geskiedenis van die Limpopo-metamorfekompleks suid van die Soutpansberge (Afd. IV-3). Die polimetamorfe karakter van hierdie gebied kan in terme van drie opeenvolgende periodes van metamorfose beskryf word (Tabel 6, Afd. IV-3). Die ooreenstemmende fisiese toestande kan egter slegs afgelei word indien die ewewigsverwantskappe van minerale en mineraalversamelings tydens opeenvolgende periodes van metamorfose in detail uit 'n chemiese oogpunt ondersoek kan word.

Die kwantitatiewe ondersoek van chemiese ewewig in metamorfe gesteentes word deur verskeie probleme beperk. Zen (1963) het byvoorbeeld daarop gewys dat verskeie kriteria wat algemeen vir ewewig aangevoer word op negatiewe inligting gebaseer is. Voorbeelde hiervan is die afwesigheid van chemies onversoenbare minerale en die toepassing van die fasereël. Beide hierdie benaderings voorsien nodige, maar nie voldoende bewyse vir ewewig nie. 'n Verdere probleem is dat die afwesigheid van teksturele ewewig in gesteentes nie vanselfsprekend 'n bewys is dat die minerale ook nie in chemiese ewewig is nie (Zen, 1963, p. 939).

Een van die belangrikste bydraes wat Zen (1963, p. 936) egter tot die studie van chemiese ewewig in metamorfe gesteentes gemaak het is dat die identifikasie van fases in 'n fisies-chemiese sin verskil van die eenvoudige petrografiese identifikasie van al die minerale wat in 'n gesteente teenwoordig is. Die meeste mineraalversamelings in metamorfe gesteentes vertoon tekens van prograad of retrograad verandering, en dit is dus uiters belangrik om vas te stel watter spesifieke versameling verteenwoordigend is van die hoof-ewewig in 'n spesifieke gesteentetipe. In die geval

van komplekse mineraalversamelings kan waardevolle inligting dus verkry word deur die groter sisteem in sub sisteme onder te verdeel. Die ewewigstoestand van 'n sub sisteem is onafhanklik van die teenwoordigheid van addisionele komponente en fases in die totale sisteem indien die komponente van hierdie sub sisteem akkuraat geïdentifiseer kan word. Dit beteken dat indien 'n sub sisteem in ewewig is, die kans goed is dat die totale sisteem ook in ewewig is. Die praktiese implikasies van so 'n benadering is duidelik aangesien 'n sub sisteem natuurlik minder kompleks as die totale sisteem is en gevolglik kan faseverwantskappe meer akkuraat in so 'n sisteem ondersoek word.

In die petrografiese ondersoek van veral die kordiëriet-granaatgranoliete is daar gewys dat hierdie gesteentes nooit volledig in terme van slegs een ewewigsversameling beskryf kan word nie (Afd. IV-1.2.1). Daar is verder op grond van petrografiese inligting voorgestel (Tabel 6, Afd. IV-3) dat die hoof-ewewig tydens die tweede periode van metamorfose (M_2) deur kordiëriet+granaat+hipersteen in die koronateksture (Fig. 11, Afd. IV-1.2.1) verteenwoordig word. Die vraag is egter of hierdie voorstel ook in ooreenstemming is met die beskikbare chemiese inligting.


Die teenwoordigheid van, of gebrek aan, chemiese ewewig in die Pelitiese en Mafiese gneis van die Bandelierkop-Formasie sal eers uit 'n algemene oogpunt beskou word voordat daar oorgegaan word tot die kwantitatiewe ondersoek van die detail ewewigsverwantskappe van individuele mineraalpare.

1.1 INLIGTING TEN GUNSTE VAN AFWYKINGS VANAF CHEMIESE EWEWIG

Die volgende tekstorele en chemiese inligting is 'n aanduiding van veranderende ewewigstoestande in die Pelitiese gneis.

- (i) die reaksie waarin granaat afbreek om kordiëriet en hipersteen gedurende M_2 te vorm (Fig. 11, Afd. IV-1.2.1);
- (ii) die vergroeiing van biotiet met kianiet, en spinel met kordiëriet, in die Ortopirokseensone (Fig. 8a en Fig. 12a-c, Afd. IV-1.2.1);
- (iii) die hidrasie van kordiëriet en hipersteen tydens M_3 (Fig. 14, Afd. IV-1.2.2);
- (iv) die sonering van kordiëriet en granaat (Tabelle 12b en 16, Afd. VI);
- (v) variasies in die samestelling van biotiet, en in 'n mindere mate, ook van ortoamfibool, in dieselfde gesteente (Tabelle 23 en 28, Afd. VI).

1.2 INLIGTING TEN GUNSTE VAN CHEMIESE EWEWIG

- 
- (i) die meeste monsters vertoon baie vars en die meeste minerale besit duidelike en skoon korrelgrense;
 - (ii) die betrokke mineraalversamelinge word algemeen in die literatuur beskryf;
 - (iii) geen versamelings wat op fisies-chemiese gronde as onversoenbaar beskou kan word is geïdentifiseer nie;
 - (iv) die verandering in mineralogie van die Pelitiese gneis oor die Ortopirokseenreaksie-isograad is in ooreenstemming met wat algemeen verwag sal word (Afd. IV-1.2.2);
 - (v) die sistematiese variasie in die samestelling van granaat, biotiet en hornblende oor die Ortopirokseenisograad is in ooreenstemming met dit wat algemeen in die literatuur beskryf word (Afd. VI);
 - (vi) die chemiese samestelling van wurmagtige hipersteen in die reaksiekoronas verskil nie opvallend van die

groot kristalle nie (Tabel 19, Afd. VI);

- (vii) sonering in kordiëriet en granaat is baie sistematies, en die samestelling van enkelminerale (met uitsondering van biotiet) verskil nie opvallend van een korrel na 'n ander in dieselfde gesteente nie (Afd. VI);
- (viii) die mees positiewe bewys vir 'n algemene neiging tot chemiese ewewig tydens beide die tweede en derde periodes van metamorfose word egter deur die wye verspreiding van die M_2 -korona-assosiasie van kordiëriet, granaat en hipersteen in die Ortopirokseensone, en deur die goed gedefinieerde karakter van die M_3 -Ortopirokseenreaksie-isograad geïllustreer.

Die belangrikste kenmerk van die Pelitiese gneis is dat die kordiëriet-granaatgranoliete nooit volledig in terme van een mineraalversameling beskryf kan word nie. Die koronateksture vorm 'n baie opvallende subversameling in hierdie gesteentes en besit, soos reeds genoem, 'n wye verspreiding in die Ortopirokseensone. Dit is dus belangrik om die ewewigsverwantskappe van kordiëriet, granaat en hipersteen in hierdie assosiasie in meer detail te ondersoek. Dieselfde geld ook vir die teenwoordigheid van meer as een tipe ortoamfibool in die Pelitiese gneis van die Ortoamfiboolsone, sowel as die teenwoordigheid van hornblende in die hipersteen-ougietgranoliet. Die elementverdelingsteorie voorsien in hierdie opsig die mees aanvare bewyse vir die teenwoordigheid of afwesigheid van chemiese ewewig in metamorfe gesteentes.

2. DIE ELEMENTVERDELINGSTEORIE

Die elementverdelingsteorie, en die toepassing van hierdie teorie in die studie van chemiese ewewig, word volledig

bespreek deur onder andere Kretz (1959 en 1961) en Mueller (1961) en word nie hier herhaal nie. Dit is voldoende om daarop te let dat die teorie gebaseer is op die vereiste dat die chemiese potensiaal van 'n komponent dieselfde moet wees in al die samebestaande fases in 'n gesteente indien hierdie fases onderling in ewewig is. Indien Fe en Mg ideale oplossings in byvoorbeeld kordiëriet en granaat vorm kan die chemiese potensiaal van hierdie komponente as 'n funksie van die konsentrasie (of mol fraksie) van Fe en Mg in kordiëriet en granaat beskou word.

Vir ideale oplossings kan die volgende uitdrukking dus vir die verdeling van MgO en FeO tussen kordiëriet en granaat geskryf word:

$$K_d \text{ MgO-FeO} = \left(\frac{x_{\text{Fe}}^{\text{Gran}} \cdot x_{\text{MgO}}^{\text{Kord}}}{x_{\text{Mg}}^{\text{Gran}} \cdot x_{\text{Fe}}^{\text{Kord}}} \right)$$

waar $X = \text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$ mol %, en K_d is die verdelingskoëffisiënt.

Die $\text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$ -verhouding in samebestaande kordiëriet en granaat sal 'n reëlmatige verdelingslyn op 'n verdelingsdiagram definieer indien die volgende geld:

- (i) die samebestaande fases is onderling in ewewig met mekaar;
- (ii) die verdeling is ideaal en word dus nie beïnvloed deur die teenwoordigheid van addisionele komponente in een of beide van die fases nie. Die X-term in die vergelyking vir die verdelingskoëffisiënt kan egter vir addisionele komponente (bv. Mn in granaat) kompenseer indien hierdie komponente in klein konsentrasies teenwoordig is;
- (iii) die temperatuur en druk is konstant in die gebied onder bespreking of het geen invloed op die verde-

lingskoëffisiënt nie.

Dit is egter belangrik om daarop te let dat die voorgestelde verdelingsmodel onvoldoende kan wees indien die kristallyne oplossings grootliks afwyk vanaf idealiteit. 'n Voorbeeld is die substitusie van Ca^{+2} of Mn^{+2} op 'n groot skaal in almandietryke granaat, en die substitusie van Ti^{+4} in biotiet.

Die verdeling van MgO en FeO tussen mineraalpare kan as gevolg van die teenwoordigheid van addisionele komponente aan die hand van verskeie molekulêre (of atomiese) verhoudings ondersoek word. Hierdie verhoudings wissel vanaf sogenaamde totale verhoudings (bv. Mg^{+2} /som van die oktaëdriese katione), tot gedeeltelike verhoudings soos $\text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$. Dit is nie moontlik om op teoretiese gronde te besluit watter spesifieke verhouding die beste weergawe gaan wees van die aktiwiteit van 'n element in 'n spesifieke mineraalpaar nie. Saxena (1968b) het byvoorbeeld voorgestel dat totale verhoudings die verstrooiing van verdelingspunte op 'n verdelingsdiagram vir granaat en hipersteen grootliks verbeter. Davidson en Mathison (1973) het egter gevind dat die verdeling van MgO en FeO tussen mangaanryke granaat en mangaanryke hipersteen onafhanklik is van die teenwoordigheid van MnO.

In die bespreking wat volg word die volgende konvensie vir die berekening van die verdelingskoëffisiënt gebruik (Kretz, 1961). Let daarop dat molekulêre verhoudings deurgaans gebruik word.

$$\frac{X_{\text{Mg}}^a (1-X_{\text{Mg}}^b)}{X_{\text{Mg}}^b (1-X_{\text{Mg}}^a)} = \left(\frac{\text{MgO}}{\text{FeO}}\right)^a \cdot \left(\frac{\text{MgO}}{\text{FeO}}\right)^b = K_d \text{ MgO-FeO } (a-b)$$

waar $X = \text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$ (mol %), en a en b die twee fases verteenwoordig.

Hierdie verdelingskoëffisiënt is dus gebaseer op die veronderstelling dat MgO en FeO ideale oplossings in die betrokke fases vorm sodat slegs een van bogenoemde komponente 'n onafhanklike chemiese parameter is. X_{Fe} is dus gelyk aan $1-X_{Mg}$ en $K_d = \left(\frac{MgO}{FeO}\right)^a \cdot \left(\frac{MgO}{FeO}\right)^b$.

Die elementverdelingsteorie word in hierdie ondersoek toegepas om die ewewigsverwantskappe tussen individuele mineraalpare in meer detail te ondersoek. Die inligting wat uit hierdie ondersoek verkry word kan dan as 'n basis gebruik word vir die opstel van 'n ewewigsmodel (of modelle) vir hoëgraadse metamorfose in die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfekompleks. Hierdie ondersoek is egter ook van meer algemene belang aangesien die inligting 'n bydrae kan lewer tot die beskikbare kennis van die verdeling van MgO en FeO tussen mineraalpare in hoëgraadse metamorfe terreine. Vir hierdie doel word berekende verdelingskoëffisiënte deurgaans met beskikbare inligting uit die literatuur vergelyk.

2.1 VERDELING VAN MgO EN FeO TUSSEN SAMEBESTAANDE KORDIËRIET+GRANAAT+HIPERSTEEN+BIOTIET+ORTOAMFIBOOL IN DIE PELITIESE GNEIS VAN DIE BANDELIERKOP-FORMASIE

Die Pelitiese gneis besit 'n wye verspreiding in die gebied onder bespreking en is soos reeds genoem by uitstek geskik vir 'n ondersoek van die ewewigsverwantskappe van individuele mineraalpare gedurende opeenvolgende periodes van metamorfose.

In die bespreking wat volg word hoofsaaklik aandag gegee aan die verdeling van MgO en FeO tussen samebestaande kordiëriet, granaat, hipersteen, biotiet en ortoamfibool. Gerieflikheidshalwe word bogenoemde mineraalversamelings in twee groepe onderverdeel. Die eerste groep betrek kordiëriet, granaat en hipersteen terwyl die tweede groep,

bo en behalwe genoemde minerale, ook biotiet en ortoamfibool betrek. Die rede vir hierdie onderverdeling is tweërlei van aard: Kordiëriet, granaat en hipersteen verteenwoordig eerstens 'n baie opvallende reaksieverwantskap in die Ortopirokseensone. Hierdie reaksieverwantskap is heelwaarskynlik verteenwoordigend van die hoofewewig in die Ortopirokseensone en word derhalwe verkieslik afsonderlik bespreek. Die tweede rede vir hierdie onderverdeling is die variasie in die samestelling van biotiet in individuele monsters en die feit dat ortoamfibool beperk is tot die Ortoamfiboolsone.

2.1.1 Verdeling van MgO en FeO tussen samebestaande kordiëriet, granaat en hipersteen in die Pelitiese gneis van die Ortopirokseensone

Verdelingsgegevens vir bogenoemde minerale is hoofsaaklik beperk tot die Ortopirokseensone terwyl baie min inligting vir mineraalpare langs die Ortopirokseenisograad en uit die Ortoamfiboolsone beskikbaar is. In die res van hierdie bespreking word daar dus hoofsaaklik aandag geskenk aan die ondersoek van die hoof-ewewigstoestand in eersgenoemde metamorfe sone soos weerspieël word deur samebestaande kordiëriet+granaat+hipersteen in die koronateksture. Die beskikbare inligting uit die ander twee metamorfe sones kan egter 'n aanduiding wees van die rigting waarin Kd-waardes met 'n afname in die graad van metamorfose verander en word gevolglik ook by die bespreking ingesluit.

2.1.1.1 Kordiëriet-Granaat

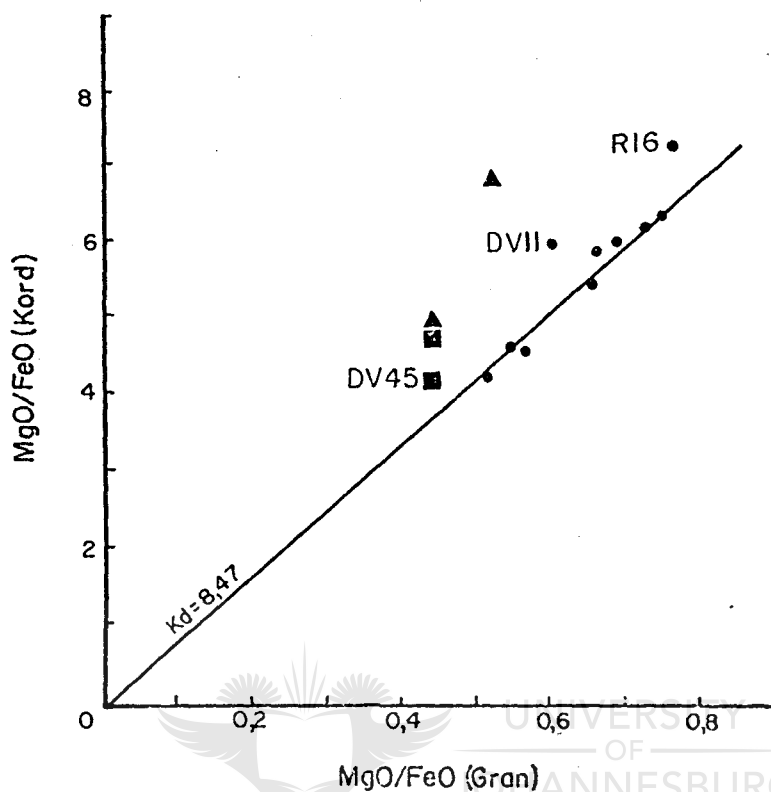
Chemiese analyses is beskikbaar vir samebestaande kordiëriet en granaat in tien verteenwoordigende monsters uit die Ortopirokseensone (Tabelle 11a en 13a). Hierdie monsters

word almal deur die koronateksture gekenmerk waarin granaat afbreek om kordiëriet en hipersteen te vorm. Kordiëriet besit 'n beperkte verspreiding langs die Ortopirokseensone, en is met een uitsondering (DV 45), ook nie 'n stabiele mineraal in die Ortoamfiboolsone nie. Monster DV 45 word deur die afwesigheid van ortoamfibool gekenmerk en bestaan uit granaat, kordiëriet, sillimaniet en biotiet. Verdelingsgegevens is verder beskikbaar vir twee monsters langs die Ortopirokseensone (DV 3 en DR 157 - Tabela 11b en 13b) en twee monsters uit die Ortoamfiboolsone (DV 45 en DV 26 - Tabela 11b en 13c).

Tekens van sonering in kordiëriet is waargeneem in ses van die tien monsters uit die Ortopirokseensone (Tabel 12b). Die sonering is egter uitsluitlik beperk tot 'n smal randsonesone in direkte kontak met granaat. In Afdeling VI-1.2.3.1 is voorgestel dat hierdie waargenome sonering van kordiëriet in die koronateksture waarskynlik toegeskryf kan word aan ioonuitruilingsreaksies wat plaasgevind het nadat die M_2 -reaksie, $\text{granaat} + \text{kwarts} \rightleftharpoons \text{kordiëriet} + \text{hipersteen}$, volledig verloop het. Granaat besit 'n homogene samestelling en tekens van sonering is slegs in twee van die tien monsters waargeneem (MX en DR 80, Tabel 16). Verdelingsgegevens word dus slegs bespreek vir die kernsamestelling van kordiëriet in kontak met groot granaatkristalle. In die twee gevalle van sonering (MX en DR 80) is die randsamestelling van granaat gebruik.

Die verdeling van MgO en FeO tussen kordiëriet (kern) en granaat in die kordiëriet-granaatgranoliete word in figuur 49 geïllustreer. Die verdeling is baie reëlmatig in die geval van agt van die tien monsters en definieer 'n verdelingslyn met $K_d \text{ MgO-FeO (kord-gran)} = 8,47$. Hierdie inligting is 'n goeie aanduiding dat samebestaande kordiëriet en granaat in die koronateksture 'n toestand van chemiese ewewig binne 'n beperkte PT-interval definieer. Twee van die tien monsters in figuur 49 vertoon egter opvallende afwykings vanaf hierdie reëlmatige verdelingslyn. Die ver-

klaring hiervoor word moontlik deur die voorkoms van kordiëriet in hierdie twee monsters gegee.



Figuur 49 Verdeling van MgO en FeO (mol %) tussen kordiëriet en granaat in die Pelitiese gneis

- = kordiëriet (kern)-granaat in koronateksture van die Ortopirokseensone; ▲ = kordiëriet-granaat van die Ortopirokseenisograad (DV 3, DR 157);
- = kordiëriet-granaat (rand) van die Ortoamfiboolsone (DV 26, DV 45).

Monster DV 11 word gekenmerk deur opvallende tekens van die hidrasiereaksie waarin kordiëriet besig is om af te breek na gedriet en kianiet. In die geval van monster R 16 is kordiëriet weer grootliks beperk tot 'n wurmagtige vergroeiing met kwarts wat besig is om beide plagioklaas en granaat te vervang (Fig. 13a). Samebestaande kordiëriet en granaat in monsters DV 11 en R 16 is dus nie verteenwoordigend van die ewewigstoestand soos weerspieël word deur samebestaande kordiëriet en granaat in die res van die gesteentes in figuur 49 nie. Dit is egter interessant om daarop te let dat die K_d -waarde vir hierdie twee monsters en vir monster DV 45 uit die Ortoamfiboolsone nagenoeg dieselfde is

(Fig. 49) - laasgenoemde monster verteenwoordig die enigste voorbeeld uit die Ortoamfiboolsonne waarin kordiëriet 'n stabiele fase is. Die twee monsters van die Ortopirokseen-isograad (DV 3 en DR 157) en die oorblywende monster uit die die Ortoamfiboolsonne (DV 26) word egter deur heelwat hoër Kd-waardes vir kordiëriet en granaat gekenmerk. Al drie laasgenoemde monsters illustreer egter gevorderde stadiums in die hidrasie van kordiëriet (Fig. 14a, Afd. IV-1.2.2).

a. Bespreking

Die berekende gemiddelde verdelingskoëffisiënt van 8,47 vir samebestaande kordiëriet en granaat word in tabel 38 met ooreenstemmende Kd-waardes uit die literatuur vergelyk en stem goed ooreen met die waardes van 5-10 vir natuurlike gesteentes.



Tabel 38 Gemiddelde Kd-waardes vir samebestaande kordiëriet en granaat in hoër-gradue regionale metamorfe terreine

Verwysing	Kd	T ^o C	Opmerking
Dallmeyer en Dodd (1971)	9,10	700-750	Kord-Grøn-Sill
Dougen (1974)	4,97	725-800	Grøn-Kord-Hip
Harris (1976)	9,63	650-750	Grøn-kord-Biot
Henry (1974)	6,19-6,57	720-750	Grøn-kord-spinel
Hess (1971)	6,2-9,4	700-750	Grøn-kord-Sill
Kays en Medaris (1976)	5,61-8,05	600-750	Grøn-kord-Sill
Reinhardt (1968)	5,21	-	Grøn-kord-Sill-(Hip)
Gable en Sims (1969)	6,94-12,5	640-710	Grøn-kord-Sill
Wynn-Edwards en Hay (1963)	4,75	-	Grøn-kord-Sill
Lal en Moorhouse (1969)	5,9-8,30	-	kord-Grøn-gedriet
Currie (1971)	[3,2 tot 12,8	600 tot 900	Ekperimenteel
Hensen en Green (1973)	[3 tot 5	1,100 tot 900	Ekperimenteel
<u>Huidige ondersoek</u>	8,47	800	kord-Grøn-Hiperateen

Die maontlike invloed van temperatuur op K_d MgO-FeO (kord-gran) is 'n probleem wat tot op datum nog nie bevredigend opgelos is nie. Currie (1971, 1974) het voorgestel dat K_d MgO-FeO toeneem met 'n toename in temperatuur. Hensen en Green (1973) het egter die teenoorgestelde voorgestel. Bogenoemde voorstelle is in albei gevalle hoofsaaklik op eksperimentele werk gebaseer (Tabel 38). Currie (1971) se eksperimentele werk is in 'n waterryke sisteem uitgevoer terwyl Hensen en Green (1973) van watervrye sisteme gebruik gemaak het. Wood (1973) het op grond hiervan voorgestel dat die kontrasterende resultate van Currie en Hensen en Green in ooreenstemming gebring kan word deur middel van 'n model waarvolgens K_d (kord-gran) gekoppel is aan verskille in die waterinhoud van kordiëriet. Na aanleiding van hierdie model behoort die verdelingskoeffisiënt af te neem met toenemende temperatuur indien P_{H_2O} laag is, en toe te neem met toenemende temperatuur indien P_{H_2O} hoog is.

Thompson (1976) het natuurlike voorkomste van kordiëriet en granaat gekalibreer en op grond hiervan gewys dat K_d (kord-gran) afneem met toenemende temperatuur. Holdaway en Lee (1977) gee inligting wat in ooreenstemming is met die resultate van Hensen en Green, en van Thompson. Hulle gegewens is gebaseer op Thompson (1976) se resultate, en 'n metode waarvolgens natuurlike voorkomste van kordiëriet en granaat gegroepeer is as 'n funksie van die graad van metamorfose. Hierdie inligting word in tabel 39 opgesom.

Tabel 39 Gemiddelde K_d -waardes vir kordiëriet-granaat in gesteentes wat verteenwoordigend is van verskillende grade van metamorfose (Holdaway en Lee, 1977)

Graad van metamorfose	K_d (kord-gran)	Aantal analises
A 545°C	12,5 (10,87-14,7)	4
B -	-	-
C 680°C	7,30 (5,71-10,10)	39
D 760°C	5,61 (4,59-7,25)	48

Die toename en die graad van metamorfose vanaf A tot D in tabel 39 is hoofsaaklik 'n funksie van toenemende temperatuur. Druk speel 'n ondergeskikte rol wat in ooreenstemming is met die klein volumeverandering vir die ioon-uitruilingsreaksie tussen granaat en kordiëriet (Holdaway en Lee, 1977, p. 189).

Die inligting in tabel 39 is dus 'n aanduiding dat $Kd \text{ MgO-FeO}$ (kord-gran) vir natuurlike gesteentes toeneem met afnemende temperatuur. Dit is egter belangrik om daarop te let dat die Kd -waardes in tabel 39 grootliks oorvleuel by hoër grade van metamorfose en dat voldoende chemiese inligting ook slegs beskikbaar is vir die hoër grade van metamorfose.

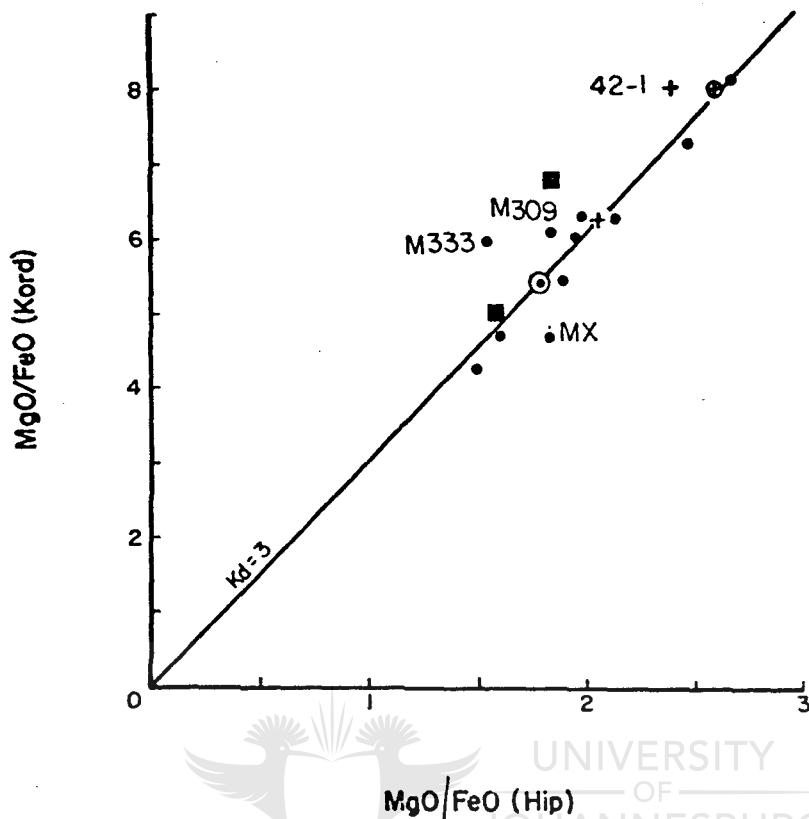
Die Kd -waardes vir kordiëriet en granaat in die huidige ondersoek stem nie heeltemal ooreen met die inligting in tabel 39 nie. Volgens hierdie inligting behoort 'n Kd -waarde van 8,47 verteenwoordigend te wees van die middel-amfiboliet graad van metamorfose wat gekenmerk word deur die teenwoordigheid van sillimaniet en afwesigheid van kaliumveldspaat in pelitiese gesteentes. Die teenwoordigheid van hipersteen in die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie is egter 'n positiewe bewys dat hierdie gesteentes tot die granulietfasies van metamorfose behoort. Hierdie probleem word later in hierdie afdeling bespreek.

Die toename in die Kd -waardes vir samebestaande kordiëriet en granaat in monsters van die Ortopirokseenisograad en uit die ortoamfiboolzone (Fig. 49) is egter moontlik in ooreenstemming met bogenoemde voorstel dat $Kd \text{ MgO-FeO}$ (kord-gran) toeneem met afnemende temperatuur.

2.1.1.2 Kordiëriet-Hipersteen

Verdelingsinligting vir MgO en FeO tussen kordiëriet en

hipersteen word in figuur 50 gegee.



Figuur 50 Verdeling van MgO en FeO (mol %) tussen kordiëriet en hipersteen in die Pelitiese gneis

- = kordiëriet (kern)-grofkorrelrige hipersteen
- ⊙ = kordiëriet-wurmagtige hipersteen in koronateksture van die kordiëriet-granaatgranoliet;
- + = kordiëriet-grofkorrelrige hipersteen en ⊕ = kordiëriet-wurmagtige hipersteen van die granaatvrye kordiërietgranoliete (DR 10 en DR 42-1)
- = kordiëriet-hipersteen van die Ortopirokseensisograad (OV 3 en DR 157).

Die gegewens in figuur 50 is gebaseer op die kernsamestelling van kordiëriet in kontak met hipersteen in twaalf monsters uit die Ortopirokseensone. Twee van hierdie monsters (DR 10 en DR 42-1) word deur die afwesigheid van granaat gekenmerk. Hipersteen is in al hierdie monsters teenwoordig as groot kristalle en ook as wurmagtige vergroeiings met kordiëriet. Gegewens vir beide voorkomswyses van hipersteen word in hierdie figuur gegee. Elf kordiëriet-hipersteenpare in nege van die twaalf monsters definieer 'n reëlmatige verdelingslyn met $Kd \text{ MgO-FeO (kord-hip)} = 3,0$.

Hierdie reëlmatige verdelingskoëffisiënt is 'n goeie aanduiding dat kordiëriet en hipersteen nie slegs in ewewig is nie, maar dat hierdie ewewigstoestand grootliks onafhanklik is van die voorkomswyse van hipersteen en die teenwoordigheid of afwesigheid van granaat. Die anomale posisie van drie monsters in hierdie figuur is nie duidelik nie. Geen een van hierdie drie monsters (MX, M 333 en M 309) het egter afgewyk van die verdelingslyn in die kordiëriet-granaatdiagram van figuur 49 nie, en dit lyk dus asof die huidige afwyking gekoppel is aan die samestelling van hipersteen. Die voorkomswyse van hipersteen in hierdie drie monsters verskil egter nie petrografies van dié in die res van die gesteentes nie. Die twee monsters langs die Ortopirokseenisograad (DV 3 en DR 157) word ook deur hoër Kd-waardes as in die geval van die gemiddelde verdelingslyn gekenmerk.

a. Bespreking



UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG

Kordiëriet en hipersteen vorm nie 'n baie algemene assosiasie in die natuur nie, en toepaslike verdelingsgegevens vir hierdie twee minerale is gevolglik skaars. Dit geld veral vir regionale metamorfe terreine. Die beskikbare eksperimentele en natuurlike inligting word in tabel 40 opgesom.

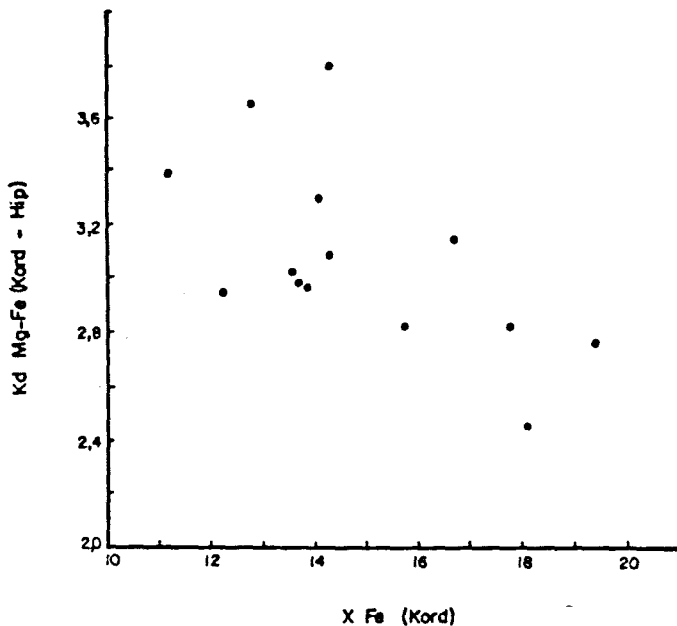
Die verdelingskoëffisiënt van 3 stem goed ooreen met die waardes van 1,7 tot 4,30 vir natuurlike gesteentes.

Holdaway (1976) het op grond van eksperimentele resultate voorgestel dat die verdeling van MgO en FeO tussen kordiëriet en hipersteen nie ideaal is nie maar afhanklik is van die ysterinhoud van kordiëriet. 'n Toename in die ysterinhoud van kordiëriet sal weerspieël word deur 'n ooreenkomstige afname in Kd MgO-FeO (Tabel 40). Die inligting in tabel 40 stem in die algemeen ooreen met hierdie voorstel.

Tabel 40 Kd-waardes vir samebestaande kordiëriet en hipersteen uit die literatuur. $X_{Fe}(\text{kord}) = 100 \cdot Fe^{+2} / (Fe^{+2} + Mg)$

Verwysing	Kd	XFe (kord)	Opmerking
Reinhardt (1968)	2,70	17,6	kord-Gran-Hip
Dougan (1974)	1,60	37,3	kord-Gran-Hip
Davidson en Mathison (1974)	2,43	?	kord-Gran-Hip
Vernon (1972)	4,3	10,2	kord-Hip-Ortoanf
Rabkin (1968)	3,54	10,0	kord-Hip-Biot
Hensen en Green (1972)	1,7-2,3	?	Eksperimenteel
Hsu en Burnham (1969)	3,3	< 30	Eksperimenteel
Holdaway (1976)	2,13	0	Eksperimenteel
	2,0	30	Eksperimenteel
	1,43	60	Eksperimenteel
<u>Huidige ondersoek</u>	3,0	14,8 (11-19,4)	kord-Gran-Hip.

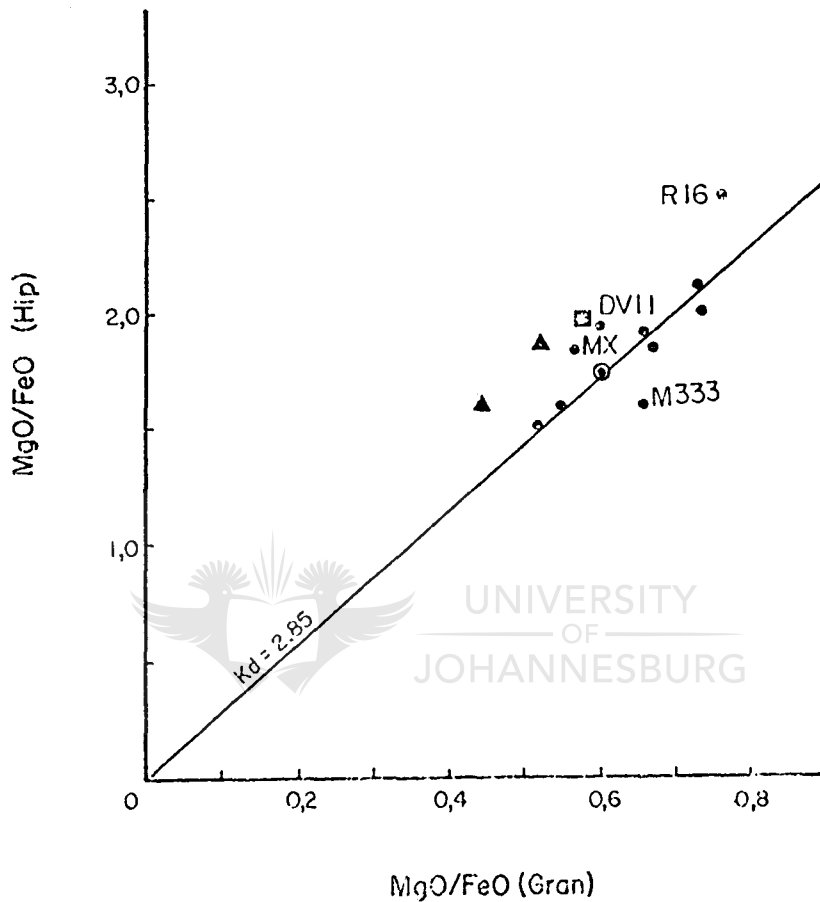
Die variasie in die ysterinhoud van kordiëriet in die huidige ondersoek (Tabel 40) skep 'n geleentheid om bogenoemde voorstel aan die hand van natuurlike gesteentes te ondersoek. Die toepaslike inligting in figuur 51 illustreer moontlik 'n sistematiese afname in Kd MgO-FeO met 'n ooreenstemmende toename in XFe kord. Die korrelasie is egter nie goed nie en het heelwaarskynlik slegs 'n geringe invloed op die verstrooiing van verdelingspunte in figuur 50.



Figuur 51 Korrelasie tussen die $Fe^{+2} / (Fe^{+2} + Mg)$ -verhouding van kordiëriet en Kd (kord-hip) van die Pelitiese gneis.

2.1.1.3 Hipersteen-Granaat

Figuur 52 illustreer die verdeling van MgO en FeO tussen samebestaande hipersteen en granaat.



Figuur 52 Verdeling van MgO en FeO (mol %) tussen hipersteen en granaat in die Pelitiese gneis

● = hipersteen-granaat in koronateksture van die kordiëriet-granaatgranoliet; ◎ = hipersteen-granaat van die kordiërietvrye granaatgranoliet (DR 42-2). ▲ = hipersteen-granaat van die kordiërietryke granoliete van die Ortopirokseenisograad (DV 3 en DR 157); ■ = hipersteen-granaat van die kordiërietvrye granoliete van die Ortopirokseenisograad (DV 34 en DV 38).

Die inligting in figuur 52 is gebaseer op hipersteen in kontak met groot granaatkristalle in elf monsters uit die Ortopirokseensone. Een van hierdie monsters (DR 42-2) word deur die afwesigheid van kordiëriet gekenmerk. Alhoewel daar 'n redelike verstrooiing van datapunte in hierdie figuur

is bestaan daar tog 'n reëlmatige verdeling vir sewe van die elf pare. Die anomale posisie van twee van die punte (M 333 en MX) is soortgelyk as in die geval van figuur 50, terwyl die ander twee monsters ook in figuur 50 afgewyk het. Verdélingsgegewens vir drie monsters (DV 38, DV 3 en DR 157) van die Ortopirokseenisograad word ook in dieselfde figuur gegee. Dit is verder ook interessant dat die Kd-waardes vir laasgenoemde monsters dieselfde is as vir monsters DV 11 en R 16 uit die Ortopirokseensone. (kyk Fig. 50).

a. Bespreking

Verdelingsgegewens vir MgO en FeO tussen hipersteen en granaat uit die literatuur word in tabel 41 opgesom.

Die berekende Kd-waarde vir samebestaande hipersteen en granaat stem dus goed ooreen met die beskikbare inligting uit die literatuur (Tabel 41).

Tabel 41 Kd MgO-FeO vir samebestaande hipersteen en granaat uit die literatuur

Verwysing	Kd MgO-FeO	Opmerking
Davidson en Mathison (1974)	2,72	kord-Gran-Hip
Davidson en Mathison (1973)	3,57	kord-Gran-Hip
Kretz (1961)	2,29-6,43	granoliete uit literatuur
Rabkin (1968)	1,68	kord-Gran-Hip
Dougan (1974)	2,93-3,4	kord-Gran-Hip
Holdaway (1976)	3,35	Eksperimenteel
Hensen en Green (1971)	2,0	Eksperimenteel
<u>Huidige ondersoek</u>	2,85	kord-Gran-Hip

2.1.1.4 Interpretasie van verdélingsgegewens vir samebestaande kordiëriet, granaat en hipersteen uit die Ortopirokseensone

Die hoofewig tussen kordiëriet, granaat en hipersteen word

in alle gevalle gedefinieer deur die verdeling van MgO en FeO tussen die kernsamestelling van kordiëriet en samebestaande hipersteen en granaat in die koronateksture (Figure 49, 50 en 52). Die waargenome reëlmatige verdeling van die meeste datapunte in hierdie figure is dus 'n goeie aanduiding dat kordiëriet, granaat en hipersteen 'n toestand van chemiese ewewig binne 'n beperkte PT-interval in die Ortopirokseensone weerspieël. Die waargenome afwykings vanaf hierdie reëlmatige verdeling is glad nie verbasend nie indien daar in gedagte gehou word dat die betrokke monsters oor 'n baie groot gebied versprei is, en dat individuele monsters tot 115 km van mekaar versamel is (Figuur 22). Meer belangrik, egter, is dat al hierdie monsters gekenmerk word deur die koronareaksie waarin granaat besig is om af te breek na kordiëriet en hipersteen (Fig. 11). Hierdie reaksie is gekoppel aan die M_2 -periode van metamorfose (Tabel 6, Afd. IV-3), en is 'n duidelike bewys vir veranderende ewewigstoestande in die gebied onder bespreking. Die waargenome wydverspreide ewewig tussen kordiëriet, granaat en hipersteen in hierdie koronateksture kan gekoppel word aan die deurlopende karakter van die betrokke reaksie (Afd. IV-1.2.1.1a). Die huidige inligting is nie in ooreenstemming met die voorstelle van Hollister (1977, p. 228) en Loomis (1975) dat slegs die randsamestelling van granaat, wat besig is om in 'n reaksie af te breek, in chemiese ewewig met die reaksieprodukte kan wees nie.

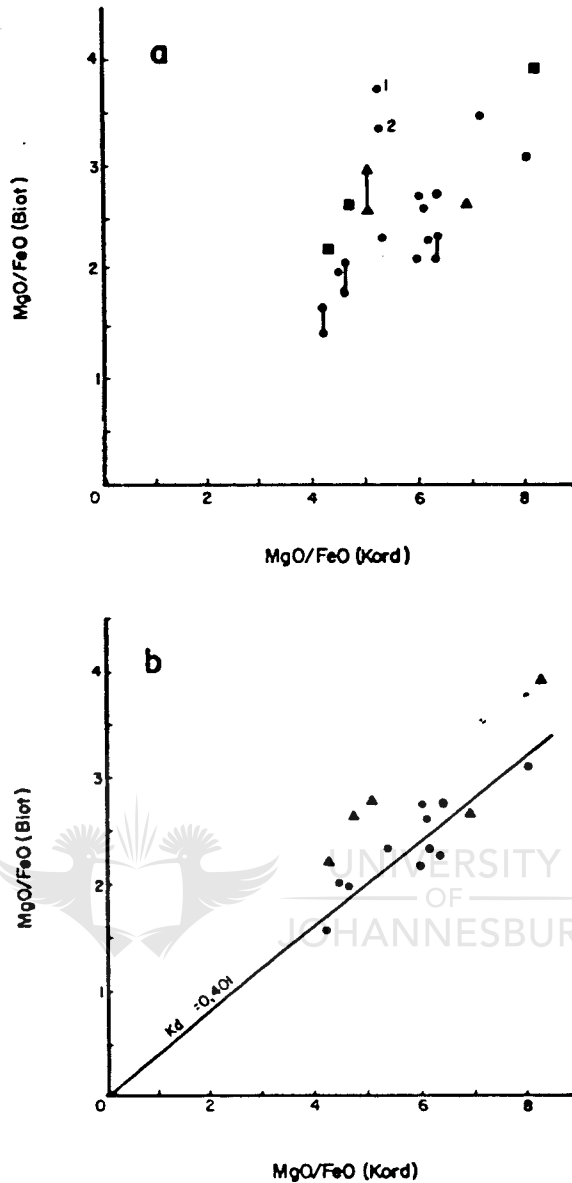
Die waargenome toename in Kd-waardes vir kordiëriet+granaat met oorgang van die Ortopirokseensone na die Ortoamfiboolsone in figuur 49 is moontlik in ooreenstemming met Hensen en Green (1971 en 1973) se voorstel dat Kd MgO-FeO (kord-gran) toeneem met 'n afname in temperatuur. Die toepaslike inligting in figuur 49 verteenwoordig egter nie 'n bewese ewewigstoestand nie en is gevolglik van beperkte waarde.

2.1.2 Verdeling van MgO en FeO tussen biotiet, kordiëriet, hipersteen en granaat in die Pelitiese gneis van beide die Ortopirokseer- en Ortoamfiboolsones

Verdelingskoëffisiënte vir mineraalpare wat biotiet insluit word afsonderlik bespreek omdat die samestelling van biotiet grootliks in individuele monsters varieer. Die beskikbare chemiese inligting (Afd. VI-1.4.3, Tabel 23) is 'n aanduiding dat die samestelling van biotiet gekoppel is aan die geassosieerde ferromagnesiese minerale. Biotiet met die hoogste MgO-inhoud kom voor as insluitels in granaat, terwyl biotiet met die hoogste FeO-inhoud nie in kontak met granaat is nie. Insluitels van biotiet in kordiëriet verskil soms ook in samestelling van biotiet wat in kontak met kordiëriet, is (Afd. VI, Tabelle 20a-d). Alhoewel chemiese analyses vir biotiet beskikbaar is in 30 monsters uit die verskillende metamorfe sones is geen poging aangewend om die variasie in die samestelling van biotiet in individuele monsters sistematies te ondersoek nie. Chemiese analyses is in die meeste gevalle ook slegs beskikbaar vir een of twee van die verskillende voorkomswyses van biotiet. Aangesien die mees opvallende variasies in die samestelling van biotiet gekoppel is aan die onmiddellike teenwoordigheid van granaat word die res van die analyses (dus dié wat nie in kontak met granaat is nie) in individuele monsters vir die doel van hierdie ondersoek as een groep beskou.

2.1.2.1 Biotiet-kordiëriet

Die verdeling van MgO en FeO tussen biotiet en kordiëriet in 17 monsters word in figuur 53a geïllustreer. Twaalf van hierdie monsters is uit die Ortopirokseensone, twee is van die Ortopirokseenisograad en drie is uit die Ortoamfiboolzone.



Figuur 53 Verdeling van MgO en FeO (mol %) tussen biotiet en kordiëriet van die Pelitiese gneis
 a. Data vir kordiëriet (kern) en alle individuele analyses van biotiet per monster
 b. Data vir kordiëriet (kern) en gemiddelde waardes van biotiet per monster. ● = Ortopirokseensone; ▲ = Ortopirokseenisograad

a. Ortopirokseensone

- kord-Biot (matriks)
- ¹ kord-Biot (insl. in gran)
- ² kord-Biot (kont. met gran)

Ortopirokseenisograad

- ▲ kord-Biot (matriks)

Ortoamfiboolsonne

- kord-Biot (matriks)
- Variasie in samestelling van biot in individuele monsters.

Die verstrooiing van datapunte in hierdie figuur is in teenstelling met die reëlmatige verdeling wat deur die vorige mineraalpare geïllustreer is. Die verdelingsdiagram in figuur 53b is gebaseer op gemiddelde waardes vir individuele monsters. Die verstrooiing van verdelingspunte is effens beter in hierdie figuur en definieer 'n gemiddelde verdelingslyn met $Kd \text{ MgO-FeO (biot-kord)} = 0,401$. Hierdie Kd -waarde is slegs gebaseer op gegewens vir kordiëriet + biotiet in die Ortopirokseensone. Die inligting in hierdie figuur is verder ook 'n aanduiding dat Kd -waardes vir biotiet-kordiëriet in vier van die vyf monsters langs die Ortopirokseenisograad en in die Ortoamfiboolsone hoër is as in die geval van monsters uit die Ortopirokseensone.

Die gemiddelde Kd -waarde van 0,401 in figuur 53b stem redelik goed ooreen met die gemiddelde waarde van 0,53 vir natuurlike gesteentes. (Holdaway en Lee, 1976, Tabel 6).

Die verstrooiing van verdelingswaardes vir biotiet en kordiëriet in die Pelitiese gneis is blykbaar 'n algemene verskynsel vir samebestaande biotiet en kordiëriet in hoëgraadse regionale metamorfe terreine (Hess, 1971; Dallmeyer en Dodd, 1971; Gable en Sims, 1969; Kays en Medaris, 1976). Die meeste van bogenoemde outeurs is dit verder ook eens dat $Kd \text{ MgO-FeO (biot-kord)}$ afhanklik is van die samestelling van kordiëriet en nie beïnvloed word deur variasies in die graad van metamorfose nie. Hess (1971) gee byvoorbeeld Kd -waardes wat wissel vanaf 0,385 tot 0,55 en illustreer verder dat hierdie toename duidelik gekoppel is aan variasies in die $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{+2})$ -verhouding van kordiëriet. Saxena en Hollander (1968) skryf hierdie waarneming toe aan die feit dat die samestelling van kordiëriet by hoë temperatuur afwyk vanaf idealiteit. Dougan (1974) beskryf egter 'n toename in Kd (biot-kord) vanaf 0,10 tot 0,33 wat volgens hom duidelik gekoppel is aan 'n ooreenstemmende toename in temperatuur.

Die waargenome verspreiding van Kd -waardes in die huidige

ondersoek is egter nie gekoppel aan variasies in die samestelling van kordiëriet nie. Dit word duidelik deur die algehele gebrek aan korrelasie tussen $Kd \text{ MgO-FeO}$ (biotkord) en die ooreenstemmende $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{+2})$ verhoudings in kordiëriet geïllustreer - 'n diagram wat hier nie geïllustreer word nie. Die verstrooiing van verdelingspunte in figuur 53a is dus waarskynlik die gevolg van afwykings vanaf ewewig as gevolg van veranderings in die fisiese toestand van metamorfose. Hierdie voorstel word gesteun deur die waargenome variasie in die samestelling van biotiet in individuele monsters (Tabel 23, Afd. VI-1.4) asook deur die verdelingsgegevens vir kordiëriet, granaat en hipersteen in figure 49, 50 en 52. Dit is egter steeds moontlik dat die verdeling van MgO en FeO tussen biotiet en kordiëriet nie ideaal is nie as gevolg van die substitusie van byvoorbeeld Ti^{+4} in biotiet. Hierdie moontlikheid word later ondersoek in die afdeling waar Kd -waardes vir biotiet-granaat bespreek word.

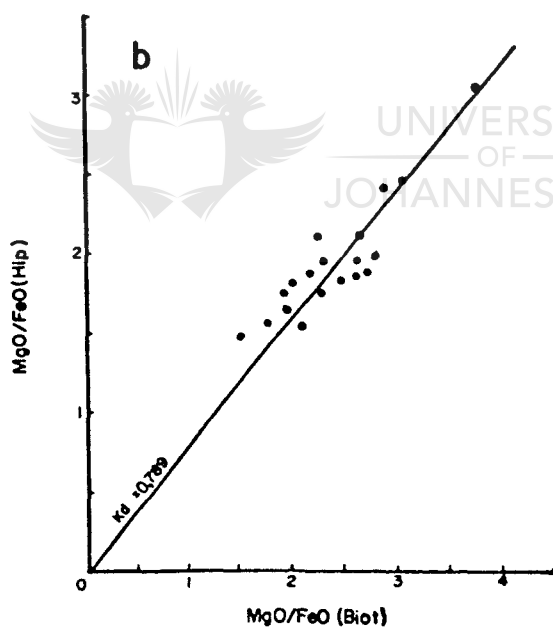
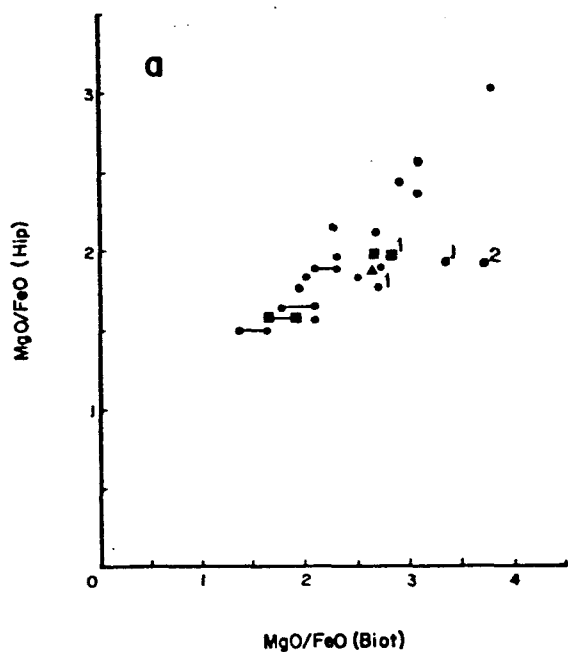


2.1.2.2 Hipersteen-Biotiet

Figuur 54a illustreer die verdeling van MgO en FeO tussen hipersteen en biotiet in sewentien verteenwoordigende monsters van die Pelitiese gneis. Drie van hierdie monsters is van die Ortopirokseenisograad en die res is uit die Ortopirokseensone. Die verdelingskoeffisiënt vir hipersteen-biotiet in eersgenoemde drie monsters verskil nie van dié uit die Ortopirokseensone nie.

Die verstrooiing van verdelingspunte in figuur 54a is in ooreenstemming met die gegewens vir biotiet-kordiëriet in figuur 53.

Die gemiddelde waardes vir individuele monsters (met die uitsondering van die twee verdelingspunte vir DR 19) definieer 'n redelike reëlmatige verdelingslyn met $Kd \text{ MgO-}$



Figuur 54 Verdeling van MgO en FeO (mol %) tussen hipersteen en biotiet van die Pelitiese gneis

- Data vir hipersteen en alle individuele analyses van biotiet per monster
- Data vir hipersteen en gemiddelde waardes van biotiet per monster

Ortopirokseensone

- Hip-Biot (matriks)
- ¹ Hip-Biot (kont. met gran)
- ² Hip-Biot (insl. in gran)

Ortopirokseenisograad

- Hip-Biot (matriks)
- ¹ Hip-Biot (kont. met gran)

- Variasie in samestelling van Biot in individuele monsters.

FeO (hip-biot) = 0,789. Hierdie waarde stem baie goed ooreen met gemiddelde waardes vir granulietterreine uit die literatuur wat wissel tussen 0,699 en 0,817 (Saxena, 1969a; Mukherjee en Rege, 1972; Davidson en Mathison, 1974).

Die verstrooiing van Kd-waardes vir hipersteen-biotiet in figuur 54b is 'n verdere aanduiding dat hierdie variasie slegs gekoppel kan wees aan variasies in die samestelling van biotiet of aan veranderende fisiese toestande.

2.1.2.3 Biotiet-Granaat

Granaat en biotiet besit 'n wye verspreiding in die gebied onder bespreking en verteenwoordig die enigste mineraalpaar in die Pelitiese gneis wat stabiel is in beide die Ortopirokseen- en Ortoamfiboolsone. Die detail ondersoek van die verdeling van MgO en FeO tussen hierdie twee minerale kan dus waardevolle inligting verskaf in verband met variasies in die fisiese toestande van metamorfose in die Limpopo-metamorfekompleks suid van die Soutpansberge.

Verskeie pogings is reeds aangewend om Kd (biot-gran) met temperatuur te korreleer (Albee, 1965a; Lyon en Morse, 1970; Sen en Chakraborty, 1968). Die korrelasie tussen Kd MgO-FeO (biot-gran) en temperatuur word egter beperk deur die waarneming dat verdelingskoëffisiënte vir hierdie twee minerale nie slegs in beperkte metamorfe sones kan varieer nie, maar ook algemeen oorvleuel met waardes vir verskillende grade van metamorfose (Albee, 1965, p. 155).

Die potensiële nut van verdelingskoëffisiënte as geologiese termometers word deur die volgende verwantskap gegee (Kretz, 1961, p. 367):

$$\text{LnKd} = \frac{-\Delta G^0}{RT}$$

Waar G^0 = standaardvrye energieverandering vir 'n reaksie
 $\text{Mg-granaat} + \text{Fe-biotiet} \rightleftharpoons \text{Fe-granaat} + \text{Mg-biotiet}$.

Hierdie verwantskap is egter slegs geldig indien beide fases ideale vaste oplossings tussen die onderskeie endlede vorm. Vroeër is aanvaar dat die substitusie van Mg^{+2} en Fe^{+2} in beide granaat en biotiet ideaal is (Kretz, 1959 en 1961; Mueller, 1961). Daaropvolgende studies het egter getoon dat K_d MgO-FeO (biot-gran) beïnvloed kan word deur die oktaëdriese substitusie van Mn^{+2} en Ca^{+2} in granaat (Albee, 1965; Lyon en Morse, 1970). Kretz (1959) en Saxena (1969a) het verder daarop gewys dat die verdelingskoëffisiënt vir MgO en FeO tussen granaat en biotiet ook afhanklik is van die substitusie van Ti^{+4} , Al^{+3} en Fe^{+3} in biotiet. Die kwantitatiewe invloed van laasgenoemde substitusies op K_d MgO-FeO (biot-gran) is onlangs deur Dallmeyer 1974a en b) en Guidotti e.a. (1977) bespreek.

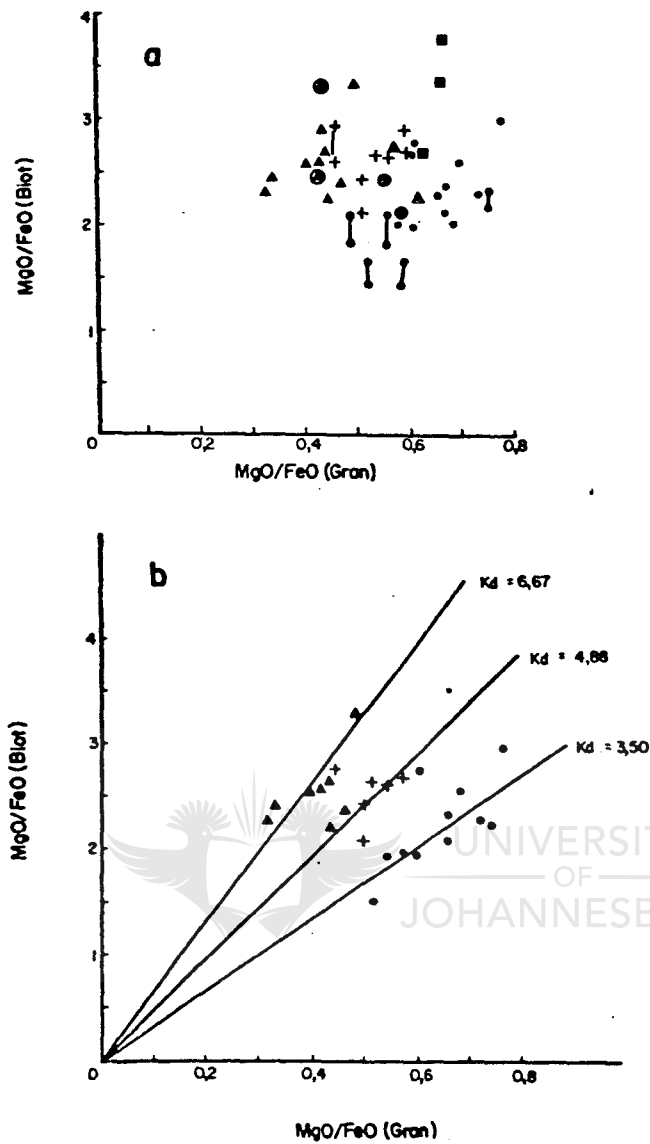
Die inligting wat uit die huidige ondersoek verkry is kan dus 'n verdere bydrae lewer tot die potensiële nut van die studie van verdelingskoëffisiënte vir samebestaande biotiet-granaat in komplekse hoë-gradse metamorfe terreine. Die Pelitiese gneis is in hierdie opsig veral geskik vir so 'n ondersoek aangesien hierdie gesteentes eerstens 'n baie konstante totale chemiese samestelling besit (Fig. 18a-c, Afd. V) en tweedens gekenmerk word deur reaksieverwantskappe wat 'n positiewe aanduiding is van veranderende fisiese toestande van metamorfose. Die volgende twee aspekte van hierdie ondersoek is dus belangrik:

- (i) Die verwantskap tussen K_d MgO-FeO (biot-gran) en variasies in die fisiese toestande van metamorfose.
- (ii) Die moontlike invloed van addisionele substitusies in granaat en biotiet op die ooreenstemmende K_d -waardes.

Die verdeling van MgO en FeO tussen biotiet en granaat is vir hierdie doel in ses en twintig verteenwoordigende

monsters van die pelitiese gneis ondersoek. Elf van hierdie monsters is uit die Ortopirokseensone, ses is van die Ortopirokseenisograad, en agt is uit die Ortoamfiboolsone. Die verdelingsinligting in figuur 55a is gebaseer op al die beskikbare analises vir granaat en biotiet in individuele monsters (Tabelle 13 en 20, Afd. VI). Die kern- en randsamestelling van granaat (in gevalle van sonering) is dus onderskeidelik vir al die analises gestip teen insluitels van biotiet in granaat, biotiet in kontak met granaat en biotiet wat nie met granaat geassosieer is nie. Die resultate hiervan is 'n groot verstrooiing van verdelingspunte in figuur 55a. Die inligting uit hierdie figuur is egter 'n aanduiding dat verdelingskoëffisiënte vir die verskillende metamorfe sones wel van mekaar verskil.

Die verstrooiing van verdelingspunte in figuur 55a kan egter verbeter word indien die beskikbare inligting beperk word tot randanalises van granaat (in gevalle waar granaat gesoneerd is) en gemiddelde analises van biotiet wat nie direk in kontak met granaat is nie (Fig. 55b). Hierdie benadering is moontlik nie heeltemal geregverdig nie aangesien dit gebaseer is op die aanname dat bogenoemde voorkomsywe van granaat en biotiet 'n ewewigstoestand weerspieël. Dit word egter genoodsaak omdat (i) beskikbare chemiese analises vir biotiet in individuele monsters grootliks beperk is tot biotiet wat nie direk in kontak met granaat is nie en (ii) die resultaat van hierdie benadering definieer die mees reëlmatige verdelingspatrone vir MgO en FeO tussen biotiet en granaat. Dit is in hierdie opsig belangrik dat die detail ondersoek van die verdeling van MgO en FeO tussen biotiet en granaat in komplekse hoëgraadse metamorfe terreine deur onder andere Hess (1971) getoon het dat verdelingskoëffisiënte vir die kern- en randsamestelling van granaat en biotiet in kontak met en weg van granaat gebruik kan word om verskillende ewewigstoestande tussen hierdie twee minerale te definieer. So 'n ondersoek vereis egter 'n groot volume analises van granaat en biotiet in individuele monsters wat nie in die huidige ondersoek



Figuur 55 Verdeling van MgO en FeO (mol %) tussen biotiet en granaat van die Pelitiese gneis

a. Data vir granaat (rand in geval van sonering) en alle individuele analises vir biotiet per monster

b. Gemiddelde waardes vir biotiet per monster

● = Ortopirokseensone; + = Ortopirokseenisograad;
▲ = Ortoamfiboolsone.

Ortopirokseensone

- Gran-Biot (matriks)
- " " (insl. in gran)
- ⊗ " " (kont. met gran)

Ortopirokseenisograad

- + Gran(rand)-Biot (matriks)
- ⊕ Gran(kern)- " "

Ortoamfiboolsone

- ▲ Gran(rand)-Biot (matriks)
- ⊙ Gran(kern)- " "
- Variasie in samestelling van Biot in individuele monsters.

moontlik was nie.

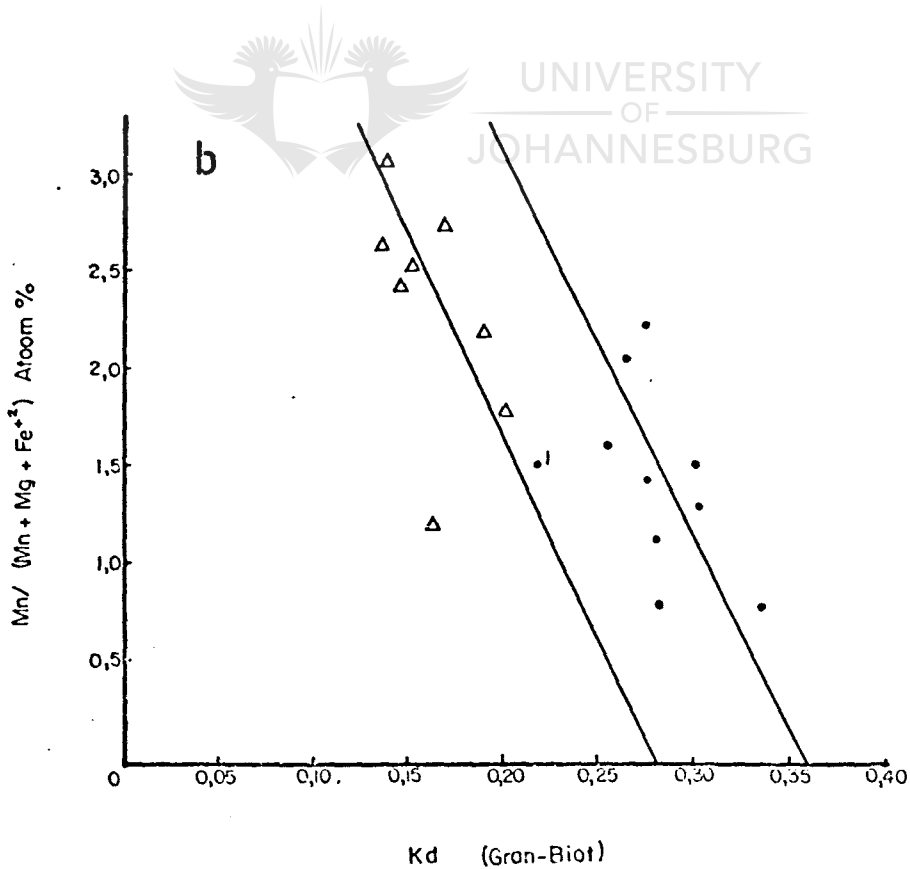
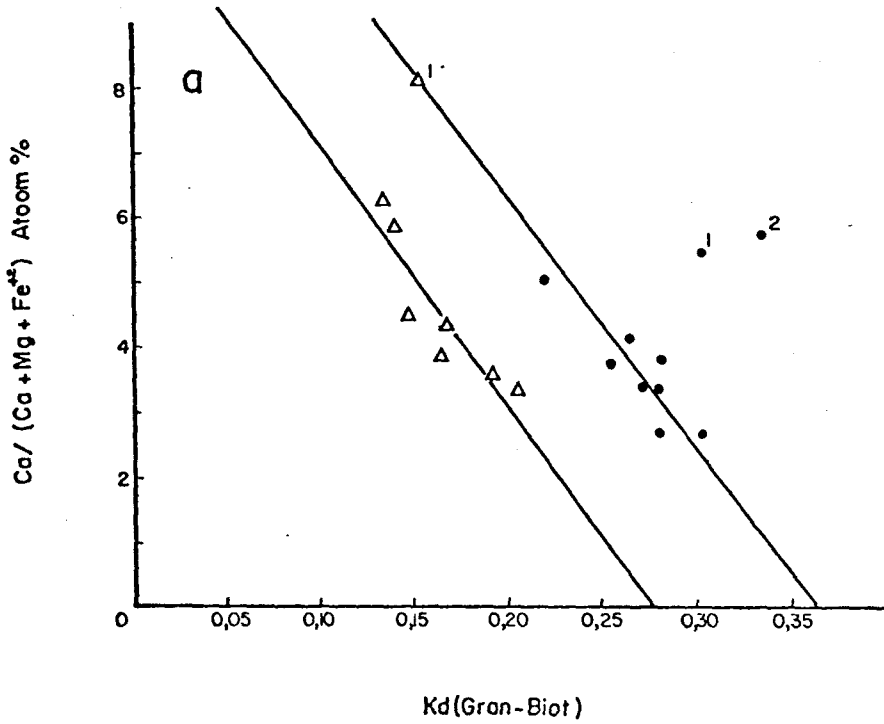
Die toename in $K_d \text{ MgO-FeO}$ (biot-gran) in figuur 55b vanaf 3,50 in die Ortopirokseensone tot 6,67 in die Ortoamfibool-sone stem goed ooreen met soortgelyke waarnemings uit talle hoë-gradse regionale metamorfe terreine (Albee, 1965a; Sen en Chakraborty, 1968; Saxena, 1969b; Saxena en Hollander, 1969; Lyon en Morse, 1970).

Indien daar aanvaar word dat die verdelingspatrone in figuur 55b wel 'n ewewigstoestand tussen granaat en biotiet weerspieël kan die waargenome toename in $K_d \text{ MgO-FeO}$ (biot-gran) en die onderlinge verstrooiing van verdelingspunte vervolgens uit 'n meer kwantitatiewe oogpunt beskou word.

a. Invloed van Ca^{+2} en Mn^{+2} in granaat op K_d (biot-gran)

Die moontlike invloed van Ca^{+2} en Mn^{+2} op die verdeling van MgO en FeO tussen biotiet en granaat in figuur 55b kan ondersoek word aan die hand van 'n diagram waarin bogenoemde komponente in granaat gestip word teen $K_d \text{ MgO-FeO}$ (gran-biot). Let egter daarop dat die verdelingskoëffisiënt vir hierdie doel as volg omreken is vir direkte vergelyking met diagramme uit die literatuur: $K_d \text{ (gran-biot)} = \left(\frac{\text{MgO}}{\text{FeO}}\right)_{\text{gran}} \cdot \left(\frac{\text{MgO}}{\text{FeO}}\right)_{\text{biot}}$.

Die resultate word in figure 56a en b geïllustreer. Waardes vir die Ortopirokseenisograad toon 'n groot verstrooiing en is buite rekening gelaat. Die lyne wat in hierdie twee figure getrek is, is visueel gepas en is gebaseer op die aanname dat daar wel 'n ~~positiewe~~ ^{negatiewe} korrelasie tussen Ca^{+2} , Mn^{+2} en $K_d \text{ MgO-FeO}$ (gran-biot) bestaan. Punte soos 1 en 2 in figure 56a en b wat grootliks afwyk vanaf gemiddelde waardes is hier nie in aanmerking geneem nie. Die aanname van 'n ~~positiewe~~ ^{negatiewe} korrelasie is heelwaarskynlik nie geregverdig gesien in die lig van die verspreiding van punte in



Figuur 56a en b $K_d(\text{Gran-Biot})$ gestip teen die atoompersent $\text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ (Fig. a) en $\text{Mn}/(\text{Mn} + \text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ (Fig. b) in granaat van die Pelitiese gneis
 ● = Ortopirokseensone; ▲ = Ortoamfiboolsone
 ●¹ = DR 42-2, ●² = DR 80, ▲¹ = M 447.

figure 56a en b nie. 'n ~~Positiewe~~ ^{Negatiewe} korrelasie vir Mn^{+2} , Ca^{+2} en $Kd MgO-FeO$ (gran-biot) word egter aanvaar aangesien die verstrooiing van punte in figure 56a en b in ooreenstemming is met toepaslike inligting uit die literatuur. (Albee, 1965a, Fig. 3; Lyon en Morse, 1970, Fig. 2).

Met bogenoemde in gedagte kan die volgende afleidings uit figure 56a en b gemaak word:

- (i) gegewens vir die Ortopirokseens- en Ortoamfiboolsones vorm in beide figure twee duidelike afsonderlike populasies;
- (ii) $Kd MgO-FeO$ (gran-biot) neem in beide figure af met 'n toename in Ca^{+2} en Mn^{+2} . Albee (1965a) en Lyon en Morse (1970) beskryf 'n soortgelyke korrelasie alhoewel Ca^{+2} 'n meer prominente rol in die huidige ondersoek speel. Dit is verder interessant om daarop te let dat Ca^{+2} en Mn^{+2} 'n parallelle invloed op $Kd MgO-FeO$ (gran-biot) in figure 56a en b uitoefen;
- (iii) Die invloed van Ca^{+2} en Mn^{+2} op $Kd MgO-FeO$ (gran-biot) is soortgelyk in beide die Ortoamfibool- en Ortopirokseenssones. Die atoompersentasie Ca^{+2} en Mn^{+2} is egter opvallend hoër in eersgenoemde metamorfe sone.

Lyon en Morse (1970, p. 241) het voorgestel dat Kd -waardes vir 'n groep geassosieerde metamorfe gesteentes die beste weerspieël word indien die berekende waarde ge-ekstrapoleer word tot nul persent Mn^{+2} . Op hierdie basis is die volgende Kd -waardes verteenwoordigend van die volgende verskillende metamorfe sones: granulietzone = 0,32-0,34; sillimaniet-ortoklaassone = 0,23-0,27; sillimaniet of stourolietzone = 0,15-0,27. Die ge-ekstrapoleerde waardes in die huidige ondersoek korreleer goed met dié uit die literatuur en kan as volg opgesom word (Fig. 56a en b):

	0% Mn ⁺²	0% Ca ⁺²
Ortopirokseensone	0,363	0,367
Ortoamfiboolsone	0,280	0,283

Die korrelasie tussen die huidige inligting en dié uit die literatuur is verbasend indien daar in aanmerking geneem word dat die analyses van granaat wat in die huidige ondersoek gebruik is 'n maksimum van slegs 1,27 massapersent MnO (3 atoompersent) en 2,13 massapersent CaO (6 atoompersent) bevat. Indien die voorgestelde korrelasie tussen Mn⁺², Ca⁺² en Kd MgO-FeO (gran-biot) in die huidige ondersoek dus aanvaarbaar is beteken dit dat klein variasies in klein konsentrasies Mn⁺² en Ca⁺² in granaat presies dieselfde invloed op Kd MgO-FeO (gran-biot) kan uitoefen as variasies in groter konsentrasies (Fig. 1 en 2, Lyon en Morse, 1970). Dit is egter duidelik dat die waargenome variasies in Mn⁺² en Ca⁺² in die huidige ondersoek nie 'n belangrike invloed kon uitoefen op die toename in Kd-waardes vanaf 3,50 in die Ortopirokseensone tot 6,67 in die Ortoamfiboolsone nie (Fig. 55b). Die teenwoordigheid van Mn⁺² en Ca⁺² in granaat kan egter 'n geringe invloed uitoefen op die onderlinge verstrooiing van verdelingspunte in 'n spesifieke metamorfe sone. Hierdie waarneming geld slegs vir gesteentes met soortgelyke chemiese samestellings.

b. Kd MgO-FeO (biot-gran) as 'n funksie van die TiO₂-inhoud in biotiet

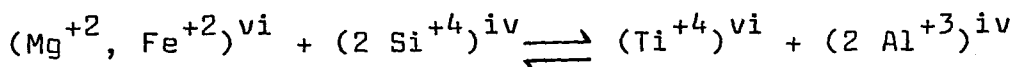
Die moontlike invloed van die TiO₂-inhoud van biotiet op die verdelingskoëffisiënt van MgO en FeO tussen biotiet en granaat kan aan die hand van twee verskillende modelle bespreek word (Dallmeyer, 1974a, b; en Guidotti e.a., 1977).

Die belangrike verskille tussen bogenoemde twee modelle kan kortliks as volg opgesom word:

- (i) Volgens Dallmeyer (1974a) word die substitusie van Ti^{+4} vir oktaëdriese gekoördineerde katione in biotiet gebalanseer deur substitusie van Al^{iv} vir Si^{iv} en deur die skepping van vakante oktaëdriese posisies (Afd. VI-1.4.2). As gevolg van hierdie substitusies word die laterale dimensies van die oktaëdriese- en tetraëdriese lae onderskeidelik verklein en vergroot. Hierdie wanaanpassing word gebalanseer deur die voorkeur substitusie van die effens groter Fe^{+2} bo Mg^{+2} in die oktaëdriese laag. Die gevolg hiervan is 'n afname in die MgO-inhoud van biotiet met toenemende substitusie van TiO_2 .

Die belangrike implikasie van bogenoemde model is dus dat die verdeling van MgO en FeO tussen biotiet en granaat nie ideaal is nie maar afhanklik is van die konsentrasie van TiO_2 in biotiet.

- (ii) Guidotti e.a. (1977) is weer van mening dat die MgO/FeO verhouding van biotiet die chemie, en dus ook die TiO_2 -inhoud van biotiet beheer. Hierdie model is gebaseer op die voorstel dat toenemende MgO-inhoud van biotiet die laterale dimensies van die oktaëdriese laag verminder. Die gevolglike wanaanpassing tussen die oktaëdriese en tetraëdriese lae word gebalanseer deur toenemende substitusie van Si^{+4} vir Al^{iv} (waardeur die dimensie van die tetraëdriese laag verminder word) gekoppel met afnemende substitusie van Ti^{+4} in die oktaëdriese laag (waardeur die dimensie van hierdie laag verder verminder word. Ladingsbalans as gevolg van die substitusie van Ti^{+4} vir oktaëdriese gebonde katione word deur die volgende substitusie meganisme beheer (Guidotti e.a., 1977, p. 447):



Die skepping van vakante oktaëdriese posisies speel hier dus geen rol nie.

Die som-effek van bogenoemde twee modelle is natuurlik presies dieselfde. In beide gevalle sal 'n toename in die TiO_2 -inhoud gepaard gaan met 'n afname in die MgO/FeO -verhouding van biotiet. Die belangrike basiese verskil tussen die twee modelle is egter dat Dallmeyer (1974b) van mening is dat oorspronklike variasies in die TiO_2 -inhoud van die gesteentes die MgO/FeO -verhouding van biotiet beheer, terwyl Guidotti e.a. (1977) weer van mening is dat oorspronklike variasies in die MgO/FeO -verhouding van die moedergesteentes (of die geassosieerde minerale) die TiO_2 -inhoud van biotiet beheer. Dit is egter belangrik dat beide bogenoemde modelle slegs van toepassing is op variasies binne dieselfde graad van metamorfose (temperatuur is dus nie 'n veranderlike nie).

Die belangrike petrologiese implikasies van bogenoemde twee modelle is egter die invloed hiervan op die verdeling van MgO en FeO tussen biotiet en granaat. Na afleiding van die eerste model (Dallmeyer) is K_d (biot-gran) 'n funksie van die TiO_2 -inhoud van biotiet en gevolglik is hierdie verdeling nie ideaal nie. In die tweede model (Guidotti e.a., 1977) het die konsentrasie van Ti^{+4} in biotiet geen invloed op K_d (biot-gran) nie en die verdeling is dus ideaal in soverre dit die samestelling van biotiet betref. Die resultate van die huidige ondersoek kan na aanleiding van bogenoemde twee modelle, en met verwysing na afdeling VI-1.4 kortliks as volg opgesom word:

- (i) Die titaaninhoud van biotiet neem sistematies toe vanaf die Ortoamfibool na die Ortopirokseensone (Fig. 33). Hierdie toename is glad nie gekoppel aan variasies in die TiO_2 -inhoud van die moedergesteentes nie (Tabel 24) maar word deur 'n toename

in temperatuur beheer. Hierdie regionale toename in die TiO_2 -inhoud van biotiet gaan gepaard met 'n ooreenstemmende afname in die MgO/FeO -verhouding van biotiet.

- (ii) Die variasie in die TiO_2 -inhoud van biotiet in individuele monsters (Tabel 23) is in ooreenstemming met die regionale variasie. 'n Toename in TiO_2 word dus gekenmerk deur 'n afname in die MgO/FeO -verhouding van biotiet.
- (iii) Die waargenome variasie in die MgO/FeO -verhouding van biotiet in individuele metamorfe sones, en van een sone na 'n ander, is nie gekoppel aan variasies in die MgO/FeO -verhouding van die moedergesteentes of aan die teenwoordigheid of afwesigheid van kordiëriet en hipersteen of ortoamfibool nie (Tabel 22). Die teenwoordigheid of afwesigheid van granaat speel egter hier 'n beslissende rol. Die gemiddelde X_{Mg} (biot) neem toe vanaf 71,4 in granaatryke gesteentes tot 77,3 in die granaatvrye gesteentes (Tabel 22). Hierdie verwantskap tussen die $\text{Mg}^{+2}/(\text{Mg}^{+2} + \text{Fe}^{+2})$ -verhouding van biotiet en die teenwoordigheid of afwesigheid van granaat is egter hier nie ter sprake nie omdat slegs granaatryke gesteentes beskou word. Die petrologiese faktor word dus uitgeskakel.
- (iv) Variasies in die TiO_2 -inhoud van biotiet van een monster na 'n ander in die individuele metamorfe sones toon geen verband met variasies in die MgO/FeO -verhouding van biotiet nie (Fig. 32).

Die inligting van die huidige ondersoek is dus nie in ooreenstemming met dié van Guidotti e.a. (1977) of Dallmeyer (1974) nie. Die algemene gevolgtrekking wat op grond van die huidige inligting gemaak kan word is dat die variasies in die titaan-inhoud van biotiet in individuele monsters grootliks deur variasies in temperatuur en nie deur petrologiese funksies beheer word nie.

Die variasie in Ti^{+4} , Al^{+3} en Si^{+4} met variasies in die Mg/Fe^{+2} -verhouding van biotiet in die Pelitiese gneis op beide 'n regionale skaal en in individuele monsters word in tabel 42a en b opgesom. In die geval van tabel 42a word gemiddelde waardes vir biotietanalise in die drie chemies verskillende groepe gesteentes (Tabel 8) onderling vergelyk om moontlike petrologiese faktore uit te skakel.

Tabel 42a Verwantskap tussen die Al^{+3} , Ti^{+4} en Si^{+4} -inhoud en die Mg/Fe^{+2} verhouding in biotiet van die Pelitiese gneis in die verskillende metamorfe sones. Die onderverdeling van die Pelitiese gneis in die drie chemies verskillende groepe word in tabel 8 gegee. Gewoens is gemiddelde waardes vir elke groep in die Ortopirokseensone (A) en die Ortoamfiboolsone (B)

	Ti	Al ^{vi}	Si ^{iv}	Al ^{iv}	Gevulde oktaëdriese posisies	Mg/Fe ⁺²
Groep 1 (A)	0,53	0,39	5,48	2,52	5,66	2,29
Groep 1 (B)	0,17	0,57	5,53	2,47	5,94	2,71
Groep 2 (A)	0,50	0,36	5,47	2,53	5,67	2,27
Groep 2 (B)	0,20	0,56	5,50	2,50	5,88	2,60
Groep 3 (A)	0,43	0,43	5,51	2,49	5,76	2,93
Groep 3 (B)	0,19	0,61	5,62	2,38	5,83	3,59

Tabel 42b Verwantskap tussen die Al^{+3} , Si^{+4} en Ti^{+4} -inhoud en die Mg/Fe^{+2} verhouding in biotiet van individuele monsters. DR.19 en DR.42-2 = Ortopirokseensone; DV.38 = Ortopirokseensisograad; DV.23 = Ortoamfiboolsone

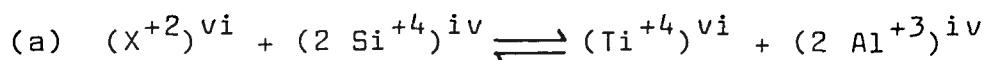
DR.19						
1) matriks	0,554	0,326	5,443	2,557	5,612	2,316
11) kontak met gran	0,518	0,356	5,475	2,252	5,652	3,354
DR.42-2						
1) matriks	0,554	0,321	5,507	2,493	5,543	1,970
11) kontak met gran	0,496	0,458	5,451	2,549	5,784	2,690
DV.38						
1) matriks	0,304	0,314	5,412	2,589	5,829	2,670
11) kontak met gran	0,335	0,276	5,360	2,640	5,853	2,870
DV.23						
1) matriks	0,185	0,564	5,527	2,473	5,889	2,540
11) kontak met gran	0,163	0,569	5,538	2,462	5,942	2,890

Die volgende waarnemings is met verwysing na ~~figuur~~ ^{Tabel} 42a opvallend indien variasies in Ti^{+4} , Al^{vi} , Al^{iv} en Si^{+4} gekorreleer word met 'n toename in die Mg/Fe^{+2} -verhouding van biotiet:

- (i) Ti^{+4} neem af
- (ii) Si^{+4} neem toe en Al^{iv} neem af
- (iii) Al^{vi} neem toe
- (iv) Die aantal gevulde oktaëdriese posisies neem toe (en die vakante posisies neem dus af).

'n Soortgelyke, maar minder reëlmatige, verwantskap tussen Ti^{+4} , Al^{iv} , Al^{vi} , Si^{+4} en Mg/Fe^{+2} word ook deur analyses van biotiet in individuele monsters in tabel 42b geïllustreer.

Dit is dus duidelik dat ladingsbalans as gevolg van die oktaëdriese substitusie van Ti^{+4} in biotiet deur die volgende twee meganismes gebalanseer word:



- (b) Die skepping van vakante oktaëdriese posisies.

Bogenoemde is in ooreenstemming met die voorstel van Dallmeyer (1974a, b) dat biotiet van beide substitusiemeganismes gebruik maak om die strukturele wanaanpassing tussen die oktaëdriese en tetraëdriese lae as gevolg van die substitusie in Ti^{+4} , Al^{+3} en Si^{+4} te verminder. Die besonderhede van bogenoemde substitusiemeganismes is nie verder ter sprake nie aangesien die voorstelle van beide Dallmeyer (1974) en Guidotti e.a. (1977) 'n omgekeerde verwantskap tussen die Ti^{+4} -inhoud en Mg/Fe^{+2} -verhouding van biotiet postuleer. Die belangrike punt, egter, is dat die beskikbare chemiese inligting vir die variasie in die samestelling van biotiet in individuele monsters en op 'n regionale skaal nie in ooreenstemming is met Dallmeyer se voorstel dat die Mg/Fe^{+2} -verhouding in biotiet deur die Ti^{+4} -inhoud beheer word nie, en ook nie in ooreenstemming is met die voorstel van Guidotti e.a., dat die Ti^{+4} -inhoud deur die Mg/Fe^{+2} -verhouding van biotiet beheer word nie.

Die algemene gevolgtrekking uit die huidige ondersoek is dus dat die waargenome onderlinge verstrooiing van verdelingspunte in figuur 55a in die verskillende metamorfe sones nie deur petrologiese faktore beheer word nie. Die variasie in die verdelingskoeffisiënte van MgO en FeO tussen biotiet en granaat is dus 'n aanduiding van veranderinge in die ewewigstoestand tussen die twee minerale as gevolg van veranderende fisiese toestande van metamorfose. Die inligting wat uit hierdie ondersoek verkry is, is dus in ooreenstemming met die verdelingsgegevens vir samebestaande kordiëriet-granaat, kordiëriet-hipersteen en hipersteen-granaat (Figure 49, 50, 52).

2.1.3 Verdeling van MgO en FeO tussen ortoamfibool, granaat en biotiet in die Pelitiese gneis van die Ortopirokseenisograad en uit die Ortoamfiboolsone

2.1.3.1 Antofilliet-Gedriet



UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG

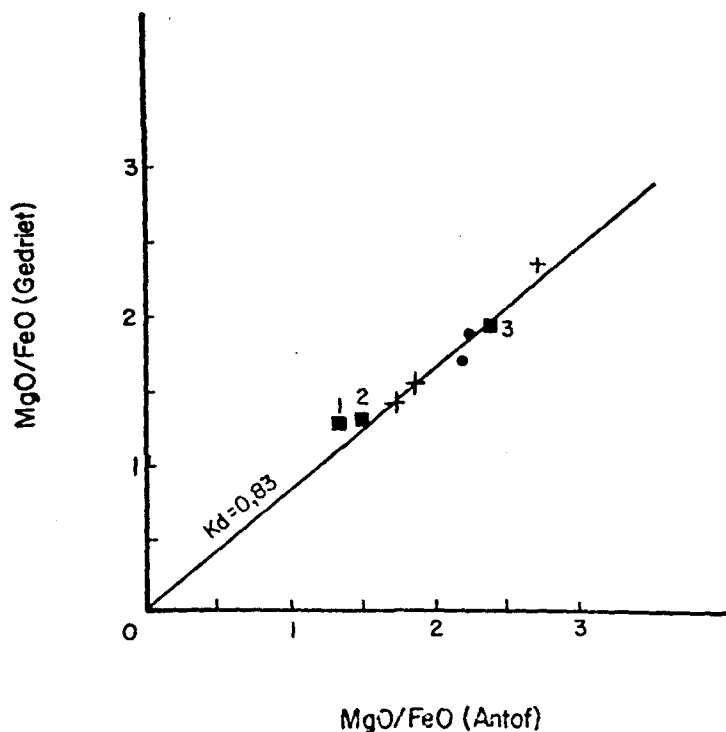
Die studie van die verdeling van MgO en FeO tussen antofilliet en gedriet kan 'n belangrike bydrae lewer tot die probleme gekoppel aan die ewewigsverwantskappe van samebestaande ortoamfibole in die Pelitiese gneis van die Ortoamfiboolsone. Die inligting wat deur hierdie ondersoek beskikbaar gestel word is egter ook van meer algemene belang aangesien toepaslike chemiese inligting vir samebestaande ortoamfibole uit die literatuur uiters skaars is. Die enigste inligting wat tot op datum beskikbaar is word deur Stout (1971 en 1972) gegee vir versamelings uit Telemark, Noorweë, wat uit antofilliet, gedriet en kumingtoniet of hornblende bestaan.

Samebestaande antofilliet en gedriet is in die huidige ondersoek in vyf monsters van die Ortoamfiboolgneis geïdentifiseer (Tabel 27). Twee van hierdie monsters is van die

Ortopirokseenisograad en die res is uit die Ortoamfibool-sone. Die monsters van die isograad (DV 3 en DR 157) bevat bo en behalwe ortoamfibool ook granaat, kordiëriet, hipersteen en biotiet. Kordiëriet en hipersteen is beide onstabiel in die Ortoamfibool-sone en twee van die monsters uit hierdie sone (DV 22 en DV 1) bevat ook nie granaat nie. Die voorkomswyse van ortoamfibool verskil verder ook grootliks van een monster na 'n ander. Die twee monsters van die Ortopirokseenisograad word gekenmerk deur die hidrasie van kordiëriet en hipersteen. Gedriet in hierdie monsters kom dus voor as 'n fynkorrelrige vergroeiing met kordiëriet, terwyl antofilliet óf reaksierende om hipersteen vorm óf as klein prismatiese naalde teenwoordig is. Twee van die monsters uit die Ortoamfibool-sone (DV 43 en DV 22) bevat groot prismatiese kristalle van antofilliet en gedriet. Monster DV 1 bevat bo en behalwe antofilliet en gedriet ook nog Al-antofilliet. Gedriet in hierdie monster is egter beperk tot 'n fynkorrelrige vergroeiing met relikte van kordiëriet.

Die verdeling van MgO en FeO tussen antofilliet en gedriet in bogenoemde monsters word in figuur 57 geïllustreer. Die reëlmatige verdelingspatroon in hierdie figuur is 'n goeie aanduiding dat MgO en FeO ideaal verdeel is tussen antofilliet en gedriet. Die gestipte posisies van drie antofilliet-gedrietpare van Telemark in Noorweë (Stout, 1972) is in goeie ooreenstemming met hierdie voorstel.

Die voorkeur substitusies van MgO in antofilliet in figuur 57 is gekoppel aan die kristalchemie van gedriet. Die M_2 -struktuurposisie in gedriet word deur oktaëdriese Al^{+3} en Mg^{+2} gevul terwyl Fe^{+2} slegs in klein hoeveelhede teenwoordig is (Papike en Ross, 1970). 'n Toename in die Al_2O_3 -inhoud van ortoamfibool sal dus gepaard gaan met 'n ooreenkomstige afname in die MgO-inhoud. Die Al_2O_3 -ryke lid van twee samebestaande ortoamfibole sal dus altyd deur 'n laer MgO/FeO-verhouding gekenmerk word.



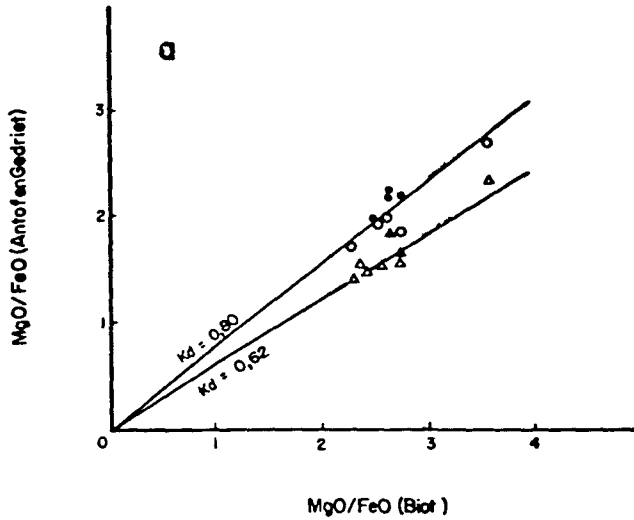
Figuur 57 Verdeling van MgO en FeO (mol %) tussen antofilliet en gedriet van die Ortopirokseenisograad (●) en van die Ortoamfiboolzone (+). 1 = GE2, 2 = 101AB, 3 = 161A (Stout, 1972).

Die ideale verdeling van MgO en FeO tussen antofilliet en gedriet is in ooreenstemming met die voorstel (Afd. VI-1.5.6) dat hierdie twee minerale 'n ewewigsversameling in die Ortoamfiboolgneis definieer.

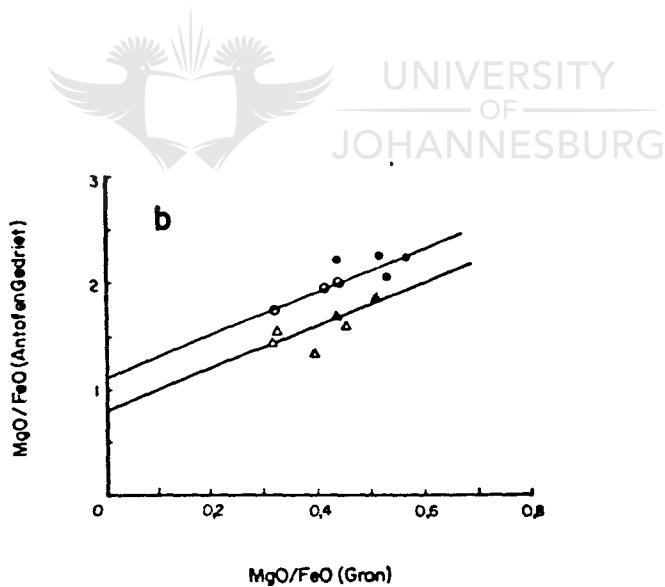
2.1.3.2 Ortoamfibool-Biotiet en Ortoamfibool-Granaat

Verdelingsgegevens vir sam^ebestaande antofilliet, gedriet, biotiet en granaat word in figure 58a en b geïllustreer. Slegs die randanalises van granaat is gebruik.

Die gegevens in figuur 58a is gebaseer op verdelingskoeffisiënte vir agt gedriet-biotiet- en nege antofilliet-biotietpare uit die Ortoamfiboolzone en van die Ortopirokseenisograad. Beide mineraalpare word deur 'n redelike



Figuur 58a Verdeling van MgO en FeO (mol %) tussen antofylliet-biotiet van die Ortopirokseenisograad (●) en van die Ortoamfiboolsone (○); en gedriet-biotiet van die Ortopirokseenisograad (▲) en van die Ortoamfiboolsone (△). Gemiddelde waardes vir biotiet per monster is gebruik.



Figuur 58b Verdeling van MgO en FeO (mol %) tussen antofylliet-granaat van die Ortopirokseenisograad (●) en van die Ortoamfiboolsone (○); en gedriet-granaat van die Ortopirokseenisograad (▲) en van die Ortoamfiboolsone (△). Rand-analise van granaat is in gevalle van sonering gebruik.

verstrooiing van verdelingspunte gekenmerk, maar dit is steeds moontlik om twee reëlmatige verdelingslyne vir elke paar te skat.

Die verdeling van MgO en FeO tussen antofilliet, gedriet en granaat in figuur 58b vertoon egter 'n groot afwyking vanaf die reëlmatige patrone wat deur al die vorige mineraalpare geïllustreer is. Die bes gepaste verdelingslyne in figuur 58b gaan nie deur die oorsprong nie maar sny die vertikale as. Dit is veral duidelik in die geval van antofilliet-granaat, maar geld waarskynlik ook vir gedriet-granaat. Indien die verdelingslyne in hierdie figuur realisties is beteken dit dat die samestelling van ortoamfibool en/of granaat nie ideaal is nie, en dat die verdeling van MgO en FeO tussen hierdie twee minerale dus grootliks afhanklik is van die konsentrasie van addisionele komponente. So 'n voorstel is egter nie in ooreenstemming met die waarneming dat soortgelyke afwykings vanaf idealiteit in geen van die ander mineraalpare waarby ortoamfibool of granaat betrokke is geïllustreer kan word nie. Die mees aanvaarbare verklaring vir die verstrooiing van verdelingspunte in figuur 58b is dat ortoamfibool en granaat nie 'n ewewigsversameling in die teenwoordigheid van biotiet definieer nie.

Die verstrooiing van verdelingspunte tussen ortoamfibool en biotiet in figuur 58a is in ooreenstemming met die waarneming dat biotiet nooit in perfekte ewewig is met die geassosieerde ferromagnesiese minerale in beide die Ortopirokseer- en Ortoamfiboolsones nie. Hierdie waargenome afwykings is dus ook 'n funksie van veranderende fisiese toestande van metamorfose en is nie gekoppel aan samestellingsfaktore nie. Die voorstel dat ortoamfibool nie in ewewig met granaat in die ortoamfiboolgneis is nie is ook in ooreenstemming met die waarneming dat hierdie twee minerale nooit in fisiese kontak met mekaar waargeneem word in gesteentes wat ook biotiet bevat nie (Afd. IV-1.1.3).

2.2 DIE VERDELING VAN MgO EN FeO TUSSEN HIPERSTEEN, OUGIET EN HORNBLLENDE IN DIE MAFIESE GNEIS VAN DIE ORTOPIROKSEENSONE

Die hipersteen-ougietgranoliet besit 'n wye verspreiding in die Ortopirokseensone (Fig. 17 en 40) en word gekenmerk deur 'n eenvoudige mineralogiese samestelling en deur die afwesigheid van komplekse reaksieverwantskappe. Die ondersoek van die verdeling van MgO en FeO tussen samebestaande minerale in hierdie gesteentes kan dus 'n belangrike bydrae lewer tot die ewewigsaspekte van metamorfose in die Ortopirokseensone soos afgelei is uit die studie van mineraalpare in die granaatgranoliet.

Tien verteenwoordigende monsters van die hipersteen-ougietgranoliet vorm die basis vir hierdie ondersoek. Die gesteentes bestaan almal uit hipersteen, ougiet en plagioklaas, met bykomstige hornblende, magnetiet en ilmeniet.

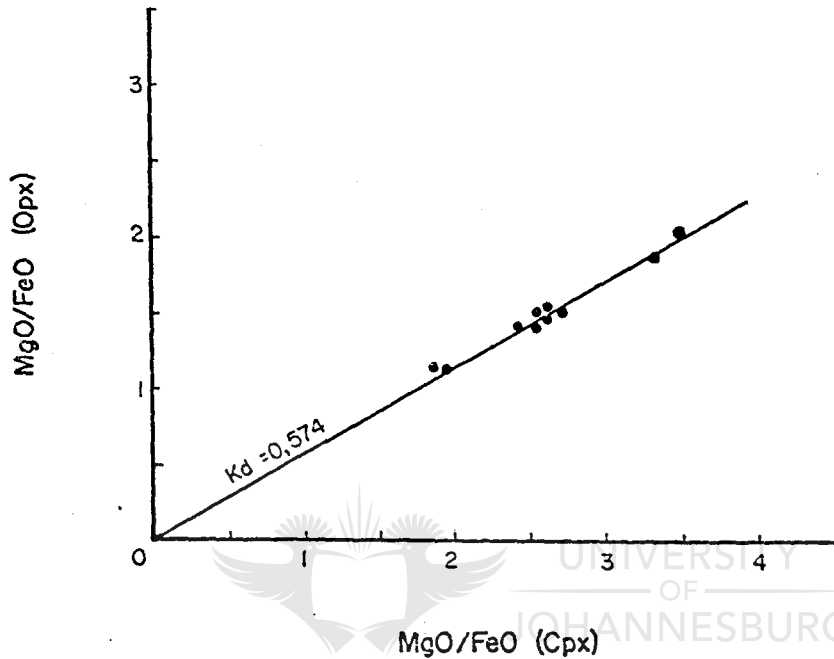
2.2.1 Hipersteen-ougiet

Berekende Kd-waardes vir tien pirokseensone word in tabel 43 gegee.

Tabel 43 Berekende verdelingskoeffisiënte vir pirokseensone uit die Mafiese granoliet

Monster	(MgO/MgO+FeO) Opx	Kd MgO-FeO (Opx-Cpx)
M. 130	0,648	0,556
M. 331	0,531	0,613
R. 51	0,593	0,567
M. 292	0,588	0,564
M. 339	0,584	0,584
DR. 55	0,679	0,615
M. 109	0,597	0,572
M. 315	0,603	0,589
M. 201	0,520	0,581
M. 194	0,598	0,546

Die samebestaande piroksene in hierdie tabel is op petrografiese gronde in ewewig met mekaar en het hierdie ewewigstoestand waarskynlik binne dieselfde temperatuur-interval bereik. Dit word duidelik geïllustreer deur die reëlmatige verspreiding van verdelingspunte in figuur 59.



Figuur 59 Verdeling van MgO en FeO (mol %) tussen hipersteen en ougiet in die hipersteen-ougietgranoliet.

Die gemiddelde K_d -waarde van 0,574 vir pirokseenpare in hierdie ondersoek stem goed ooreen met K_d -waardes vir granulietterreine wat wissel tussen 0,50 tot 0,64 (Kretz, 1963; Saxena, 1968a; Davison, 1968; Sen, 1970).

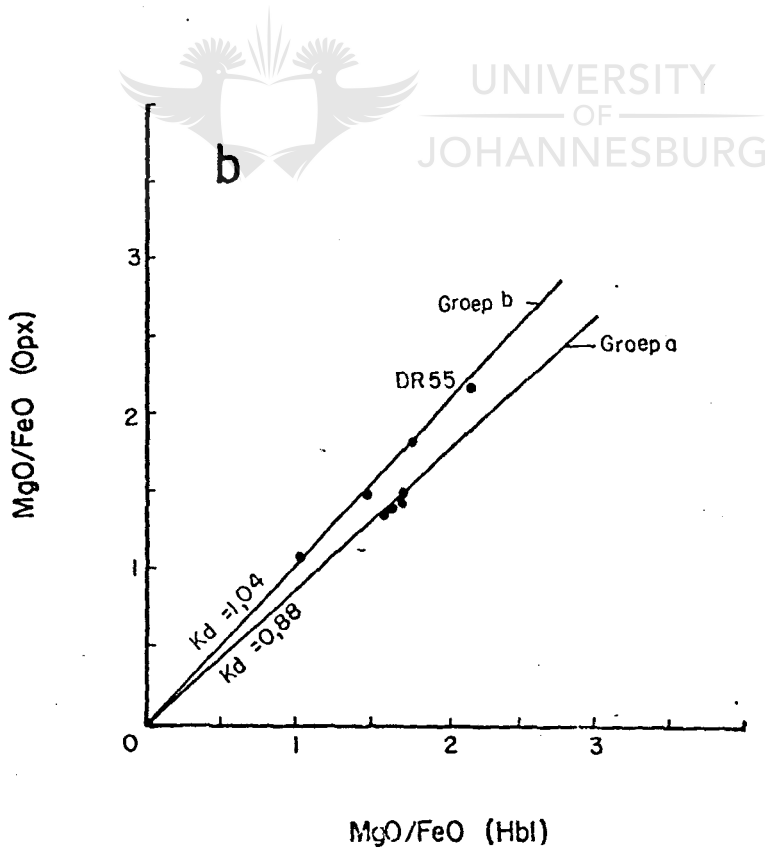
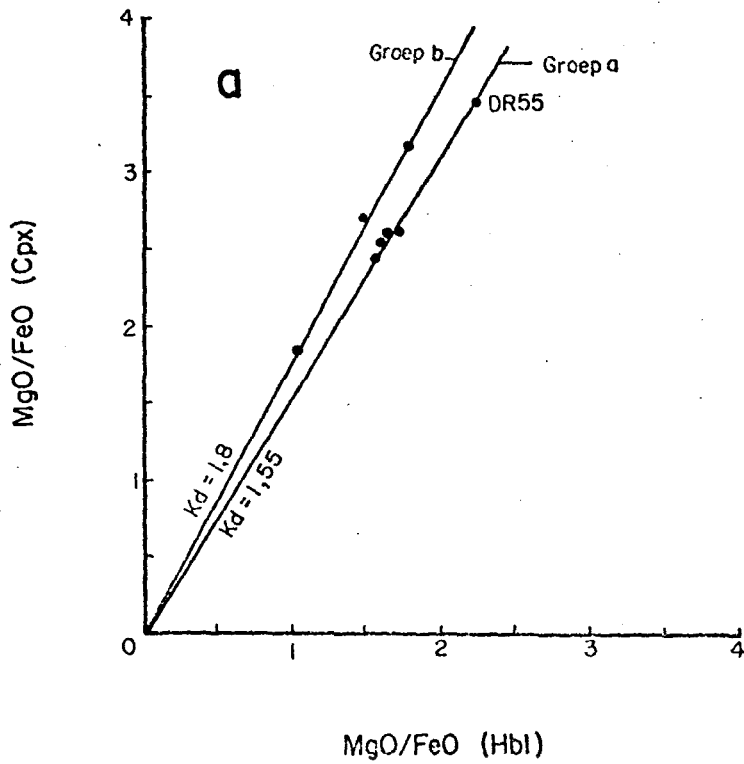
Die reëlmatige verspreiding van verdelingspunte in figuur 59 is 'n aanduiding dat die pirokseenpare in die hipersteen-ougietgranoliet by benadering as ideale binêre oplossings van MgO en FeO beskou kan word (Mueller, 1960; Kretz, 1963). Die verdeling van MgO en FeO tussen orto- en klinopirokseen in hierdie ondersoek is dus hoofsaaklik afhanklik van temperatuur. Kretz (1963) het byvoorbeeld aangetoon dat gemiddelde K_d -waardes vir metamorfe piroksene uit die literatuur (0,54) grootliks verskil van gemiddelde waardes vir stollingspiroksene (0,73), en dat hierdie verskille

hoofsaaklik aan temperatuurverskille toegeskryf kan word. Gegewens uit die literatuur (Binns, 1962; Davidson, 1968; Fleet, 1974) is egter nie altyd in ooreenstemming met hierdie voorstel nie.

Davidson (1968) het byvoorbeeld gevind dat variasies in Kd-waardes vir pirokseenpare van Quairading in Wes-Australië nie aan temperatuurverskille toegeskryf kan word nie maar wel gekoppel is aan variasies in die magnesiuminhoud van een of beide van die piroksene. Kd-waardes wissel byvoorbeeld vanaf 0,54 vir magnesiumryke ortopiroksene ($Mg/Mg+Fe^{+2} = 0,781$) tot 0,59 vir ysterryke ortopiroksene ($Mg/Mg+Fe^{+2} = 0,377$). Sy inligting is dus 'n aanduiding dat MgO en FeO nie ideale oplossings in een of beide piroksene vorm nie maar wel afhanklik is van intrakristallyne substitusie van Mg^{+2} en Fe^{+2} in die M_1 en M_2 oktaëdriese struktuurposisies. Hierdie voorstel het egter geen betrekking op die huidige ondersoek nie. Dit word duidelik geïllustreer deur die Mg-waardes van ortopirokseen met ooreenstemmende Kd-waardes in tabel 43 te vergelyk.

2.2.2 Hipersteen-Hornblende en Dugiet-Hornblende

Die verdeling van MgO en FeO tussen hornblende-pirokseenpare word in figure 60a en b geïllustreer. Die mees opvallende kenmerk van hierdie twee figure is die waarneming dat verdelingspunte vir beide ortopirokseen-hornblende en klinopirokseen-hornblende deur twee reëlmatige verdelingslyne gedefinieer word. Die ooreenstemmende Kd-waardes vir die twee mineraalpare word in tabel 44 vergelyk met verdelingskoëffisiënte vir hornblende-pirokseenpare uit verskillende granulietterreine. Monster DR 55 word buite rekening gelaat omdat hierdie monster nie langs ooreenstemmende verdelingslyne in figure 60a en b stip nie.



Figuur 60a Verdeling van MgO en FeO (mol %) tussen augiet en hornblende in die hipersteen-augietgranoliet.

Figuur 60b Verdeling van MgO en FeO (mol %) tussen hipersteen en hornblende in die hipersteen-augietgranoliet.

Tabel 44 Berekenende verdelingskoeffisiënte vir hornblende-pirokseenpare in die huidige ondersoek en uit die literatuur. $K_d = \text{MgO-FeO}$ (Pirok-Hbl). Groepe a en b verwys onderskeidelik na die twee verdelingslyne in figure 60a en b.

<u>Verwysing</u>	Kd(Opx-Hbl)	Kd(Cpx-Hbl)
Quairading, Wes-Australië Davidson (1971)	0,80(0,67-1,0)	1,44(1,2-1,87)
Madras; Sen (1970, Tabel 1)	0,76(0,63-0,97)	1,27(1,13-1,50)
Colton, Adirondaks; Sen (1970, Tabel 1)	0,863	1,630(1,54-1,73)
Broken Hill, Australië; Sen (1970, Tabel 1)	0,79(0,72-0,93)	1,42(1,29-1,51)
<u>Huidige ondersoek:</u>		
Groep b: M 201, M 194, M 130	1,05(1,02-1,07)	1,87(1,84-1,89)
Groep a: M 292, M 339, R 51, M 315	0,90(0,87-0,92)	1,56(1,51-1,63)

Verdelingskoeffisiënte vir hornblende-pirokseenpare in die groep a granoliete in bogenoemde tabel stem goed ooreen met gemiddelde K_d -waardes vir granulietterreine, terwyl waardes vir die groep b granoliete opvallend hoër is as dié uit die literatuur.

Die reëlmatige verspreiding van verdelingspunte langs twee opvallend verskillende verdelingslyne in figure 60a en 60b kan aan die hand van drie moontlike verklarings ondersoek word:

- (i) die versamelings verteenwoordig nie ewewig nie
- (ii) die verdelingskoeffisiënte is afhanklik van samestellingsfaktore (petrologiese faktore)
- (iii) die twee groepe K_d -waardes is verteenwoordigend van twee verskillende ewewigstoestande.

Die eerste moontlikheid kan slegs van toepassing wees op hornblende aangesien MgO en FeO baie reëlmatig verdeel is tussen samebestaande orto- en klinopirokseen (Fig. 59). Indien hornblende egter nie in ewewig met samebestaande

pirokseen is nie sou dit beteken dat die twee reëlmatige verdelingslyne in beide figure 60a en b blote toeval is. So 'n voorstel verklaar ook nie die waarneming dat die gemiddelde Kd-waarde vir die groep a granoliete goed ooreenstem met gemiddelde Kd-waardes vir granulietterreine nie (Tabel 44). Die moontlikheid dat die twee verdelingskoëffisiënte in figure 60a en b gekoppel is aan 'n gebrek aan ewewig word dus voorlopig buite rekening gelaat.

2.2.2.1 Faktore wat Kd (Pirok-Hbl) moontlik kan beïnvloed

a. Invloed van Al^{iv} en Ti^{vi} op die MgO/FeO-verhouding van hornblende

Die substitusie van Mg^{+2} en Fe^{+2} in hornblende word algemeen deur die volgende faktore beïnvloed:

- (i) variasies in Al^{iv} kan verantwoordelik wees vir groot verskille in die MgO/FeO-verhouding in hornblende (Saxena, 1968a; Kretz, 1960; Sen, 1973)
- (ii) die substitusie van Mg^{+2} en Fe^{+2} in hornblende kan ook beïnvloed word deur konsentrasies van ander oktaëdriese katione soos Al^{+3} , Ti^{+4} , Fe^{+3} (Saxena, 1968a).

Die waargenome verskille in verdelingskoëffisiënte vir die groep a en groep b granoliete in tabel 44 kan egter slegs aan bogenoemde samestellingsfaktore toegeskryf word indien die samestelling van hornblende in hierdie twee groepe hipersteen-ougietgranoliete sistematies verskil. Hierdie moontlikheid word aan die hand van toepaslike chemiese inligting vir hornblende en pirokseen in tabel 45 bespreek.

Tabel 45 Chemiese inligting vir samebestaende hornblende, ortopirokseen en kalsiumryke klinopirokseen in die groep a en groep b granoliete van tabel 44

Groep	Monster	XMg			Kd-MgO-FeO			Al ^{iv}	Ti ^{vi}	XMg (Geat.)
		Hbl	Opx	Cpx	Opx-Hbl	Cpx-Hbl	Opx-Cpx	Hbl	Hbl	
b	M 201	50,1	52,0	65,0	1,07	1,84	0,581	1,472	0,220	55,90
	M 194	59,3	59,8	73,1	1,02	1,87	0,546	1,538	0,224	70,60
	M 130	63,6	64,8	76,8	1,05	1,89	0,556	1,648	0,244	64,30
	DR 55	68,9	67,9	77,5	0,951	1,61	0,615	1,619	0,211	74,5
a	M 292	60,9	58,8	71,7	0,919	1,63	0,564	1,472	0,169	60,32
	M 339	61,4	58,4	70,6	0,884	1,514	0,584	1,344	0,222	64,10
	R 51	62,5	59,3	72,0	0,872	1,54	0,567	1,639	0,198	61,7
	M 315	62,5	60,3	72,1	0,914	1,55	0,589	1,398	0,222	66,20

Die gemiddelde Al^{iv} inhoud van hornblende in die groep b en groep a granoliete in tabel 45 is onderskeidelik 1,55 en 1,47 atome. Die gemiddelde Ti^{vi} inhoud vir die twee groepe is 0,229 atome (groep b) en 0,203 atome (groep a). Dit is onwaarskynlik dat bogenoemde klein verskille in die gemiddelde Al^{iv} en Ti^{vi} inhoud van hornblende verantwoordelik kan wees vir die opvallend verskillende Kd-waardes vir die twee groepe hipersteen-ougietgranuliete. Dit kan veral duidelik aan die hand van die Al^{iv} inhoud van hornblende geïllustreer word. Die verskil in Al^{iv} tussen groepe a en b is gemiddeld 0,08 atome. In teenstelling hiermee is die interne verskille in die Al^{iv} inhoud van hornblende in groepe b en a onderskeidelik 0,176 en 0,295 atome. Die interne verskille in Al^{iv} vir beide groepe is dus heelwat groter as die verskille tussen die twee groepe. Hierdie inligting is 'n goeie aanduiding dat die samestelling van hornblende nie verantwoordelik kan wees vir die twee groepe Kd-waardes in tabel 44 nie.

b. Reaksie-verwantskappe tussen hornblende, ortopirokseen en klinopirokseen

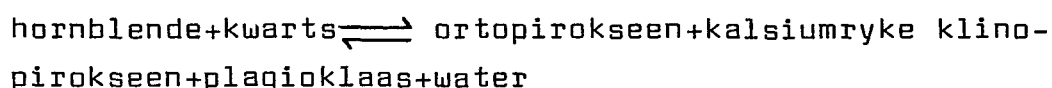
Die reëlmatige verspreiding van verdelingspunte in figure

60a en b is 'n aanduiding dat hornblende-pirokseenpare in die hipersteen-ougietsgranuliet moontlik twee opvallend verskillende ewewigstoestande definieer. Hierdie moontlikheid kan egter nie aan die hand van 'n detail petrografiese ondersoek bevestig word nie. Die twee verskillende groepe granuliete in tabel 44 besit presies dieselfde mineralogiese samestelling (ook wat die teenwoordigheid van magnetiet en ilminiet betref), en die voorkoms van hornblende verskil ook nie opvallend van een groep na die ander nie (Afd. IV-2.3). Dit is egter met verwysing na tabel 5 (Afd. IV-2) duidelik dat die groep b granuliete opvallend meer hornblende (gemiddeld 12,7 persent) as die groep a granuliete (gemiddeld 5,3 persent) bevat. So en behalwe die verskille in die hoeveelheid hornblende tussen die twee groepe hipersteen-ougietsgranuliete in tabel 44 moet daar egter ook genoem word dat 'n gebrek aan petrografiese inligting nie vanselfsprekend 'n aanduiding is dat verskillende ewewigsverwantskappe nie steeds verantwoordelik kan wees vir die verspreiding van verdelingspunte in figure 60a en b nie. Hierdie voorstel is heeltemal aanvaarbaar indien daar in gedagte gehou word dat dit nie altyd op petrografiese gronde moontlik is om prograad-hornblende in mafiese granuliete van retrograad hornblende te onderskei nie (Sen, 1970, p. 85).

Die metamorfe karakter van hornblende is vervolgens meer volledig aan die hand van 'n algemene reaksieverwantskap tussen hornblende en pirokseen op die oorgang tussen die amfiboliet- en granulietfasies ondersoek.

Mafiese gesteentes van voor-kambriese granulietterreine in die wêreld word algemeen deur die volgende mineraalversameling gekenmerk: hornblende, ortopirokseen, kalsiumryke klinopirokseen, plagioklaas (andesien tot labradoriet), magnetiet, ilmeniet en soms kwarts. Hierdie hornblende-pirokseengranuliete verteenwoordig dus beide die uitgangsfases en produkte van die algemene reaksie waarin hornblende op die oorgang tussen die amfiboliet- en granulietfasies

afbreek om pirokseen te vorm. Hierdie reaksie kan as volg in 'n vereenvoudigde vorm voorgestel word (Sen, 1970):



Sen (1970) het getoon dat indien hornblende 'n primêre (d.w.s. prograad) mineraal in bogenoemde versameling verteenwoordig behoort daar 'n sistematiese en voorspelbare verwantskap te bestaan tussen die MgO/FeO-verhouding van hornblende en samebestaande pirokseen - op so 'n manier dat variasies in die MgO/FeO-verhouding in hornblende gepaard sal gaan met ooreenstemmende sistematiese variasies in dieselfde verhouding in orto- en klinopirokseen. Dit beteken dus dat daar 'n onderlinge verwantskap moet wees tussen die verdelingskoëffisiënte van MgO en FeO vir samebestaande hornblende, ortopirokseen en kalsiumryke klinopirokseen.

Kd MgO-FeO (Opx-Cpx) besit gewoonlik 'n meer beperkte variasie as in die geval van die twee ander Kd-waardes (Sen, 1970, Tabel 1 en huidige inligting, Tabelle 43 en 45 en Fig. 59 en 60). Hierdie beperkte variasie van Kd (Opx-Cpx) word dus beheer deurdat Kd (Opx-Hbl) en Kd (Cpx-Hbl) verhoudingsgewys in dieselfde rigting verander om die variasie in Kd (Opx-Cpx) te beperk. Die model wat deur Sen (1970) voorgestel is kan dus getoets word deur vas te stel of daar 'n positiewe korrelasie tussen Kd MgO-FeO (Opx-Hbl) en Kd MgO-FeO (Cpx-Hbl) bestaan.

Die hipersteen-ougietgranoliete van die huidige ondersoek is vir hierdie doel by uitstel geskik vir 'n meer detail ondersoek van moontlike reaksie-verwantskappe tussen samebestaande hornblende, orto- en klinopirokseen in die Ortopirokseensone. Die gesteentes bestaan in die eerste plek uit al die lede van die voorgestelde reaksie waarin hornblende afbreek om pirokseen te vorm. In die tweede plek bestaan daar genoegsame petrografiese bewyse vir so 'n reaksie indien die mineraalversamelings aan weerskante van

die Ortopirokseenreasië-isograad met mekaar vergelyk word (Fig. 16, Afd. IV-2.4).

Die onderlinge afhanklikheid van K_d (Opx-Hbl) en K_d (Cpx-Hbl) kan, vir 'n eerste benadering, aan die hand van die relatiewe $MgO/MgO+FeO$ molekulêre verhoudings in samebestaande hornblende, orto- en klinopirokseen ondersoek word. Die volgende algemene afleidings kan met verwysing na tabel 45 gemaak word:

- (i) Die groep a granoliete word gekenmerk deur XMg-waardes wat onderling baie min vir hornblende, orto- en klinopirokseen verskil. In teenstelling hiermee verskil die XMg-waardes vir die groep b granoliete onderling grootliks.
- (ii) Hornblende in die groep a granoliete besit XMg-waardes wat intermediêr is tussen dié van ortopirokseen en klinopirokseen. Die moontlikheid bestaan dus dat die XMg-waardes van orto- en klinopirokseen gesamentlik gelyk is aan dié van hornblende. Hierdie moontlikheid word onder getoets. In die geval van die groep b granoliete besit hornblende 'n XMg-waarde wat deurgaans kleiner is as dié van ortopirokseen.
- (iii) Die XMg-waarde vir die moedergesteentes van die groep a granoliete verskil onderling ook baie min, terwyl die ooreenstemmende waardes vir die groep b granoliete weer eens onderling grootliks verskillend is.

Hierdie inligting is 'n aanduiding dat alhoewel die twee groepe granoliete in tabelle 44 en 45 mineralogies soortgelyk is, hulle tog deur opvallende chemiese verskille gekenmerk word. Hierdie chemiese verskille moet gevolglik verantwoordelik wees vir die verskillende K_d -waardes vir mineraalpare waarby hornblende as een fase betrokke is. Die beskikbare inligting in tabel 45 is dus 'n aanduiding

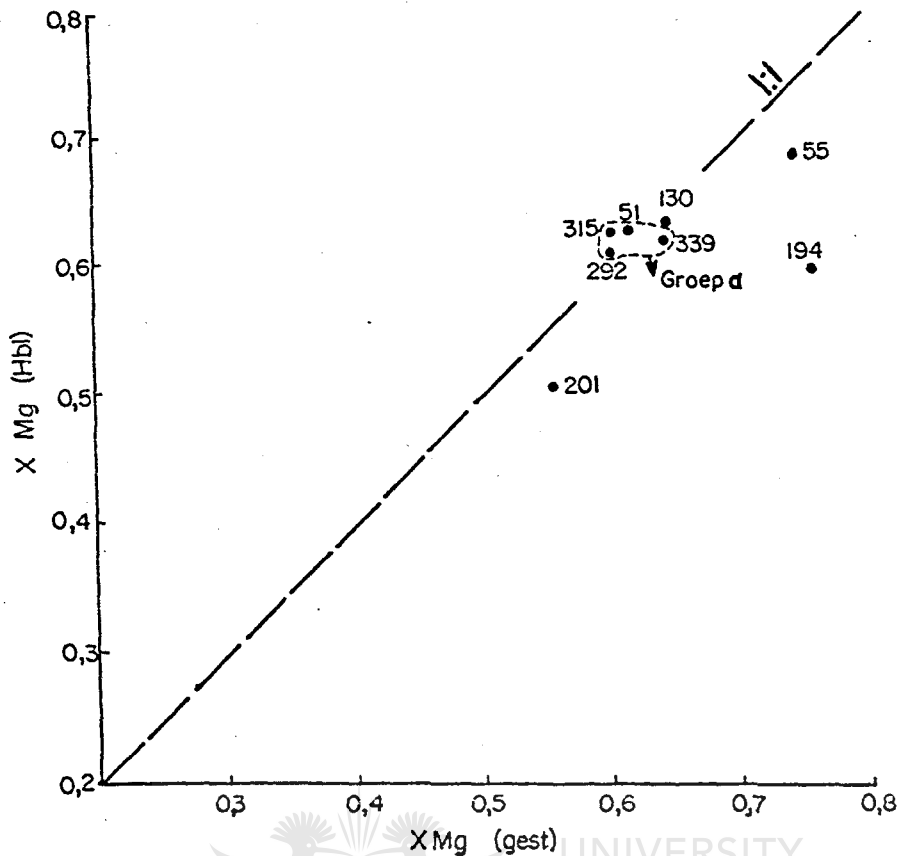
dat die mineraalversamelings in die groep a granoliete deur 'n opvallende reaksieverwantskap gekenmerk word. 'n Soortgelyke verwantskap is egter nie opvallend in die geval van die groep b granoliete nie.

Die voorgestelde reaksieverwantskappe vir die groep a granoliete is vervolgens in meer detail ondersoek.

c. Die samestelling van hornblende as 'n funksie van die samestelling van die moedergesteentes

Dit is duidelik dat alle beskikbare MgO en FeO in die moedergesteente (met die uitsondering van magnetiet en ilmeniet) in hornblende en pirokseen opgesluit is. Indien pirokseen dus reaksieprodukte van hornblende verteenwoordig, volg dit dat hornblende ook die enigste bron van MgO en FeO vir die ontwikkeling van pirokseen is. Die teenwoordigheid van prograad-hornblende in orto- en klinopirokseenbevattende mafiese granolite sal dus beteken dat hornblende en die moedergesteente dieselfde MgO/MgO+FeO-verhouding moet besit. Hierdie ideale 1:1 verhouding is onafhanklik van modale variasies in die verhouding van orto- tot klinopirokseen, en enige afwykings vanaf hierdie verhouding kan slegs te wyte wees aan die teenwoordigheid van FeO in magnetiet en ilmeniet.

Dit is uit figuur 61 duidelik dat hornblende en die moedergesteentes van die groep a hipersteen-ougietgranoliete deur dieselfde MgO/MgO+FeO (mol %) verhouding gekenmerk word. Hierdie gesteentes besit verskillende modale verhoudings van orto- tot klinopirokseen (Tabel 5, Afd. IV-2) en die moontlikheid bestaan dus dat die groep a granoliete verteenwoordigend is van onvolledige stadiums van die reaksie waarin hornblende afbreek om pirokseen te vorm. 'n Belangrike petrografiese gevolgtrekking is dat hornblende 'n primêre (prograad) mineraal in die groep a granoliete ver-



Figuur 61 Verwantskap tussen die $MgO/MgO+FeO$ -verhouding (mol %) van hornblende en van die Mafiese gneis.

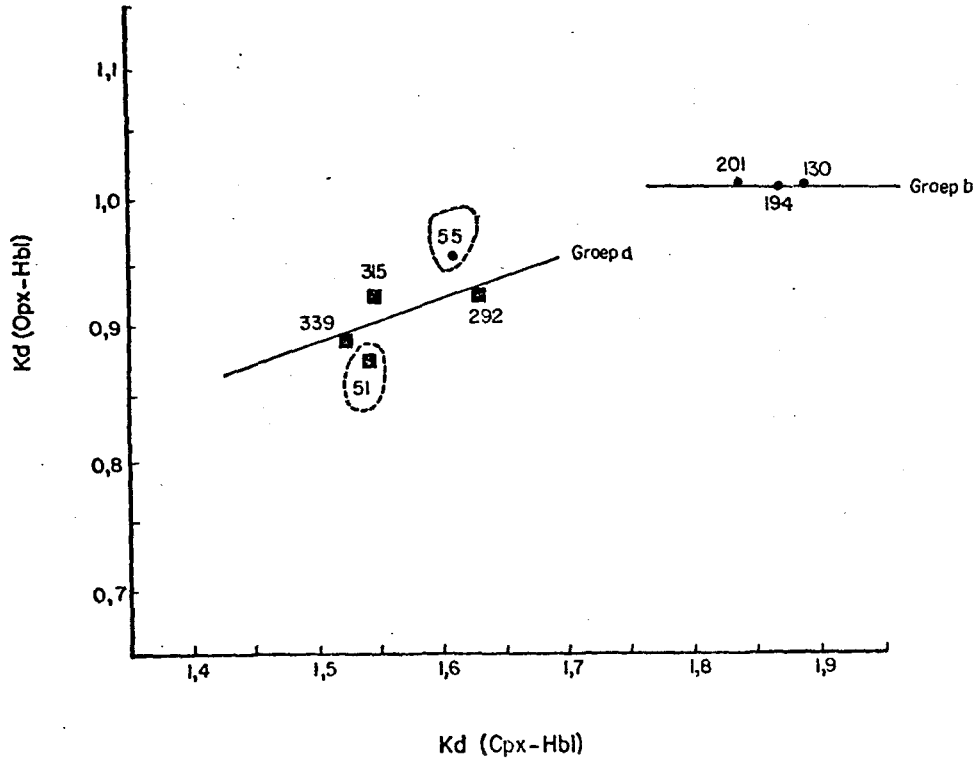
teenwoordig. Indien hornblende 'n sekondêre mineraal is sou dit beteken dat die modale verhoudings van orto- en klinopirokseen in die groep a granoliete toevallig in ooreenstemming is met die waarde wat benodig word om die verwantskap tussen die $MgO/MgO+FeO$ (mol %) verhouding van hornblende en die moedergesteentes te verklaar (Sen, 1970). Indien hierdie moontlikheid buite rekening gelaat word kan hornblende in die groep a granoliete dus as primêr beskou word terwyl hornblende in die groep b granoliete moontlik sekondêr (retrograad) is. Die afwyking vanaf die 1:1 verhouding van $MgO/MgO+FeO$ vir hornblende in die groep b granoliete kan nie toegeskryf word aan die teenwoordigheid of afwesigheid van magnetiet en ilminiet nie aangesien beide groepe gesteentes magnetiet en ilminiet bevat. 'n Logiese gevolgtrekking is verder dat $Kd MgO-FeO$ (Hbl-Pirok) in die groep a granoliete onderling afhanklik behoort te wees

terwyl die groep b granoliete deur 'n gebrek aan so 'n onderlinge verwantskap gekenmerk moet word.

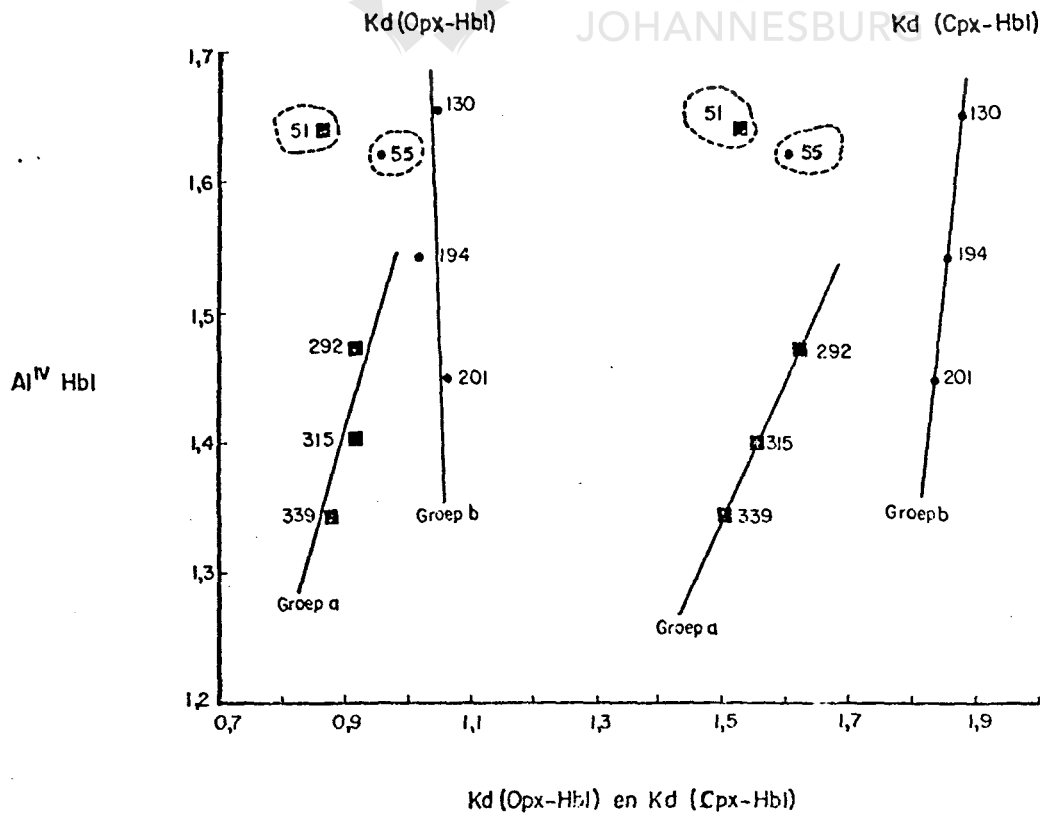
Die verwantskap tussen $Kd \text{ MgO-FeO (Opx-Hbl)}$ en $Kd \text{ MgO-FeO (Cpx-Hbl)}$ vir die twee groepe granoliete word in figuur 62a geïllustreer. Die gegewens in hierdie figuur is nie op genoegsame inligting gebaseer nie maar dit lyk tog asof daar geen korrelasie tussen die onderskeie Kd -waardes vir die groep b granoliete bestaan nie, terwyl die groep a granoliete wel deur 'n swak positiewe korrelasie gekenmerk word. Hierdie inligting is dus ook in ooreenstemming met die voorstel dat die groep a granoliete deur 'n prograadreaksie-verwantskap tussen hornblende, ortopirokseen en klinopirokseen gekenmerk word.

d. Die onderlinge invloed van Al^{iv} in hornblende op die verdeling van MgO en FeO tussen ortopirokseen-hornblende en klinopirokseen-hornblende

In die lig van die waargenome verskille tussen die twee groepe hipersteen-ougietgranoliete is dit interessant om die moontlikheid te ondersoek of Al^{iv} in hornblende ook 'n verskillende rol in die twee verskillende groepe gesteentes speel. Die verwantskap tussen Al^{iv} in hornblende en $Kd \text{ MgO-FeO (Pirok-Hbl)}$ word vir hierdie doel in figuur 62b geïllustreer. Die gebrek aan 'n opvallende korrelasie tussen bogenoemde waardes is onmiddellik opvallend in die geval van die groep b granoliete. In teenstelling hiermee besit $Kd \text{ MgO-FeO (Opx-Hbl)-Al}^{\text{iv}}$ en $Kd \text{ MgO-FeO (Cpx.Hbl)-Al}^{\text{iv}}$ 'n positiewe korrelasie in die geval van die groep a granoliete. Die anomale posisie van monster R 51 in hierdie figuur is gekoppel aan die grootliks verskillende Al^{iv} -inhoud van hornblende. Monster DR 55 val ook nie op ooreenstemmende verdelingslyne in figure 60a en b nie. Die rede vir hierdie afwykings is nie duidelik nie, maar kan of werklik wees of kan gekoppel wees aan analitiese foute.



Figuur 62a Verwantskap tussen Kd (Opx-Hbl) en Kd (Cpx-Hbl) vir die twee verskillende groepe hipersteen-ougietgranoliete in tabelle 44 en 45.



Figuur 62b Verwantskap tussen Al^{IV} (hornblende) en Kd (Opx-Hbl) en Kd (Cpx-Hbl) in die twee verskillende groepe hipersteen-ougietgranoliete in tabelle 44 en 45.

'n Verdere gevolgtrekking wat met verwysing na figuur 62b gemaak kan word is dat die verdeling van MgO en FeO tussen klinopirokseen en hornblende in die groep a granoliete meer afhanklik is van die Al^{iv} inhoud van hornblende as in die geval van ortopirokseen en hornblende. Dit word geïllustreer deur die waarneming dat $Kd\ MgO-FeO\ (Cpx-Hbl)$ 'n groter helling besit as $Kd\ MgO-FeO\ (Opx-Hbl)$. Hierdie gevolgtrekking is in ooreenstemming met soortgelyke beskikbare inligting uit die literatuur (Sen, 1973, Fig. 2).

2.2.2.2 Bespreking

Die chemiese ondersoek van ewewigsverwantskappe tussen samebestaande hornblende, ortopirokseen en kalsiumryke klinopirokseen in die hipersteen-ougietgranoliete van die Bandelierkop-Formasie is 'n aanduiding dat die twee groepe verdelingskoëffisiënte vir samebestaande ortopirokseen-hornblende en klinopirokseen-hornblende in figuur 60a en b nie aan die invloed van samestellingsfaktore of aan 'n gebrek aan chemiese ewewig toegeskryf kan word nie. Die twee groepe granoliete in tabelle 44 en 45 word deur sistematiese chemiese verskille gekenmerk wat gerieflik aan die hand van verskillende ewewigstoestande verklaar kan word. Die groep a granoliete word gekenmerk deur 'n positiewe verwantskap tussen die MgO/FeO verhoudings van hornblende, ortopirokseen, klinopirokseen en die moedergesteentes (Figure 60, 61 en 62a). Dit word geïllustreer deur die waarneming dat die gestipte posisies van hierdie groep gesteentes in bogenoemde figure in 'n baie beperkte gebied gekonsentreer is. Die groep b granoliete word weer deur 'n gebrek aan soortgelyke verwantskappe gekenmerk. Die verskille tussen die twee groepe granoliete word verder beklemtoon indien die onderlinge verwantskappe tussen $Kd\ MgO-FeO\ (Opx-Hbl)$, $Kd\ MgO-FeO\ (Cpx-Hbl)$ en die rol van Al^{iv} in hornblende vir die verskillende groepe ondersoek word (Fig. 62^b). Die beskikbare inligting is dus 'n goeie aan-

duiding dat die waargenome verskille tussen die groep a en groep b granoliete gekoppel is aan die metamorfe karakter van hornblende. Die groep a granoliete word gekenmerk deur 'n prograad-reaksieverwantskap tussen hornblende, ortopirokseen en klinopirokseen, en hornblende is dus 'n primêre mineraal in hierdie gesteentes. Indien hierdie gevolgtrekking dus korrek is beteken dit dat hornblende in die groep b hipersteen-ougietgranoliete sekondêr moet wees en dus ontwikkel het as gevolg van die hidrasie van hipersteen en ougiet in die Ortopirokseensone.

Daar is reeds genoem dat dit nie op petrografiese gronde moontlik is om hornblende in die groep a en groep b granoliete van mekaar te onderskei nie. Die enigste opvallende petrografiese eienskappe van die twee groepe granoliete is dat die eerste groep opvallend minder hornblende as die tweede groep bevat (Tabel 5). Hierdie toename in die modale persentasie hornblende vanaf gemiddeld 5,3 persent in die groep a granoliete tot 12,7 persent in die groep b granoliete is moontlik ook 'n aanduiding dat hierdie toename gekoppel is aan die retrogressiewe ontwikkeling van hornblende uit pirokseen. Dit is in hierdie opsig egter ook interessant dat hornblende in monster M 292 (groep a) op petrografiese gronde moontlik as van retrogressiewe oorsprong geïdentifiseer is (Afd. IV-2.3 en Fig. 15b), terwyl die chemiese inligting weer 'n aanduiding is dat hornblende in hierdie monster 'n prograadmineraal verteenwoordig. Die mikrosonde-analises vir hornblende is egter nie afkomstig vanaf die spesifieke korrels wat in figuur 15b geïllustreer word nie, maar wel vanaf 'n groter korrel in kontak met hipersteen. Hierdie korrel kan egter nie petrografies van hornblende in figuur 15b onderskei word nie. Die moontlikheid bestaan natuurlik dat beide prograad- en retrograad-hornblende in een monster teenwoordig kan wees. In die geval van die huidige ondersoek is onvoldoende mikrosonde-analises vir hornblende in individuele monsters beskikbaar om so 'n moontlikheid te ondersoek.

Die belangrikste vraag is egter of dit moontlik is om die beskikbare inligting uit die huidige ondersoek in verband te bring met moontlike variasies in die eksterne toestande van metamorfose. Hierdie moontlikheid kan met verwysing na die regionale verspreiding van die betrokke monsters in figuur 40 ondersoek word. Dit is uit hierdie figuur duidelik dat die twee groepe hipersteen-ougietgranoliete wel onderling 'n beperkte verspreiding in die Ortopirokseensone besit. Die moontlikheid dat die fisiese toestande van metamorfose dus ook vir die twee groepe gesteentes verskillend was kan nie uitgeskakel word nie. Die enigste uitsondering is monster R 51 (groep a) wat in dieselfde gebied as die groep b granoliete in figuur 40 dagsoom. Hierdie monster het egter ook 'n anomale posisie in figuur 62b.

3. EWEWIGSMODEL VIR HOË-GRAADSE METAMORFOSE IN DIE SUIDELIKE GRENSSONE VAN DIE LIMPOPO-METAMORFEKOMPLEKS

UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG

Die metamorfe ontwikkeling van die gebied onder bespreking kan volledig in terme van drie opeenvolgende periodes van hoë-graadse metamorfose beskryf word (Afd. IV-3 en Tabel 6). Hierdie voorgestelde model is uitsluitlik gebaseer op 'n detail petrografiese ondersoek van die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie. Die hoofdoel van die twee vorige afdelings (Afd. VI en VII) was om vas te stel of die beskikbare chemiese inligting gebruik kan word om hierdie petrografiese model te bevestig. Voordat daar oorgegaan word tot 'n bespreking van chemiese modelle vir ewewig is dit miskien wenslik om die toepaslike petrografiese en enkel-mineraal chemiese inligting kortliks op te som.

3.1 PETROGRAFIESE INLIGTING

Die ewewigsaspekte van die eerste (M_1) periode van granulietgraad van metamorfose kan op petrografiese gronde slegs indirek afgelei word. Die reaksieverwantskap tussen granaat, kordiëriet en hipersteen in die koronateksture (Fig. 11a) en die teenwoordigheid van twee generasies van hipersteen in dieselfde monster, is 'n goeie aanduiding dat die eerste periode van metamorfose gekenmerk is deur die stabiele assosiasie van granaat en hipersteen in die Ortopirokseensone. Die tweede (M_2) periode van granulietgraad van metamorfose definieer die eerste verskyning van kordiëriet in die Ortopirokseensone as gevolg van die koronareaksie waarin granaat afbreek om kordiëriet en addisionele hipersteen te vorm. Samebestaande kordiëriet, granaat en hipersteen vorm 'n stabiele assosiasie in die M_2 -Ortopirokseensone en gevolglik kan die afleiding gemaak word dat die ooreenstemmende fisiese toestande baie konstant oor 'n groot gebied was (Fig. 22). Die laaste (M_3) periode van hoë-amfibolietgraad van metamorfose word slegs in die suidelike gedeelte van die gebied onder bespreking waargeneem (Fig. 22). Hierdie periode van metamorfose is verantwoordelik vir die huidige regionale verspreiding van die metamorfe sones en word gedefinieer deur die hidrasie van kordiëriet en hipersteen langs die M_3 -Ortopirokseenreaksie-isograad. Die hoofinvloed van hierdie jongste periode van metamorfose was dus 'n vernouing van die M_2 -Ortopirokseensone wat vroeër 'n wyer verspreiding besit het. Alhoewel die effek van M_3 grootliks beperk is tot die suidelike gedeelte van die gebied kan tekens van hierdie periode van metamorfose in sommige monsters van die Ortopirokseensone waargeneem word as die aanvanklike hidrasie van kordiëriet na 'n fynkorrelrige vergroeiing van gedriet en kianiet (Fig. 13b en c). Die goed gedefinieerde karakter van die M_3 -Ortopirokseenreaksie-isograad (Fig. 22) is 'n aanduiding dat die ooreenstemmende fisiese toestande ook baie konstant oor 'n groot gebied was.

3.2 ENKELMINERAAL-CHEMIESE INLIGTING

Die detail chemiese ondersoek van individuele metamorfe minerale in die Pelitiese gneis het die volgende inligting gelewer wat in ooreenstemming is met veranderende fisiese toestande van metamorfose in die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfekompleks:

- (i) die omgekeerde sonering van granaat wat hoofsaaklik beperk is tot die Ortoamfiboolsone maar wat ook in twee monsters van die Ortopirokseensone waargeneem is (Afd. VI-1.2.3). Die omgekeerde karakter van hierdie sonering is nie slegs 'n aanduiding van afnemende fisiese toestande nie maar voorsien ook van die min beskikbare inligting vir 'n vroeëre periode van metamorfose in die Ortoamfiboolsone
- (ii) die verskil in samestelling tussen groot granaatkristalle en klein insluitsels in kordiëriet wat in ooreenstemming is met die omgekeerde sonering van granaat (Afd. VI-1.2.3)
- (iii) die sonering van kordiëriet in kontak met granaat in die koronateksture van die Ortopirokseensone (Afd. VI-1.1.3)
- (iv) die variasie in die samestelling van biotiet in individuele monsters, en tot 'n mindere mate ook dié van ortoamfibool (Afd. VI-1.4.3 en 1.5.6).

Die reëlmatige verdeling van MgO en FeO tussen samebestaande granaat, hipersteen en kordiëriet in die Ortopirokseensone is 'n goeie aanduiding dat hierdie minerale onderling in ewewig is. Die verspreiding van verdelingspunte ten opsigte van die verdelingslyne in figure 49, 50 en 52 kan wel nie in terme van absolute ewewig beskryf word nie. Dit sou egter onrealisties wees om te verwag dat monsters wat oor 'n gebied van meer as 4 500 km² versprei is presies dieselfde ewewigstoestand definieer. Die waargenome afwykings van

sommige verdelingspunte vanaf die reëlmatige verdelingslyne in bogenoemde figure is dus moontlik te wyte aan afwykings vanaf ewewig as gevolg van variasies in een of meer van die eksterne gekontroleerde fisiese veranderlikes (T, P en μ_{H_2O}).

Die verdeling van MgO en FeO tussen mineraalpare wat biotiet insluit is altyd baie minder reëlmatig as in bogenoemde gevalle. Samebestaande kordiëriet-biotiet en hipersteen-biotiet in die Ortopirokseensone vertoon beide opvallende afwykings vanaf die gemiddelde verdelingslyne in figure 53 en 54. Dieselfde geld vir samebestaande biotiet-granaat (Fig. 55) in dieselfde metamorfe sone. Hierdie verstrooiing van verdelingspunte kan nie alleen aan die hand van samestellingsfaktore (bv. die konsentrasie van Mn^{+2} en Ca^{+2} in granaat en Ti^{+4} in biotiet) verklaar word nie. Die mees aanvaarbare voorstel is dat biotiet meer sensitief is vir variasies in die eksterne fisiese toestande, en dat die verstrooiing van verdelingspunte in verdelingsdiagramme waarin biotiet een van die fases is toegeskryf kan word aan afwykings vanaf die hoof-ewewigstoestand (Afd. VII-2.1.2.3a en 2.1.2.3b). Dieselfde geld vir biotiet-granaatpare uit die Ortoamfiboolsone. Die gemiddelde verdelingskoeffisiënte vir MgO en FeO is verder opvallend verskillend vir biotiet-granaatpare uit die Ortoamfibool- en Ortopirokseensones (Fig. 55b).

Die Mafiese gneis is mineralogies en tekstureel baie meer eenvoudig as die Pelitiese gneis en vertoon petrografies min tekens van die komplekse metamorfe geskiedenis. Die situasie verander egter indien die chemiese ewewigsverwantskappe tussen samebestaande hornblende, ortopirokseene en klinopirokseene ondersoek word. Die verdeling van MgO en FeO is baie reëlmatig vir orto- en klinopirokseene (Fig. 59) maar verander indien hornblende een van die fases is (Fig. 60a en b). Ortopirokseene-hornblende en klinopirokseene-hornblende definieer twee opvallend verskillende ewewigstoestande wat moontlik gekoppel kan word aan die

prograad- of retrograadkarakter van hornblende in die hipersteen-ougietgranoliet. Hierdie verskillende voorkoms-wyse van hornblende kan egter nie maklik in verband gebring word met metamorfe ontwikkeling van die gebied nie. Die moontlikheid bestaan egter dat die prograad-hornblende ver-teenwoordigend is van M_2 terwyl die retrograad-hornblende weer aan M_3 gekoppel is.

3.3 VOORGESTELDE EWEWIGSMODEL

Ewewigsverwantskappe in metamorfe gesteentes kan basies aan die hand van drie termodinamiese ewewigsmodelle ondersoek word, naamlik lokale (of mosaiek) ewewig, retrograad-ewewig en wydverspreide ewewig (Hess, 1971; Osberg, 1971; Zen, 1963). Die beskikbare chemiese en petrografiese inligting uit die huidige ondersoek sal kortliks met verwysing na bogenoemde modelle bespreek word. Hierdie bespreking is beperk tot die M_2 en M_3 periodes van metamorfose.

3.3.1 Model vir lokale (mosaiek) ewewig

Die model vir lokale chemiese ewewig vereis dat die samestelling van 'n mineraal deur die lokale chemiese omgewing beheer word met die gevolg dat slegs fases in direkte kontak in ewewig met mekaar is. Dit beteken dus dat 'n gesteente of slypplaatjie in kleiner sub sisteme onderverdeel kan word. Elke sub sisteem bestaan dan uit 'n mineraalversame-ling wat onderling in kontak is, maar die totale chemiese samestelling van hierdie sub sisteem sal verskil van dié van 'n soortgelyke aanliggende sisteem. Die verskillende sub sisteme is dus nie onderling in ewewig met mekaar nie alhoewel die eksterne fisiese toestande natuurlik dieselfde is. Hierdie model kan getoets word deur vas te stel of die samestelling van 'n spesifieke mineraal of minerale van een

punt na 'n ander in individuele gesteentes varieer.

Die variasie in die samestelling van biotiet, en tot 'n mindere mate ook van ortoamfibool, in individuele monsters kan moontlik 'n aanduiding wees van lokale ewewig in die Pelitiese gneis. Die teenwoordigheid van primêre antofilliet en gedriet in dieselfde monsters langs die Ortopirokseenisograad, en die variasie in die samestelling van hierdie ortoamfibole (Tabel 28), sou moontlik die beste bewys wees vir so 'n lokale ewewigsmodel indien daar ook bewys kan word dat antofilliet en gedriet in gesteentes langs die Ortopirokseenisograad wel bo die solvus in die antofilliet-gedrietreeks gekristalliseer het (Afd. VI-1.5.6 en Fig. 38). Die reëlmatige verdeling van MgO en FeO tussen samebestaande antofilliet en gedriet langs die Ortopirokseenisograad en uit die Ortoamfiboolzone (Fig. 57) is egter 'n aanduiding dat hierdie twee minerale saam in ewewig benede die solvus in figuur 38 gekristalliseer het. Die volgende inligting is ook nie in ooreenstemming met 'n model vir lokale chemiese ewewig nie:

- (i) die konstante samestelling van hipersteen, granaat en kordiëriet in individuele monsters van die kordiëriet-granaatgranoliet in die Ortopirokseenzone. Die waargenome sonering van kordiëriet in die koronateksture van hierdie gesteentes is beperk tot 'n baie smal randzone in direkte kontak met granaat;
- (ii) die waarneming dat die wurmagtige vergroeiings van hipersteen in kordiëriet van die koronateksture nie in samestelling verskil van die groot kristalle nie (Tabel 19);
- (iii) die konstante samestelling van granaat, en in die meeste gevalle ook van ortoamfibool, in die ortoamfiboolgneis van die Ortoamfiboolzone. Hierdie waarneming geld vir beide die kern- en randsamestelling in gevalle waar granaat gesoneerd is (Tabelle 13b en c).

Die konstante samestelling van bogenoemde minerale in individuele gesteentes kan slegs verklaar word indien die minerale in 'n homogene chemiese omgewing gegroei het. 'n Lokale ewewigmodel kan ook nie die reëlmatige verdeling van MgO en FeO tussen mineraalpare (met die uitsondering van biotiet) verklaar nie.

3.3.2 Model vir retrograadewewig en wydverspreide ewewig

Na aanleiding van die retrograadmodel (Hess, 1971) het die mineraalversamelings tydens 'n hoofperiode van metamorfose onder toestande van wydverspreide ewewig gevorm. Hierdie wydverspreide ewewig is egter deur 'n latere termiese gebeurtenis versteur wat gewoonlik deur lokale ewewig gekenmerk word (Hess, 1971; Dallmeyer, 1974b). Gedurende hierdie tweede gebeurtenis is die kontakverwantskappe van minerale (bv. kordiëriet en granaat) dus onderhewig aan lokale ewewig, en die interne- en randsamestelling van die twee minerale wat in direkte kontak met mekaar is verteenwoordig dus twee verskillende ewewigstoestande. Die model van retrograadewewig as gevolg van 'n daaropvolgende termiese gebeurtenis is ook nie van toepassing op die gebied onder bespreking nie. Die hoofrede hiervoor is dat die latere termiese gebeurtenis (d.w.s. die M_3 -periode van metamorfose) nie van 'n lokale omvang is nie, en ook nie aanleiding gegee het tot lokale ewewig nie. Die model vir wydverspreide ewewig bied die enigste aanvaarbare verklaring vir die metamorfe ontwikkeling van die gebied en is die enigste model wat in ooreenstemming is met al die beskikbare petrografiese en chemiese inligting.

Die M_2 -periode van hoë-gradse metamorfose is dus gekenmerk deur wydverspreide ewewig waartydens kordiëriet, granaat en hipersteen 'n stabiele assosiasie oor 'n gebied van meer as 4 500 km² gevorm het. Hierdie hoofperiode van metamor-

fose is versteur deur die jonger M_3 -periode van laergraadse metamorfose wat beperk is tot die gebied suid van die Ortopirokseerreaksie-isograad en wat ook gekenmerk is deur 'n algemene neiging tot wydverspreide ewewig. Dit word geïllustreer deur die goed gedefinieerde karakter van die Ortopirokseerisograad en die volledige herkristallisatie van die granoliet-mineraalversamelings in die Ortoamfiboolsone. Volkome ewewig is egter nie gedurende hierdie laaste periode van metamorfose bereik nie en die variasie in die samestelling van biotiet en ortoamfibool, en die sonering van granaat is aanduidings van gelokaliseerde uitruiling van katione in 'n poging om by die nuwe ewewigstoestande aan te pas. Die invloed van M_3 op mineraalversamelings in die huidige (of M_2) Ortopirokseerzone was egter van 'n baie beperkte aard en kan slegs waargeneem word as die sonering van kordieriet in kontak met granaat, die variasie in die samestelling van biotiet en die aanvanklike hidrasie van kordieriet in sommige monsters. Die teenwoordigheid van sekondêre (retrograad) hornblende in sommige monsters van die hipersteen-ougietgranoliete is moontlik 'n verdere aanduiding van die beperkte invloed van die laaste periode van metamorfose in die M_2 -Ortopirokseerzone.

In opsomming kan daar dus gesê word dat die beskikbare inligting 'n goeie aanduiding is dat die mineraalversamelings in beide die M_2 -Ortopirokseerzone en die M_3 -Ortoamfiboolsones by benadering as ewewigversamelings beskou kan word. Alhoewel die laaste periode van metamorfose dus waarskynlik gekoppel is aan klassieke retrograadmetamorfose (Afd. X-3) het dit steeds gepaard gegaan met 'n toestand van wydverspreide ewewig.

AFDELING VIII

FASE - PETROLOGIE



VAN DIE

BANDELIERKOP-FORMASIE

1. INLEIDING

1.1 ALGEMEEN

Mineraalversamelings in metamorfe gesteentes verskaf die basiese inligting in verband met die fisies-chemiese toestande waaronder die gesteentes gevorm het. Die petrografiese aspekte van ewewig in die Pelitiese gneis is reeds volledig bespreek (Afd. IV-1.2), en na aanleiding van die toepassing van die elementverdelingsteorie (Afd. VII) is die gevolgtrekking gemaak dat die meeste mineraalversamelings in hierdie gesteentes as ewewigsversamelings beskou kan word. Verdelingsdiagramme en metamorfe "fase-diagramme" (AFM-diagramme) is natuurlik basies verwant, maar AFM-diagramme is meer omvattend aangesien hierdie diagramme nie slegs die samestelling van individuele minerale en die totale samestelling van die gesteentes insluit nie, maar ook die stabiliteitsvelde en moontlike reaksie-verwantskappe tussen mineraalversamelings definieer.

* Die toepassing van AFM-diagramme in die detail ondersoek van faseverwantskappe in pelitiese sisteme het 'n groot bydrae gelewer tot die beskikbare kennis in verband met die invloed van totale chemiese samestelling en veranderende fisiese toestande op die teenwoordigheid of afwesigheid van belangrike indeksminerale soos byvoorbeeld kordiëriet en almandiet in pelitiese gesteentes (Thompson, 1957; Reinhardt, 1968). Hierdie diagramme het 'n voordeel bo die konvensionele ACF- en A'KF-diagramme aangesien dit faseverwantskappe tussen ferromagnesiese minerale met wisselende MgO/FeO verhoudings baie meer doeltreffend weerspieël.

Die teenwoordigheid van kordiëriet in pelitiese metamorfe gesteentes het die afgelope aantal jare veral baie belangstelling uitgelok. Kordiëriet besit 'n wye verspreiding in lae- tot medium-druk metamorfe omgewings en vorm 'n stabiele

mineraal in assosiasie met verskeie kombinasies van minerale soos kwarts, aluminiumsilikate, muskowitziet, biotiet, almandiet, K-veldspaat, stouroliet, hipersteen, kianiet en ortoamfibool. Stabiele assosiasie van kordiëriet met kombinasies van die eerste sewe minerale is die mees algemene verskynsel, en is in detail beskryf deur onder andere Wynne-Edwards en Hay, 1963; Barker, 1962, Reinhardt, 1968; Dallmeyer en Dodd, 1971; Harris, 1976; Kays en Medaris, 1976; Blümel en Schreyer, 1977 en Hollister, 1977. Kordiëriet-ortoamfiboolversamelings is minder algemeen maar detail beskrywings van kordiëriet in assosiasie met antofilliet of gedriet word gegee deur onder andere Lal en Moorehouse, 1969; Chinner en Fox, 1974; Robinson en Jaffe, 1971; Ramsay en Kamineni, 1977; en Stout, 1972.

Kordiëriet in assosiasie met almandiet en hipersteen, en die teenwoordigheid van meer as een tipe ortoamfibool (antofilliet en gedriet) in dieselfde gesteente is egter verskynsels wat baie minder algemeen in die literatuur beskryf word. Die enigste beskrywing van samebestaande ortoamfibole word vir versamelings van Telemark, Noorweë (Stout, 1971 en 1972) gegee, terwyl samebestaande almandiet, kordiëriet en hipersteen onder andere deur Dougan, 1974; Rabkin, 1968 en Berg 1977 beskryf word.

Die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie bestaan uit 'n groot verskeidenheid mineraalversamelings wat hoofsaaklik gekoppel is aan veranderende fisiese toestande tydens drie opeenvolgende periodes van hoë-graadse regionale metamorfose. Die huidige verspreiding van die Ortoamfibool- en Ortopirokseensones, en die goed gedefinieerde karakter van die Ortopirokseereaksie-isograad (Fig. 2), skep dus 'n ideale geleentheid om die veranderende stabiliteitsverwantskappe van minerale soos kordiëriet, almandiet, hipersteen, ortoamfibole en kianiet in detail te ondersoek.

Die hoofdoel van hierdie afdeling is dus om die fase-verwantskappe van mineraalversamelings in die Pelitiese gneis

te ondersoek wat deur middel van die volgende algemene metamorfe reaksies aan mekaar gekoppel kan word (Afd. IV-3).

- (i) granaat+kwarts \longrightarrow kordiëriet+hipersteen
- (ii) kordiëriet+water \longrightarrow gedriet+kianiet
- (iii) hipersteen+water \longrightarrow antofilliet

Die eerste reaksie definieer die oorgang tussen die M_1 en M_2 periodes van granolietgraad van metamorfose en is 'n deurlopende reaksie wat aanleiding gee tot die stabiele assosiasie van kordiëriet, granaat en hipersteen binne die huidige Ortopirokseensone. Die tweede en derde reaksies is aan die oorgang tussen die M_2 en M_3 periodes van metamorfose gekoppel en definieer die huidige posisie van die M_3 -Ortopirokseenreaksie-isograad.

Hierdie reaksies is reeds petrografies beskryf, en in hierdie afdeling word die geassosieerde mineraalversamelings aan die hand van die AFM-topologie ondersoek. 'n Poging word ook aangewend om variasies in die AFM-topologie vir dieselfde mineraalversamelings in verskillende monsters in terme van veranderinge in die fisiese toestande van metamorfose te interpreteer. 'n Voorlopige model vir faseverwantskappe tussen kordiëriet, hipersteen, antofilliet, gedriet en kianiet oor die Ortopirokseenreaksie-isograad word in afdeling X-3 aan die hand van 'n geometriese analise ondersoek.

1.2 ASPEKTE VAN DIE TOTALE CHEMIESE SAMESTELLING VAN DIE PELITIESE GNEIS

Die totale chemiese samestelling van die Pelitiese gneis in die verskillende metamorfe sones is reeds met verwysing na tabel 8 en figure 18a-c in afdeling V bespreek. Sekere aspekte van die samestelling van hierdie gesteentes hou

egter direk verband met die voorgenome ondersoek van fase-verwantskappe en word dus weer een beklemtoon. Vir die doel van hierdie bespreking word daar slegs verwys na monsters waarvoor beide totale- en enkelmineraal-chemiese analyses beskikbaar is.

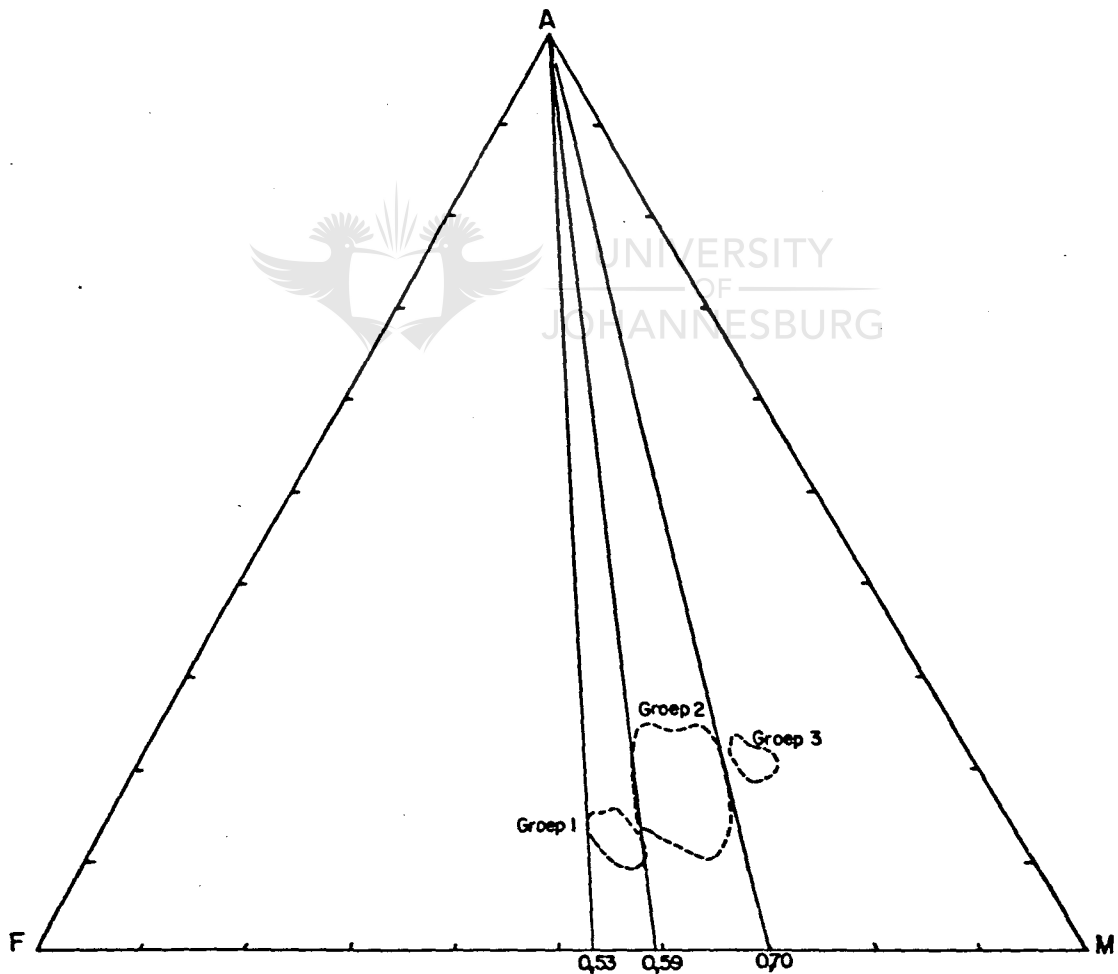
Die mees opvallende chemiese en mineralogiese verskille tussen die drie hoofgroepe gesteentes (in Tabel 8) word hier in tabel 46 opgesom en in figuur 63 geïllustreer. Die groep 4 gesteentes (granaat-biotietgneisse in Tabel 8) word nie by hierdie bespreking betrek nie omdat toepaslike inligting slegs vir twee monsters langs die Ortopirokseens-isograad beskikbaar is.

Dit is met verwysing na figuur 63 eerstens duidelik dat die mineralogiese verskille binne elke groep in die verskillende metamorfe sones slegs gekoppel kan wees aan variasies in die fisiese toestande van metamorfose. Die belangrikste afleiding wat egter op grond van die inligting in tabel 46 en figuur 63 gemaak kan word is dat die waargenome mineralogiese variasies van een groep na 'n ander in dieselfde metamorfe sone gekoppel is aan ooreenstemmende variasies in die gemiddelde chemiese samestelling.

Kordiëriet (en gedriet) is beperk tot gesteentes met 'n M-waarde groter as 0,59, terwyl granaat weer beperk is tot gesteentes met 'n M-waarde kleiner as 0,70. Kordiëriet en granaat vorm dus 'n stabiele assosiasie in gesteentes met 'n M-waarde tussen 0,59 en 0,70. Dit is in hierdie opsig veral belangrik om daarop te let dat die afwesigheid van granaat in die granaatvrye kordiërietgranoliete van die Ortopirokseensone (Groep 3), en dus die volledige verloop van die reaksie (granaat+kwarts \rightleftharpoons kordiëriet+hipersteen) ^{geïllustreer} nie slegs gekoppel is aan veranderende fisiese toestande tydens M_2 nie, maar waarskynlik ook deur die chemie van die gesteentes beheer word. Op 'n soortgelyke wyse word die afwesigheid van kordiëriet (en dus van bogenoemde reaksie) in die kordiërietvrye granaatgranoliete (Groep 1) van die Ortopirokseensone weer moontlik slegs deur die chemiese

Tabel 46 Opsamling van die belangrikste chemiese en mineralogiese verskille tussen die drie hoofgroepe Pelitiese gneis. in tabel 6 van Afdeling V. Die A- en M-waardes is met verwysing na figuur 63

	Gemiddelde A-waarde	M-waarde
Groep 1 : Gran + Biot + Hip + Ant	0,13	0,53-0,59
Groep 2 : Gran + Biot + Kord + Hip + Ant + Ged + Kian	0,18	0,59-0,70
Groep 3 : Biot + Kord + Hip + Ant + Ged + Kian	0,21	0,71-0,75



Figuur 63 AFM-diagram (projeksie deur K/vs) wat die samestelling van die drie hoofgroepe Pelitiese gneis in die verskillende metamorfe sones illustreer (tabel 45). Die inligting in hierdie figuur is slegs van toepassing op gesteentes waarvoor beide totale chemiese analises en mikrosonde analises beskikbaar is.

samestelling van hierdie gesteentes beheer. Die fisiese toestande van metamorfose het egter die bepalende rol gespeel in die waargenome stabiliteitverwantskappe van kordiëriet en granaat in die Ortopirokseensone. Kordiëriet is hiervolgens hoofsaaklik beperk tot die Groep 2 en 3 gesteentes gedurende die tweede (M_2) periode van metamorfose, terwyl granaat weer voor M_2 stabiel was in al die verskillende groepe gesteentes in tabel 46.

Die hoofdoel van hierdie afdeling is dus om die invloed van beide die chemiese samestelling en fisiese toestande van metamorfose op die stabiliteitsverwantskappe van kordiëriet, granaat, hipersteen, biotiet, antofilliet, gedriet en kianiet uit 'n kwantitatiewe oogpunt te ondersoek. AFM-diagramme word baie algemeen vir hierdie doel gebruik. Die studie van fase-verwantskappe in enige metamorfe sisteem is egter éérstens afhanklik van die suksesvolle toepassing van Gibbs se fasereël, en gevolglik kan 'n AFM-diagram (of enige ander metamorfe diagram) slegs as 'n fase-diagram beskou word indien die konstruksie van hierdie diagram voldoen aan die basiese vereistes wat deur die fasereël gestel word. Die basiese beginsels gekoppel aan die toepassing van die fasereël is welbekend aan metamorfe petroloë en wil dus nie onnodig herhaal word nie. Die bespreking van enkele belangrike aspekte van die gebruik van die fasereël in die konstruksie en toepassing van AFM-diagramme is egter geregverdig in die lig van die benadering wat in hierdie ondersoek vir die voorstelling en interpretasie van die analitiese gegewens gebruik word.

1.3 KONSTRUKSIE VAN DIE AFM-DIAGRAM

1.3.1 Die toepassing van die fasereël

Die toepassing van die Gibbs Fasereël ($F = C - P + 2$) in meta-

morfose is gebaseer op die aanname dat 'n gegewe mineraalversameling (gesteente) in 'n toestand van chemiese ewewig is, en gevolglik kan so 'n gesteente as 'n versameling van komponente (C) en fases (P) in 'n termodinamiese sisteem beskou word. Die suksesvolle toepassing van die fasereël word egter in die algemeen grootliks beperk deur die korrekte identifikasie van die aantal fases en aantal komponente wat die ontwikkeling van die ewewigsversameling beheer het (Zen, 1963, p. 929). Dit is duidelik dat die blote toepassing van die fasereël op 'n sisteem wat by konstante temperatuur en druk in ewewig is byvoorbeeld geen inligting verskaf in verband met die moontlikheid dat die sisteem byvoorbeeld "geslote" mag wees vir sekere chemiese komponente, en "oop" mag wees vir ander chemiese komponente. Hierdie probleem het betrekking op die sogenaamde "mobiele" en "inerte" komponente in metamorfose (Korzhinski, 1959; Thompson, 1955 en 1957; Zen, 1963; Reinhardt, 1968).

Na aanleiding van Korzhinski kan die onafhanklike chemiese komponente in twee groepe onderverdeel word naamlik (i) komponente waarvan die chemiese potensiaal die onafhanklike veranderlikes is (mobiele komponente) en (ii) komponente waarvan die hoeveelhede (mol fraksies) die onafhanklike veranderlikes is (inerte komponente). Die chemiese potensiaal van 'n inerte komponent word dus deur die konsentrasie van hierdie komponent in die sisteem beheer, terwyl die chemiese potensiaal van 'n mobiele komponent ekstern gekontroleer word. Die belangrike punt wat hier ter sprake is, is dat die stabiliteitsveld van 'n mineraal wat 'n "mobiele" komponent bevat nie slegs afhanklik is van temperatuur en druk nie, maar ook afhanklik is van die chemiese potensiaal van die mobiele komponent in die omgewing. Die chemiese potensiaal van hierdie mobiele komponent is dus onafhanklik van temperatuur en druk aangesien die moontlikheid bestaan dat hierdie komponent tussen die sisteem en die omgewing kan beweeg. In 'n geslote sisteem word die chemiese potensiaal van enige komponent bepaal deur die temperatuur, druk en totale samestelling van die sisteem. Die fasereël vir

"oop"-sisteme kan na aanleiding van hierdie bespreking as volg geskryf word (Korzhinski, 1959, p. 62):

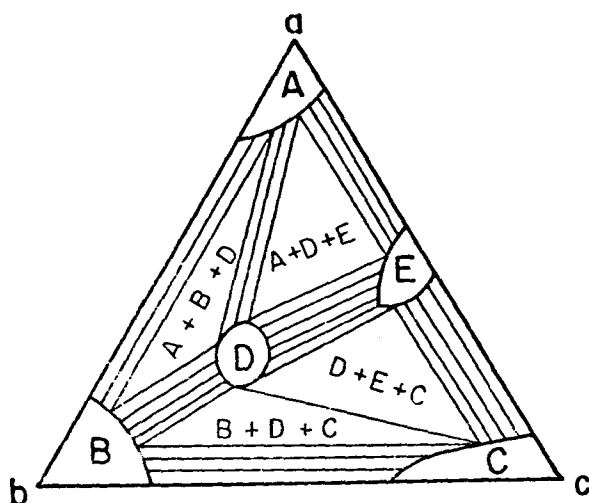
$$C_i = \text{inerte komponente}; \quad C_m = \text{mobiele komponente, en} \\ F = C_i - P + (C_m + 2)$$

Die waarde tussen hakies is die ekstern gekontroleerde veranderlikes, naamlik temperatuur, druk en die chemiese potensiaal van die mobiele komponente. Indien hierdie veranderlikes willekeurig gespesifiseer word beteken dit dat $P_{\Delta}^{\text{Maks.}} = C_i$, en die Δ^{maksimum} aantal fases moet dus gelyk wees aan die aantal inerte komponente. Anders gestel beteken dit dat die aantal intensiewe veranderlikes van so 'n sisteem (dit wil sê 'n mineraalversameling wat algemeen in die natuur voorkom) gelyk moet wees aan $(C_m + 2)$.

1.3.1.1 Verwantskap tussen die fasereël en metamorfe diagramme

Die verwantskap tussen fases en komponente in die fasereël kan grafies in die vorm van ACF, AKF, of AFM-diagramme geïllustreer word. Die volgende diagram (Figuur 64) kan as 'n algemene voorbeeld gebruik word om hierdie verwantskappe te illustreer (Korzhinski, 1959, p. 63; Miyashiro, 1973, p. 123).

'n Metamorfe sisteem wat volledig in terme van drie onafhanklike inerte komponente (a, b en c) gedefinieer word bestaan onder ewewigstoestande uit 'n maksimum van drie fases. Indien al die fases (A, B, C, D en E) lede is van vaste oplossingsreekse sal die samestelling van elke fase 'n beperkte veld in figuur 64 beslaan. Indien die samestelling van die sisteem byvoorbeeld in veld A stip sal hierdie sisteem na aanleiding van die mineralogiese fasereël twee vryheidsgrade besit, naamlik die twee-veranderlike variasie in die samestelling van fase A $[F = C_i - P + (C_m + 2); (C_m + 2)$ is



Figuur 64 Verwantskap tussen die fasereël en metamorfe "fase-diagramme".
A, B, C, D en E verteenwoordig vaste-oplossingsminerale.

konstant en dus is $F = C_i - p$]. Enige mineraalpaar in hierdie sisteem, byvoorbeeld A-B, A-E, B-C, besit egter slegs een vryheidsgraad wat gedefinieer kan word as die onafhanklike variasie in die samestelling van byvoorbeeld fase A. Die samestelling van die ander fase (gestel B) is dan afhanklik van die verandering in die samestelling van A. Fases A en B definieer dus 'n verbindingslyn in die diagram, en die samestelling van die twee fases kan slegs langs die kurwes verander wat die samestellingsvelde van die twee individuele fases omlin. Indien die sisteem uit drie fases (A+B+D) bestaan is die aantal vryheidsgrade gelyk aan nul en die samestelling van elke individuele fase word deur 'n spesifieke punt in die diagram gedefinieer. 'n Spesifieke sub-driehoek omlin dus die samestellingsveld van die betrokke drie-fase-versameling. Die relatiewe posisie van hierdie subdriehoek in figuur 64 sal natuurlik bepaal word deur die eksterne toestande waaronder die sisteem 'n toestand van ewewig bereik het. Die belangrike punt wat hier beklemtoon moet word is dat die teenwoordigheid van meer as een drie-faseveld (sub-driehoek) vir gesteentes met identiese mineraalversamelings 'n aanduiding is dat die betrokke versamelings 'n toestand van chemiese ewewig onder verskillende eksterne toestande bereik het. Hierdie verplasing, of beweging, van drie-

fasevelde is 'n proses wat eindig is en dus aan beide kante beperk sal word deur die verskyning van nuwe mineraalversamelings wat op hulle beurt weer nuwe sub-driehoëke kan definieer wat kan "beweeg" as gevolg van veranderings in die eksterne toestande.

Die verandering in die oriëntasie van verbindingslyne in 'n AFM-diagram kan dus 'n aanduiding wees van 'n chemiese reaksie tussen die betrokke fases. Hierdie reaksie kan deurlopend wees (dit wil sê die deurlopende verplasing van spesifieke 3-fasevelde in 'n AFM-diagram) of kan nie-deurlopend wees (dit wil sê 'n opvallende verandering in die topologie van die AFM-diagram). Deurlopende metamorfe reaksies kan gewoonlik slegs waargeneem word as 'n verandering in die relatiewe verhouding van minerale in 'n gesteente met verandering in die graad van metamorfose. Die produkte en uitgangstowwe van 'n deurlopende reaksie is dus stabiel binne 'n PT-interval, en gevolglik is hierdie reaksies nie geskik om 'n metamorfe fasies te omlin nie (Thompson, 1957, p. 856). In teenstelling hiermee is nie-deurlopende metamorfe reaksies onafhanklik van die hoeveelhede van die betrokke fases en verloop by spesifieke PT en μ i toestande. Nie-deurlopende reaksies gee gewoonlik aanleiding tot maklik waarneembare mineralogiese veranderings in metamorfe gesteentes en is gevolglik by uitstek geskik vir gebruik as reaksie-isograde (Thompson, 1957; Winkler, 1974).

Die verplasing van 3-fasevelde (deurlopende reaksies of gly-ewewig) in AFM-diagramme wat minerale soos almandiet, kordiëriet, hipersteen, biotiet en ortoamfibool betrek kan dus waardevolle inligting verskaf in verband met die ooreenstemmende variasies in die fisiese toestande wat die stabiliteitsverwantskappe tussen hierdie minerale beheer het.

1.3.2 Identifikasie van ewewigsversamelings

Die petrografiese identifikasie van ewewigsversamelings is reeds volledig in Afdeling IV-3 (Tabel 6) beskryf en word nie weer herhaal nie. Die betrokke ewewigsversamelings in die verskillende metamorfe sones kan kortliks in die volgende tabel opgesom word (Tabel 47). Die versamelings langs die Ortopirokseenisograad verteenwoordig 'n spesifieke geval en word later afsonderlik bespreek (Afd. X-3).

Tabel 47 Opsomming van hoof-ewewigsversamelings in die granaatgranoliete en ortoamfiboolgneise. Groep 1 ens. verwys weer eens na die onderverdeling in tabel 8 (Afdeling V).

Metamorfe sone	Ewewigsversamelings
A. Ortopirokseenzone	Gren-Hip-Biot-Qz-Plag (Groep 1).
	Gren-Mord-Hip-(Biot-Qz-Plag) (Groep 2).
	Mord-Hip-Biot-Qz-Plag (Groep 3).
	Hip-Biot-Plag (R 9, Tabel 2).
B. Ortoamfiboolzone	Groep 1 nie verteenwoordig
	Ant-Ged-Biot-Kien-Qz-Plag-(Gren) (Groep 2).
	Ant-Ged-Biot-Kien-Qz-Plag (Groep 3).
	Gren-Ged-Qz-Plag (DR 184, Tabel 4).
	Gren-Mord-Sil-Biot-Qz-Plag (DV 45, Tabel 4).

1.3.3 Die keuse van komponente

Metamorfe gesteentes bestaan gewoonlik uit 'n groot aantal komponente wat die akkurate grafiese voorstelling van mineraalversamelings in hierdie gesteentes baie bemoeilik. Die detail petrografiese ondersoek van chemies verwante gesteentes kan egter 'n goeie aanduiding wees van komponente wat waarskynlik 'n ondergeskikte (of geen) rol in die definisie van fase-verwantskappe gespeel het. Minerale soos kwarts, plagioklaas, magnetiet en ilmeniet is byvoorbeeld addisionele fases in al die verskillende gesteentetipes van die Pelitiese gneis sodat die meeste komponente in

hierdie minerale waarskynlik van minder belang is. FeO en MgO het egter 'n belangrike rol in die ontwikkeling van mineraalversamelings gespeel en moet dus as twee onafhanklike komponente beskou word. Die teenwoordigheid van 'n aluminiumryke mineraal (gedriet) en 'n aluminiumarme mineraal (antofilliet) in dieselfde gesteentes, sowel as die teenwoordigheid van kianiet en aluminiumryke hipersteen, is 'n goeie aanduiding dat Al_2O_3 'n groter rol in die ontwikkeling van mineraalversamelings as byvoorbeeld SiO_2 gespeel het. CaO en Na_2O is hoofsaaklik beperk tot plagioklaas en kan dus ook buite rekening gelaat word.

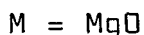
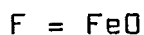
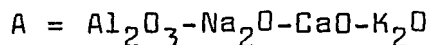
Na aanleiding van die mineralogiese fasereël kan die aantal fases in 'n sisteem by ewewig nie die aantal inerte komponente oorskrei nie. Die Pelitiese gneis bestaan uit 'n maksimum van agt minerale (Gran-Hip-Kord-Biot-Kwarts-Plag-Magn-Ilm, of Antof-Gedr-Biot-Kian-Kwarts-Plag-Magn-Ilm) wat moontlik in ewewig is en gevolglik kan die gesteente onder konstante eksterne toestande 'n maksimum van agt inerte komponente bevat.

Die volgende gerieflike klassifikasie van komponente is deur Korzhinski (1959, p. 71) voorgestel (kyk ook Reinhardt, 1968, p. 465):

- (i) Spoorelemente: Elemente soos P_2O_5 , MnO, Cr_2O_3 ens. bepaal nie die teenwoordigheid of afwesigheid van hoofminerale in die Pelitiese gneis nie en kan dus buite rekening gelaat word.
- (ii) Komponente wat in 'n oormaat teenwoordig is: Hierdie komponente word bevat in minerale wat in al die gesteentes teenwoordig is. 'n Toename of afname in die konsentrasie van sodanige komponente sal dus slegs weerspieël word deur 'n ooreenkomstige toename of afname in die hoeveelheid van die betrokke mineraal. Die teenwoordigheid van kwarts, plagioklaas, ilmeniet en magnetiet in byna al die gesteentes is dus 'n aanduiding dat SiO_2 , NaAlO_2 ,

CaAl_2O_4 , FeTiO_3 en Fe_3O_4 as komponente beskou kan word wat in oormaat teenwoordig is. Hierdie komponente (vyf) is egter een meer as die aantal ooreenstemmende fases (vier). Reinhardt (1968, p. 465) het egter voorgestel dat die komponente wat effektief in oormaat teenwoordig is met een verminder kan word indien NaAlO_2 - CaAl_2O_4 as een isomorfe komponent in plagioklaas beskou word. Die aantal komponente wat in 'n oormaat is, en die aantal fases wat hierdie komponente bevat, is dus beide gelyk aan vier. Die weglating van hierdie komponente beïnvloed dus nie die basiese vereistes wat deur die fasereël gestel word nie, aangesien nie slegs 'n komponent nie maar ook die betrokke fase buite rekening gelaat word.

- (iii) Bepalende inerte komponente: Dit sluit komponente in waarvan die konsentrasies 'n bepalende rol gespeel het in die ontwikkeling van ewewigsversamelings in die Pelitiese gneis, naamlik:



- (iv) Mobiele komponente: H_2O word vir die doeleindes van hierdie ondersoek as 'n mobiele komponent beskou. Hierdie voorstel is in ooreenstemming met algemene gebruik (Thompson, 1955 en 1957; Zen, 1963) en kan geregverdig word aangesien die sisteem eerstens slegs in terme van die soliede fases gedefinieer word, en tweedens aangesien faseverwantskappe in pelitiese sisteme gewoonlik volledig verklaar kan word indien slegs inerte komponente beskou word. Die moontlikheid bestaan dus dat die chemiese potensiaal van H_2O ekstern beheer word. Die status van H_2O as 'n mobiele of inerte komponent in die Pelitiese gneis word

egter later (Afd. VIII-2.3.4.2) meer volledig bespreek.

In die berekening van die aantal inerte komponente (A, F, M) van die sisteem is geen korreksie aangebring vir die teenwoordigheid van Fe_2O_3 in minerale soos ilminiet en magnetiet nie. Die rede hiervoor is dat hierdie twee minerale in uiters klein hoeveelhede teenwoordig is en nie die tydwende korreksiemetode regverdig nie. In die berekening van die A-waarde is aanvaar dat al die Na_2O deur plagioklaas opgeneem word. Hierdie aanname is geldig vir al die gesteentes van die Ortopirokseensone, maar kan moontlik fase-verwantskappe in die Ortoamfiboolsone beïnvloed. Die rede hiervoor is dat gedriet nie 'n stabiele fase in die afwesigheid van Na_2O is nie. Gedriet bevat 'n maksimum van 2,23 massapersent Na_2O (Tabel 25b) en daar word voorlopig aanvaar dat hierdie hoeveelheid nie die gestipte posisie van gedriet in die AFM-diagram grootliks sal beïnvloed nie. Die laaste probleem is gekoppel aan die TiO_2 -inhoud van biotiet. Biotiet bevat tot 4,5 massapersent TiO_2 (Tabel 20a), en hierdie komponent kan dus die stabiliteitsveld van biotiet vergroot. Hierdie moontlikheid word later ondersoek (Afd. VIII-2.3.3).

Die metode wat gebruik word om die samestelling van gesteentes en minerale uit die ruimte van die A-K-F-M tetraeder deur 'n spesifieke samestelling op die AFM-vlak te projekteer word volledig deur Thompson (1957) en Winkler (1974) bespreek. Die volgende punte is egter in hierdie ondersoek belangrik:

- (i) Die meeste gesteentes in hierdie ondersoek bevat geen K-veldspaat nie, en indien K-veldspaat wel teenwoordig is vorm dit nie deel van die hoofewewig in die gesteentes nie. K-veldspaat kan dus teoreties nie as 'n projeksiepunt in die AKFM-tetraeder gebruik word nie. Dit is egter duidelik dat 'n punt in die ruimte van die AKFM-tetraeder deur enige geskikte samestelling langs die A-K

verbindingslyn geprojekteer kan word sonder om die faseverwantskappe tussen die geprojekteerde fases enigsins te beïnvloed. K_2O is dus potensieel net so geskik as projeksiepunt as wat K-veldspaat is. Die samestelling $KAlO_2$ word egter in hierdie ondersoek as projeksiepunt bo K_2O verkies omdat die faseverwantskappe op die AFM-vlak direk met die literatuur vergelyk kan word. Dit is dus heel toevallig dat die projeksiepunt, $KAlO_2$, wat in hierdie ondersoek gebruik word, ook die samestelling van K-veldspaat is. K-veldspaat is dus nie 'n moontlike addisionele fase in die geprojekteerde AFM-versamelings nie.

- (ii) Die gestipte posisie van granaat op die AFM-vlak is bereken deur die hoeveelheid $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$ en $Mn_3Al_2(SiO_4)_3$ as mol persent van die samestelling $(Mg,Fe)_3Al_2(SiO_4)_3$ af te trek (Thompson, 1957).

Die volgende projeksie-koördinate word dus deur-gans vir beide die gesteentes en minerale gebruik:

$$A = \frac{Al_2O_3 - Na_2O - CaO - K_2O}{Al_2O_3 - Na_2O - CaO - K_2O + MgO + FeO}$$

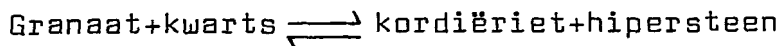
$$F = \frac{MgO}{MgO + FeO}$$

2. GRAFIESE ONDERSOEK VAN FASEVERWANTSKAPPE IN DIE GRANAAT-GRANOLIET VAN DIE ORTOPIROKSEENSONE

2.1 ALGEMEEN

Die Pelitiese gneis in die Ortopirokseensone word deur drie

hoof-mineraalversamelings verteenwoordig, naamlik: granaat-hipersteen-biotiet (die kordiërietvrye granaatgranoliete), kordiëriet-granaat-hipersteen-biotiet (die kordiëriet-granaatgranoliete), en kordiëriet-hipersteen-biotiet (die granaatvrye kordiërietgranoliete). Die algemene chemiese verwantskap tussen hierdie versamelings word deur die volgende deurlopende reaksie geïllustreer:



Hierdie reaksie is gekoppel aan veranderende fisiese toestande tydens die tweede periode van metamorfose (M_2) en gee aanleiding tot die stabiele assosiasie van kordiëriet, granaat en hipersteen binne die M_2 -Ortopirokseensone. Die kordiërietvrye granaatgranoliet kan dus vir 'n eerste benadering as verteenwoordigend van die hoof-ewewig gedurende die eerste periode van metamorfose (M_1) beskou word, terwyl die granaatvrye kordiërietgranoliet weer die volledige verloop van die reaksie tydens M_2 illustreer. Die moontlike invloed van totale chemie op die stabiliteit van kordiëriet en granaat word dus voorlopig buite rekening gelaat.

Die faseverwantskappe in die drie hoof-gesteentetipes word eers afsonderlik ondersoek voordat hierdie afdeling afgesluit word met 'n bespreking van moontlike reaksieverwantskappe aan die hand van die AFM-topologie.

Dit is belangrik om daarop te let dat die gestipte posisies van kordiëriet, granaat, hipersteen en biotiet in figure 65-67 uitsluitlik beperk is tot die volgende analitiese gegewens:

kordiëriet : slegs kern-analises (Tabel 11a).

granaat : randanalises in die gevalle waar die mineraal gesoneerd is (Tabel 13a en b).

hipersteen : slegs analises van groot kristalle (Tabel 18).

Dieselfde analitiese gegewens as vir die verdelingsdiagramme in figure 49, 50 en 52 word dus hier ook gebruik.

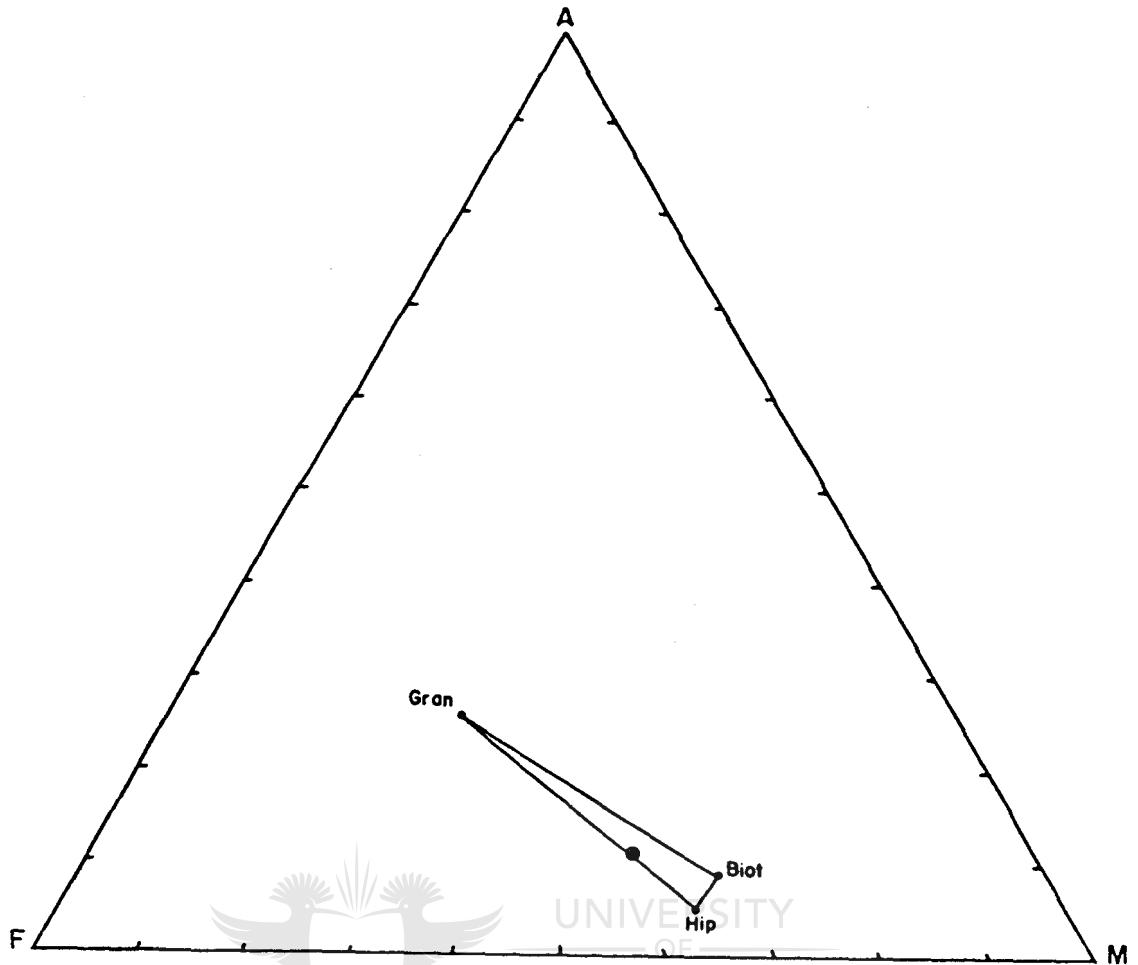
Biotiet : Hierdie mineraal besit nie 'n konstante samestelling in dieselfde monster nie en gevolglik word presies dieselfde analises as vir die verdelingsdiagram in figuur 55b (Afd. VII-2.1.2.3) gebruik. Analises vir biotiet in kontak met granaat, of insluitels in granaat, word dus weggelaat en gemiddelde waardes word vir die res van die analises per monster gebruik (Tabelle 20a en b).

2.2 ALGEMENE FASEVERWANTSKAPPE

2.2.1 Die kordiërietvrye granaatgranoliete

Mikrosonde analises vir bogenoemde minerale is beperk tot slegs een monster (DR 42-2), en gevolglik is dit nie moontlik om die faseverwantskappe tussen granaat, hipersteen en biotiet in die kordiërietvrye gesteentes in enige detail te ondersoek nie. Hierdie versameling kan egter gebruik word om vas te stel of die keuse van komponente vir die konstruksie vandie AFM-projeksie realisties is of nie.

Die gestipte posisies van granaat, hipersteen en biotiet in die AFM-diagram word in figuur 65 geïllustreer. Die totale samestelling van die gesteente is in dieselfde diagram gestip. Die samestelling van die gesteente stip binne die beperkte granaat-hipersteen-biotiet 3-faseveld en gevolglik kan daar met 'n redelike mate van vertroue aanvaar word dat die keuse van komponente vir die konstruksie van die AFM-projeksie voldoende is om die sisteem onder bespreking volledig te definieer.



Figuur 65 AFM-diagram (projeksie deur K/vs) wat die verwantskap tussen die chemiese en mineralogiese samestelling van die kordiërietvrye granaatgranoliet (DR 42-2) illustreer.

2.2.2 Die kordiëriet-granaatgranoliete

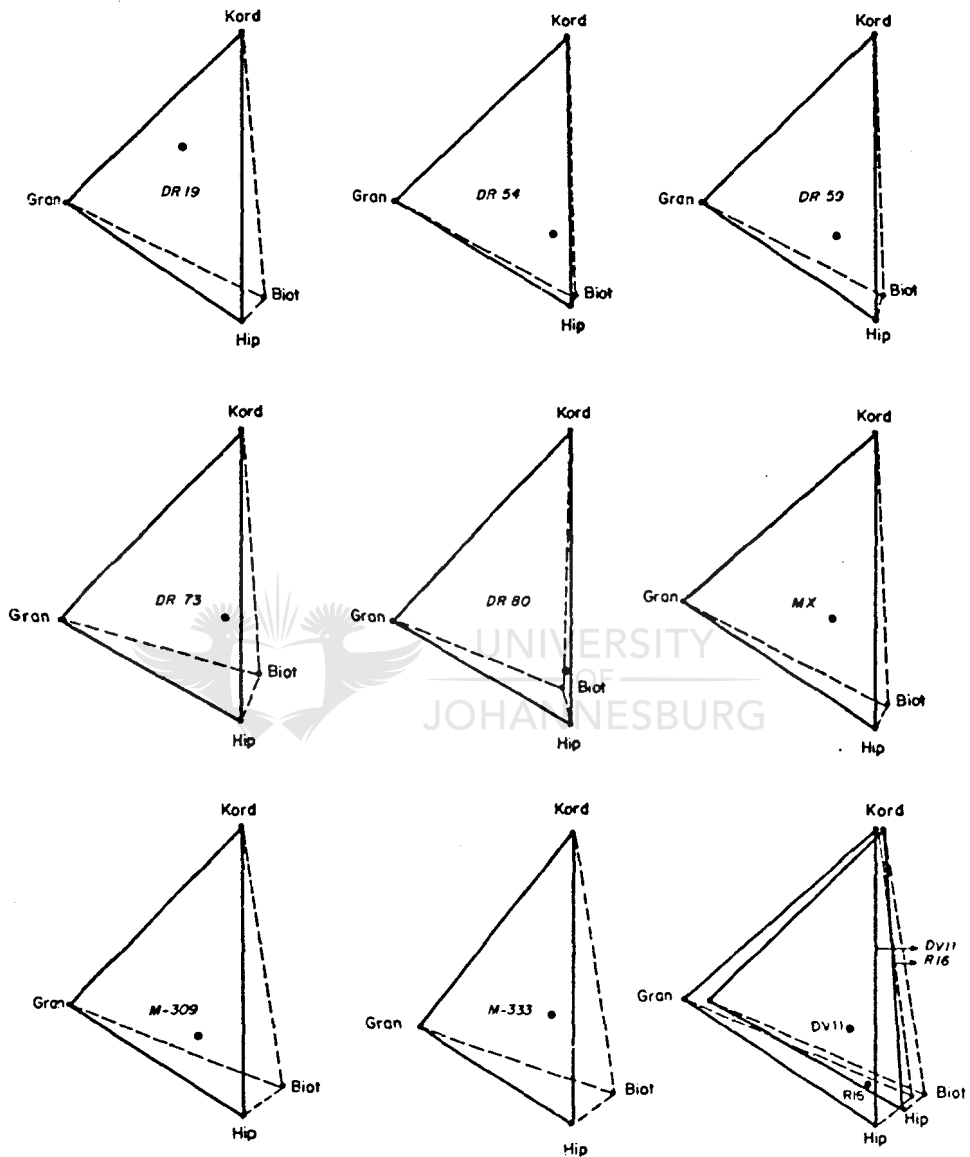
Die samestelling van die gesteentes en die vier ferromagnesiese minerale vir tien verteenwoordigende monsters van die kordiëriet-granaatgranoliete word in AFM-diagramme van figure 66a-f geïllustreer. Die geanaliseerde versamelings word in ses verskillende AFM-diagramme voorgestel om verwarring as gevolg van 'n groot aantal gestipte posisies en kruisende verbindingslyne so ver as moontlik uit te skakel. Hierdie versamelings illustreer almal die deurlopende reaksie-verwantskap tussen granaat, kordiëriet en hipersteen (Fig. 11). Die vier minerale in hierdie diagramme definieer

dus vier 3-fasevelde (Fig. 66a) waarvan twee van hierdie vier velde (naamlik kordiëriet-granaat-hipersteen en kordiëriet-granaat-biotiet in die geval van agt van die monsters, en kordiëriet-granaat-hipersteen en granaat-hipersteen-biotiet of kordiëriet-hipersteen-biotiet onderskeidelik in die geval van R 16 en DR 80) die werklike samestelling van die gesteentes insluit. Dit word in figuur 66a geïllustreer. Die twee oorblywende 3-fasevelde sluit wel nie die samestelling van die gesteentes in nie maar kan as geldige faseverwantskappe in die onmiddellike omgewing van die reaksie beskou word. Die betrokke versamelings word vir voorstellingsdoeleindes as volg onderverdeel. Let daarop dat biotiet dus voorlopig as deel van die ewewigsversameling in hierdie gesteentes beskou word:

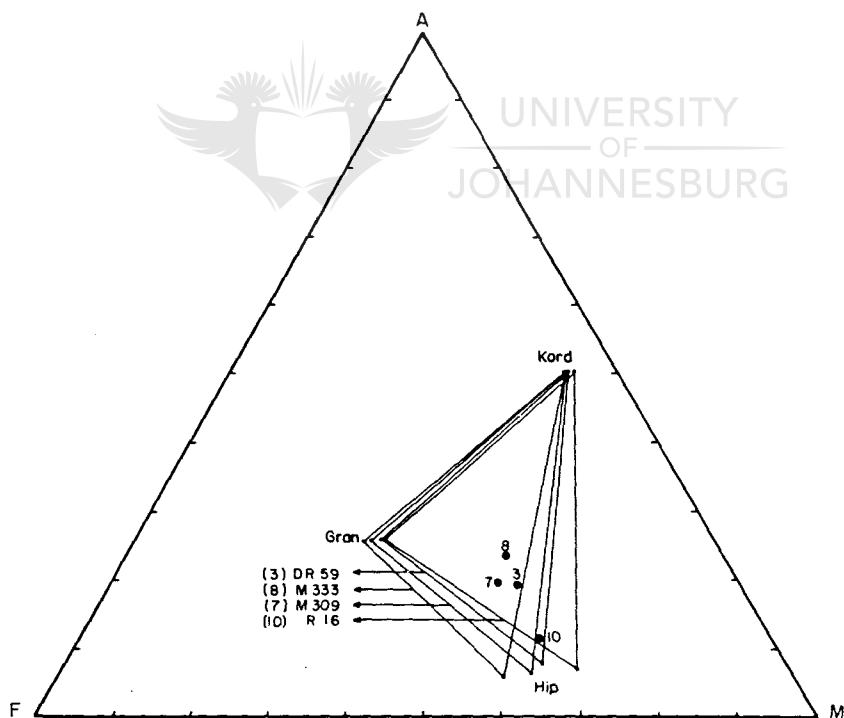
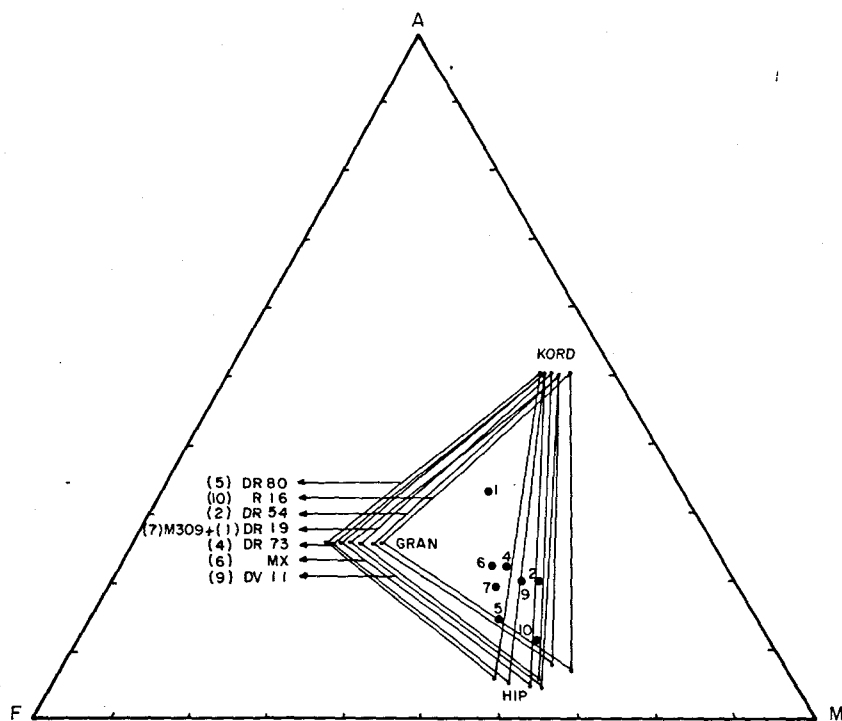
- (i) granaat-kordiëriet-hipersteen (Fig. 66b en c)
- (ii) granaat-kordiëriet-biotiet (Fig. 66d)
- (iii) granaat-hipersteen-biotiet (Fig. 66e)
- (iv) kordiëriet-hipersteen-biotiet (Fig. 66f)

2.2.2.1 Granaat-kordiëriet-hipersteen

Die faseverwantskappe tussen granaat, kordiëriet en hipersteen word in figure 66b en c geïllustreer. Twee figure word hier vir voorstelling gebruik omdat twee van die tien monsters (DR 59 en M 333) kruisende verbindingslyne vir granaat-hipersteen en kordiëriet-hipersteen illustreer indien 'n gemeenskaplike diagram gebruik word. Verbindingslyne vir granaat-kordiëriet is egter baie reëlmatig en inslegs in die geval van DV 11 en DR 19 kruis die verbindingslyne tussen granaat en kordiëriet teen 'n lae hoek. Die AFM-diagramme van figure 66b en c illustreer dus essensieël mineraalversamelings wat nie deur kruisende verbindingslyne gekenmerk word nie.



Figuur 66a Skematiese voorstelling van faseverwantskappe in individuele monsters van die kordieriet-granaatgranoliete. Elke diagram is korrek georiënteer ten opsigte van die *A*- en *M*-koördinate van die AFM-diagram en illustreer die verwantskap tussen die chemiese samestelling van die gesteentes (●) en die ooreenstemmende 3-fasevelde.



Figuur 66b en c AFM-diagram (projeksie deur K/vs) wat die faseverwantskappe tussen granaat, kordieriet en hipersteen in onderskeidelik agt (Fig. b) en vier (Fig. c) monsters van die kordieriet-granaatgranoliete illustreer. ● = samestelling van die gesteentes. Die sistematiese verplasing van 3-fasevelde in die rigting van F is in die volgende volgorde:
 Fig. (b): R 16 → DR 54 → DR 19 → DV 11 → MX → DR 73
 → DR 80
 Fig. (c): R 16 → DR 59 → M 309 → M 333.

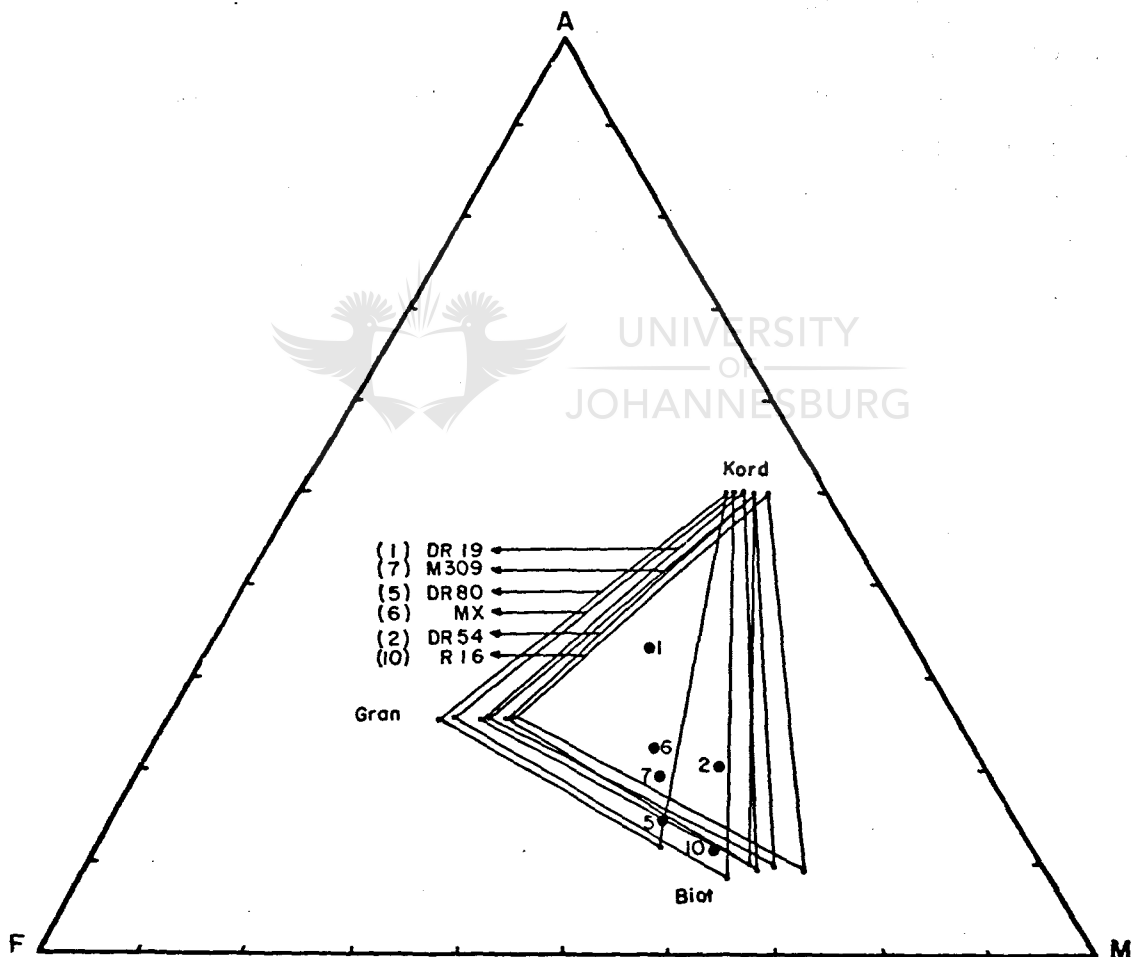
Die rede vir bogenoemde kruisende verbindingslyne kan nie toegeskryf word aan die keuse van komponente vir die AFM-projeksie nie omdat die faseverwantskappe in agt van die tien monsters baie reëlmatig is (Fig. 66b). Twee redes kan egter moontlik 'n verklaring bied: Die eerste moontlikheid is foutiewe mikrosonde-analises vir kordiëriet of hipersteen in die geval van monsters DR 59 en M 333. Die tweede moontlikheid is dat bogenoemde twee monsters nie volkome in ewewig is met die res van die gesteentes nie. Geen keuse kan egter tussen hierdie twee moontlikhede gemaak word nie. Monsters DR 59 en M 333 kan ook nie petrografies van die ander monsters onderskei word nie. Indien die regionale verspreiding van die tien monsters in die Ortopi-rokseensone egter in aanmerking geneem word (Fig. 22) is dit duidelik dat die waargenome kruisende verbindingslyne baie maklik aan geringe afwykings vanaf chemiese ewewig toegeskryf kan word.

Die algemene reëlmatige faseverwantskappe tussen kordiëriet, granaat en hipersteen in figure 66b en c ondersteun dus die voorstel dat hierdie versamelings verteenwoordigend is van die hoof-ewewig in die granaatgranoliete tydens die tweede periode (M_2) van granolietgraad van metamorfose (Afd. VII-3).

Die belangrikste afleiding wat egter met verwysing na die AFM-diagramme in figure 66b en c gemaak kan word is die reëlmatige verplasing van individuele 3-fasevelde. Hierdie reëlmatige beweging van die kordiëriet-granaat-hipersteen sub-driehoek is 'n goeie aanduiding dat elke individuele versameling 'n toestand van chemiese ewewig onder verskillende eksterne toestande van metamorfose bereik het (kyk Fig. 64). Die verplasing van sub-driehoek vind plaas as gevolg van die simpatieke verandering in die MgO/FeO verhouding van die betrokke ferromagnesiese minerale. Die rede vir hierdie verplasing en die rigting waarin die verplasing plaasvind, word later volledig bespreek (Afd. VIII-2.3.4).

2.2.2.2 Granaat-kordiëriet-biotiet

Faseverwantskappe tussen granaat, kordiëriet en biotiet vir ses van die tien monsters word in figuur 66d geïllustreer. Die oorblywende vier monsters vertoon kruisende verbindingslyne vir granaat-biotiet en kordiëriet-biotiet en word dus vir voorstellingsdoeleindes weggelaat.



Figuur 66d AFM-diagram (projeksie deur K/vs) wat die faseverwantskappe tussen granaat, kordiëriet en biotiet in ses monsters van die kordiëriet-granaatgranoliete illustreer. ● = samestelling van die gesteentes. Die sistematiese verplasing van 3-fasevelde in die rigting van F is in die volgende volgorde: R 16 → DR 54 → M 309 → DR 19 → MX → DR 80.

Die rede vir kruisende verbindingslyne in versamelings wat biotiet betrek kan waarskynlik toegeskryf word aan die feit dat biotiet nie volkome in ewewig is met kordiëriet, granaat en hipersteen nie. Hierdie voorstel word ondersteun deur die waargenome verstrooiing van verdelingspunte in verdelingsdiagramme waarin biotiet as een fase betrek is (Fig. 53, 54, en 55).

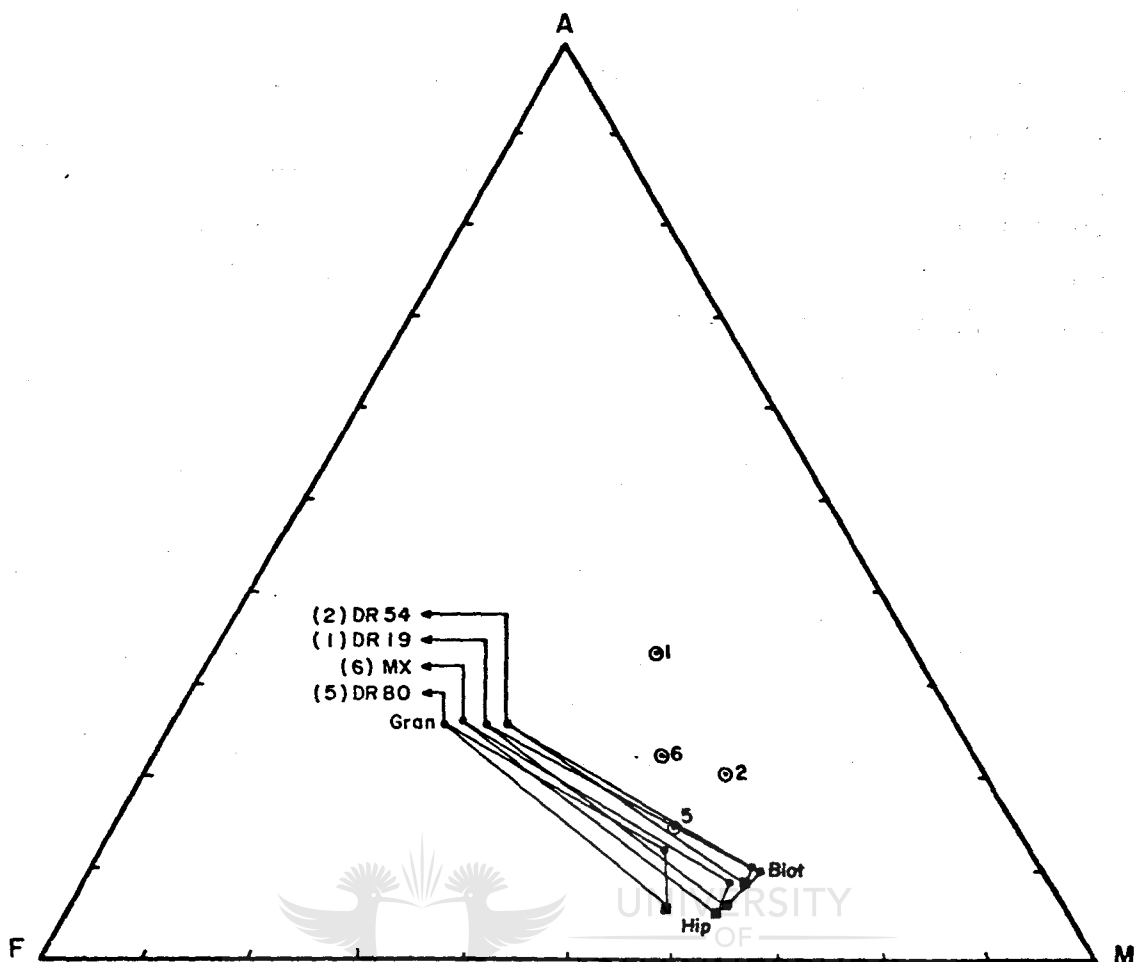
Die sistematiese verplasing van die granaat-kordiëriet-biotiet 3-fasevelde in figuur 66d is egter presies in ooreenstemming met die rigting van beweging van die ooreenstemmende granaat-kordiëriet-hipersteen 3-fasevelde in figuur 66b en c. Die gevolgtrekking kan dus gemaak word dat hierdie verplasing deur variasies in dieselfde eksterne toestande van metamorfose beheer is.

2.2.2.3 Granaat-hipersteen-biotiet



Geanaliseerde posisies vir gesteentesamestellings en minerale word in die AFM-diagram van figuur 66e geïllustreer. Slegs vier van die tien beskikbare monsters word in hierdie diagram voorgestel omdat die faseverwantskappe andersins gekompliseer word as gevolg van kruisende verbindingslyne. Die rede vir hierdie kruisende verbindingslyne is ook gekoppel aan die samestelling van biotiet. Let daarop dat geeneen van die gesteentesamestellings in die ooreenstemmende 3-faseveld stip nie.

Die rigting van verplasing van 3-fasevelde in hierdie diagram is ook identies aan die twee vorige gevalle en is dus aan dieselfde eksterne faktore gekoppel.

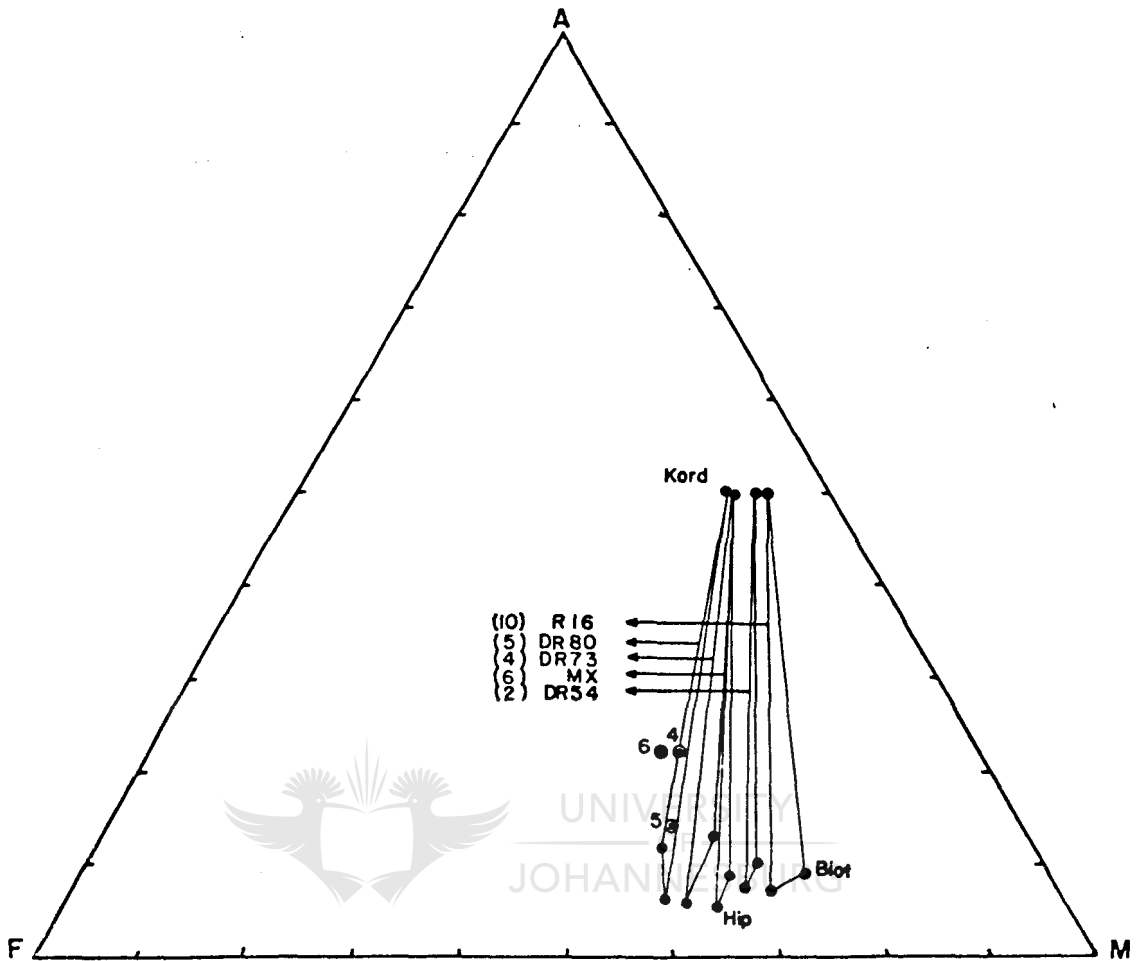


Figuur 66e AFM-diagram (projeksie deur K/vs) wat die faseverwantskappe tussen granaet, hipersteen en biotiet in vier monsters van die kordiëriet-granaatgranoliete illustreer. \odot^1 = samestelling van die gesteentes. Die verplasing van 3-fasevelde in die rigting van F is in die volgende volgorde: DR 54 → DR 19 → MX → DR 80.

2.2.2.4 Kordiëriet-hipersteen-biotiet

Figuur 66f illustreer die waargenome faseverwantskappe tussen kordiëriet, hipersteen en biotiet vir vyf van die tien monsters. Die res van die monsters word weer eens weggelaat om die probleem van kruisende verbindingslyne as gevolg van die samestelling van biotiet uit te skakel. Slegs een van die monsters (DR 80) stip in die ooreenstemmende 3-faseveld. Hierdie versameling is egter anomaal aangesien dit die enigste monster verteenwoordig waarin biotiet deur 'n laer M/F verhouding as hipersteen gekenmerk word. Die verbindingslyn tussen hipersteen en kordiëriet

val dus in hierdie geval aan die Mg-ryke kant van biotiet.



Figuur 66f AFM-diagram (projeksie deur K/vs) wat die faseverwantskappe tussen kordieriet, hipersteen en biotiet in vyf monsters van die kordieriet-granaatgranoliete illustreer. O^6 = samestelling van die gesteentes. Die verplasing van 3-fasevelde in die rigting van F is in die volgende volgorde: R 16 \rightarrow DR 54 \rightarrow MX \rightarrow DR 73 \rightarrow DR 80.

Dit is weer eens opvallend dat die rigting van verplasing van 3-fasevelde in hierdie diagram presies in ooreenstemming is met al die vorige gevalle.

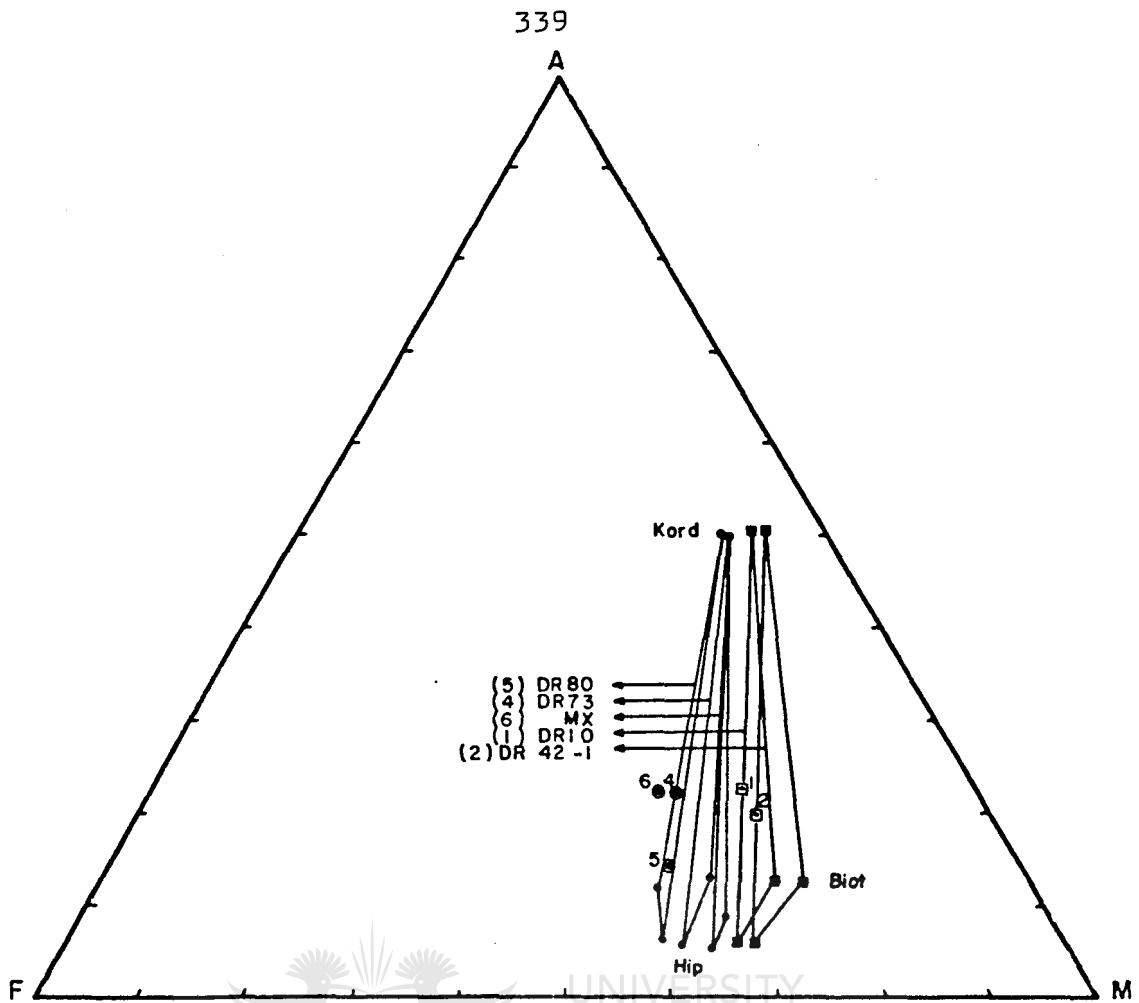
2.2.3 Die granaatvrye kordierietgranoliete

Mikrosonde analyses van ferromagnesiese minerale is slegs vir twee van hierdie versamelings beskikbaar (DR 10 en DR 42-1). Die faseverwantskappe tussen kordieriet, hiper-

steen en biotiet in hierdie granaatvrye granoliete illustreer egter die belangrike invloed van die totale chemiese samestelling op die karakter van die deurlopende reaksieverwantskap tussen granaat, kordiëriet en hipersteen, en word gevolglik so volledig as moontlik bespreek.

Die gestipte posisies van die minerale en gesteentesamestellings word in die AFM-diagramme van figuur 67 geïllustreer. Die gesteentesamestellings stip in beide gevalle (DR 10 en DR 42-1) langs die verbindingslyn tussen kordiëriet en hipersteen, en hierdie versamelings kan dus ook gebruik word as interne toetsing vir die korrekte keuse van komponente in die konstruksie van die AFM-diagram. Indien die beperkte 3-fasevelde in hierdie diagram in aanmerking geneem word is dit duidelik dat geen betroubare waarde geheg kan word aan die waarneming dat die gesteentes langs 'n verbindingslyn en nie binne die drie-faseveld stip nie. Beide gesteentes bevat heelwat biotiet (Tabel 2), en dit is op petrografiese gronde duidelik dat biotiet as deel van die ewewigsversameling beskou moet word. Vir vergelykenderdoeleindes is die ooreenstemmende drie-fasevelde uit figuur 66f ook op hierdie diagram oorgedra.

Verskeie afleidings kan met verwysing na die AFM-diagram van figuur 67 gemaak word. Dit is eerstens opvallend dat beide die gesteentes en die individuele minerale in die granaatvrye kordiërietgranoliete (DR 10 en DR 42-1) deur 'n hoër M/F verhouding as in die geval van die kordiëriet-granaatgranoliete gekenmerk word. Dit is verder ook opvallend dat die kordiëriet-hipersteen-biotiet 3-fasevelde vergroot sodra granaat as 'n fase verdwyn. Die samestellingsveld vir die stabiele assosiasie van kordiëriet, hipersteen en biotiet is dus opvallend groter as in die geval waar granaat steeds deel van die versameling is. Laastens is dit duidelik dat die granaatvrye kordiërietgranoliete (DR 10 en DR 42-1) ook chemiese ewewig onder verskillende eksterne toestande bereik het soos geïllustreer word deur die verplasing van die kordiëriet-hipersteen-biotiet 3-faseveld.



Figuur 67 AFM-diagram (projeksie deur K/vs) wat die faseverwantskappe tussen kordiëriet, hipersteen en biotiet in die granaatvrye kordiëriet-granoliëte (DR 10 en DR 42-1) illustreer. Die ooreenstemmende 3-fasevelde vir die kordiëriet-granaatgranoliëte uit Fig. 66f is ook op hierdie diagram oorgedra. \odot^6 = samestelling van gesteentes (Fig. 66f), en \odot^1 = samestelling van die granaatvrye kordiëriet-granoliëte.

2.3 BESPREKING VAN FASEVERWANTSKAPPE IN DIE ORTOPIROKSEEN- SONE

2.3.1 Algemeen

Die volgende algemene afleidings kan met verwysing na die AFM-diagramme in figure 65, 66 en 67 gemaak word:

Dit is eerstens duidelik dat die kordiërietvrye- en granaat-

vrye granoliete (Fig. 65 en 67) elk deur 'n beperkte 3-faseveld verteenwoordig word terwyl die kordiëriet-granaatgranoliete 'n baie groter samestellingsveld besit. Laasgenoemde versameling behoort dus baie meer algemeen as die eersgenoemde twee te wees. Dit is presies in ooreenstemming met die petrografiese ondersoek van tagtig verteenwoordigende monsters in die Ortopirokseensone. Twee en sestig van hierdie monsters is verteenwoordigend van die kordiëriet-granaatgranoliete, terwyl die kordiërietvrye en granaatvrye versamelings elk onderskeidelik deur agt en tien monsters verteenwoordig word. Dit is in die tweede plek ook duidelik dat die verbindingslyn tussen kordiëriet en hipersteen in figuur 66a deur die 3-faseveld granaat-hipersteen-biotiet gaan met die gevolg dat alle gesteentesamestellings in die samestellingsveld granaat-kordiëriet-hipersteen-biotiet die deurlopende reaksie-verwantskap tussen granaat, kordiëriet en hipersteen behoort te illustreer.

Die kordiërietvrye en granaatvrye granoliete behoort dus onderskeidelik verteenwoordigend te wees van die hoofewewig voor die aanvang van die tweede (M_2) periode van metamorfose, en die hoofewewig na die volledige verdwyning van granaat as gevolg van die deurlopende reaksie tydens M_2 .

Die waargenome deurlopende reaksie (granaat+kwarts \rightleftharpoons kordiëriet+hipersteen) word egter, met verwysing na die voorafgaande bespreking, nie slegs deur veranderende fisiese toestande tydens M_2 beheer nie maar ook deur die totale chemiese samestelling van die betrokke gesteentes (kyk ook Fig. 63). Die afwesigheid van kordiëriet in die kordiërietvrye granaatgranoliete (DR 42-2) is dus 'n funksie van die totale chemiese samestelling van die gesteentes en is nie gekoppel aan die fisiese toestande van metamorfose nie. Die totale verdwyning van granaat in die granaatvrye kordiërietgranoliete (DR 10 en DR 42-1) as gevolg van die deurlopende reaksie word egter deur beide die fisiese toestande van metamorfose en die chemiese samestelling van hierdie gesteentes beheer. Die moontlike invloed van totale chemie op die

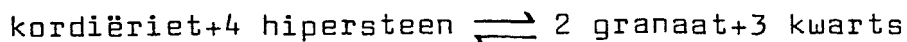
stabiliteitsverwantskappe van kordiëriet, granaat en hipersteen is reeds kortliks na verwys (Afd. VIII-1.2) en word volledig in die volgende onderafdeling bespreek.

2.3.2 Invloed van totale chemie op die stabiliteitsverwantskappe van kordiëriet, granaat en hipersteen in die kordiëriet-granaatgranoliet

Die doel van hierdie afdeling is om vas te stel tot watter mate die mineralogiese karakter van die gesteentes en die samestelling van individuele minerale afhanklik is van die totale chemiese samestelling van die granaatgranoliete. Die inligting wat uit hierdie ondersoek verkry word kan dan as basis gebruik word vir die moontlike verklaring van die beweging van 3-fasevelde in die AFM-diagramme van figure 66-67, asook vir die volledige interpretasie van die metamorfe geskiedenis van die gebied onder bespreking.

Die eksperimentele ondersoek van faseverwantskappe in sintetiese materiaal met 'n pelitiese samestelling het in hierdie verband die meeste bygedra tot die kennis van die relatiewe stabiliteit van kordiëriet en granaat as 'n funksie van temperatuur, druk en totale chemiese samestelling (Currie, 1971; Hensen en Green, 1971 en 1972; Holdaway, 1976). Die mineralogie en chemiese samestelling van die granaatgranoliet stem grootliks ooreen met die eksperimentele gegewens van Hensen en Green en gevolglik is die res van die bespreking tot 'n groot mate op die inligting uit laasgenoemde ondersoek gebaseer (Fig. 18c).

Die volgende deurlopende reaksie is veral van toepassing in die huidige ondersoek en is ook volledig deur Hensen en Green (1971, 1972) ondersoek:



Die deurlopende karakter (gly-ewewig) van hierdie reaksie is verantwoordelik vir die stabiele assosiasie van die uitgangstowwe en produkte binne 'n beperkte PT-interval. Die $MgO/MgO+FeO$ (mol %) verhouding van die geassosieerde ferro-magnesiese minerale binne hierdie PT-interval is uit-sluitlik 'n funksie van temperatuur en druk indien die verdeling van MgO en FeO tussen die betrokke fases ideaal is en nie deur die samestelling van die gesteente beïnvloed word nie (Hensen en Green, 1971, p. 436; Thompson, 1976, p. 404). Die posisie en wydte van hierdie beperkte PT-interval is egter 'n funksie van die $MgO/MgO+FeO$ (mol %)-en die $Al_2O_3/MgO+FeO$ (mol %)-verhouding van die totale gesteente. Die moontlike invloed van bogenoemde twee veranderlikes op die stabiliteitsverwantskappe van kordiëriet, granaat en hipersteen word vervolgens eers kortliks uit 'n algemene oogpunt bespreek.

2.3.2.1 Die $Al_2O_3/MgO+FeO$ (mol %)-verhouding van die totale gesteente

Twee-veranderlike reaksies wat drie vaste oplossingsminerale betrek (kordiëriet, almandiet, hipersteen) verskil van soortgelyke reaksies waarby slegs twee vaste oplossingsminerale betrek word (bv. die reaksie kordiëriet \rightleftharpoons granaat sillimaniet+kwarts) daarin dat die aanvang van eersgenoemde reaksie nie slegs 'n funksie van temperatuur, druk en die $MgO/MgO+FeO$ -verhouding van die gesteentes is nie, maar ook deur die $Al_2O_3/MgO+FeO$ -verhouding van die gesteentes beheer word (Hensen, 1971, p. 201).

In die geval van die deurlopende reaksie onder bespreking sal die samestelling van samebestaande kordiëriet en hipersteen by dieselfde temperatuur vir gesteentes met soortgelyke $MgO/MgO+FeO$ -verhoudings dus verskil indien die $Al_2O_3/MgO+FeO$ -verhouding van hierdie gesteentes verskillend is. Dit word in figure 4 en 5 van Hensen (1971) geïllustreer.

Die samestelling van die eerste granaat (in terme van die $MgO/MgO+FeO$ verhouding) wat in ewewig is met kordiëriet en hipersteen by konstante temperatuur, en in gesteentes met soortgelyke $MgO/MgO+FeO$ verhoudings, is dus ook 'n funksie van die $Al_2O_3/MgO+FeO$ verhouding van die betrokke gesteentes. Aangesien die samestelling van die drie samebestaande minerale by konstante temperatuur uitsluitlik 'n funksie van druk is, volg dit dat die druk waarby granaat die eerste keer in die versameling verskyn ook deur die $Al_2O_3/MgO+FeO$ verhouding van die gesteentes beheer sal word (Hensen, 1970, Fig. 4). Dit is uit hierdie figuur duidelik dat die druk waarby granaat as gevolg van die reaksie vir die eerste keer verskyn sal toeneem met 'n afname in die $Al_2O_3/MgO+FeO$ verhouding van die gesteente. Dit volg verder dat die $MgO/MgO+FeO$ verhouding van almandiet dus ook sal toeneem met 'n afname in die $Al_2O_3/MgO+FeO$ verhouding van die gesteente omdat die MgO -inhoud van granaat toeneem met 'n toename in druk (Hensen en Green, 1970, p. 435).

Die eksperimentele gegewens van Hensen en Green (1970, 1971, 1972) is verder ook 'n aanduiding dat 'n duidelike onderskeid getref moet word tussen pelitiese gesteentes met 'n $MgO+FeO/Al_2O_3$ verhouding wat onderskeidelik kleiner en groter is as een. Die versameling kordiëriet+almandiet+sillimaniet+kwarts sal by intermediêre druk ontwikkel indien $M+F/A < 1$, terwyl die versameling kordiëriet+granaat+hipersteen+kwarts sal ontwikkel indien $M+F/A > 1$. Laasgenoemde versameling ontwikkel ook by 'n druk van ongeveer 3 Kb laer as die druk waarby eersgenoemde versameling stabiliseer.

Silika versadigde kordiëriet- en granaatryke gesteentes kan vervolgens op grond van die $F+M/A$ verhouding van die gesteentes in drie verskillende groepe onderverdeel word wat elk deur verskillende mineraalversamelings by verskillende temperatuur en druktoestande gekenmerk word. Die volgende opeenvolging by 'n konstante totale $MgO/MgO+FeO$ verhouding van die gesteentes en 'n temperatuur van ongeveer $800^{\circ}C$ word met 'n verhoging in druk verkry (Hensen en Green, 1970,

p. 437 en 1972, p. 332 en 337):

	Groep A (F+M/A) > 1)	Groep B (F+M/A) > 1)	Groep C (F+M/A) < 1)
lae P	Hip-Kord-Qz	Kord-Hip-Qz	Kord-Sil-Qz
medium P	Hip-Kord-Gran-Qz	Kord-Gran-Hip-Qz	Kord-Gran-Sil-Qz
hoë P	Gran-Hip-Qz	Kord-Gran-Qz Gran-Sil-Qz	Gran-Sil-Qz

Waardes vir $MgO/MgO+FeO$ en $MgO+FeO/Al_2O_3$ (en $Al_2O_3/MgO+FeO$) vir die sintetiese materiaal (Hensen en Green, 1971, p. 311) en die granaatgranoliet in hierdie ondersoek word in tabel 48 opgesom.

Tabel 48 $MgO/MgO+FeO$ en $MgO+FeO/Al_2O_3$ verhoudings van sintetiese materiaal (A-70, B-70, Hensen en Green 1971, p. 311) en van die granaatgranoliet. Die onderverdeling van die granaatgranoliet in die drie groepe is in tabel 8 gegee.

Monster		100.MgO/MgO+FeO	$MgO+FeO/Al_2O_3^x$	$Al_2O_3/MgO+FeO^x$	
DR 80	Groep 2	61,6	6,04	0,17	
M 309		61,6	4,43	0,23	
MX		62,8	3,55	0,28	
DR 73		64,0	3,64	0,28	
M 333		64,4	3,27	0,31	
DR 59		65,0	4,42	0,23	
DV 11		65,4	4,07	0,25	
R 16		66,4	7,84	0,13	
DR 54		68,8	4,24	0,24	
DR 19		63,1	2,0	0,50	
DR 10		Groep 3	72,2	3,54	0,28
DR 42-1			72,5	4,18	0,24
DR 42-2		Groep 1	58,3	8,48	0,12
R 9 (Granaat+hiper-steen)			76,0	21,0	0,05
A-70		70	4,65	0,22	
B-70		70	1,83	0,55	

^xDie berekening van A/F+M (of M+F/A) is op die volgende molekulêre parameters gebaseer : A = $Al_2O_3-Na_2O-CaO-K_2O$, F = FeO, M = MgO

Dit is uit hierdie tabel duidelik dat die grootste volume van die granaatgranoliete tot groep A behoort ($A/F+M = 0 - \frac{1}{3}$) terwyl slegs een monster (DR 19) die samestelling van groep B ($A/F+M = \frac{1}{3} - 1$) het (kyk ook Fig. 18c).

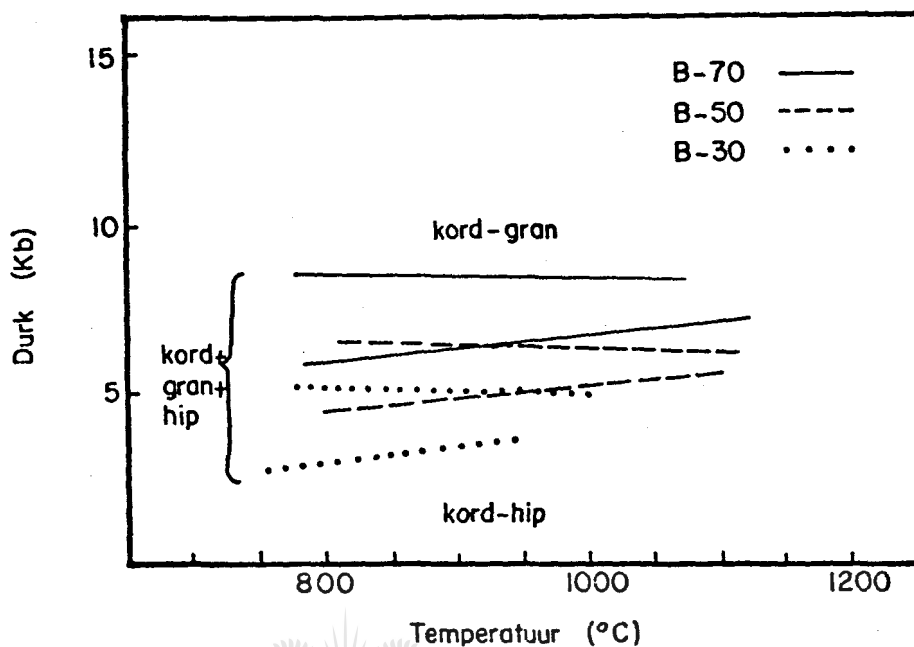
2.3.2.2 Die MgO/MgO+FeO (mol %)-verhouding van die totale gesteentes

Hierdie verhouding speel 'n bepalende rol in die karakter van die mineraalversamelings wat in pelitiese gesteentes ontwikkel. Met 'n afname in hierdie verhouding vind die deurlopende reaksie, kordiëriet+hipersteen \rightleftharpoons granaat+kwarts by 'n laer druk plaas. 'n Laer MgO/MgO+FeO-verhouding vergroot dus die stabiliteitsveld van granaat en beperk die stabiliteitsvelde van kordiëriet en hipersteen (Hensen en Green, 1970 en 1971). Die samestelling van almandiet (en dus ook kordiëriet en hipersteen) word verder meer MgO-ryk met toename in druk by konstante temperatuur en meer FeO-ryk met 'n toename in temperatuur by konstante druk (Hensen en Green, 1972, p. 335 en 336 en Holdaway, 1976, p. 304). Die invloed van die MgO/MgO+FeO-verhouding van die gesteentes op die posisie en wydte van die beperkte PT-interval waarin kordiëriet, granaat en hipersteen stabiel is word in figuur 68 geïllustreer (Hensen en Green, 1972, Fig. 1, 4 en 6).

2.3.2.3 Bespreking

Die moontlike invloed van die chemiese samestelling van die kordiëriet-granaatgranoliete op die stabiliteitsverwantskappe van kordiëriet, granaat en hipersteen in die Ortopi-rokseensone kan na aanleiding van bogenoemde bespreking kortliks ondersoek word. Hierdie bespreking is met verwysing na die AFM-diagram van figuur 66b. Die toepaslike inligting uit hierdie diagram word hier in twee afsonderlike

diagramme (Fig. 69a en b) bespreek om moontlike verwarring te voorkom.



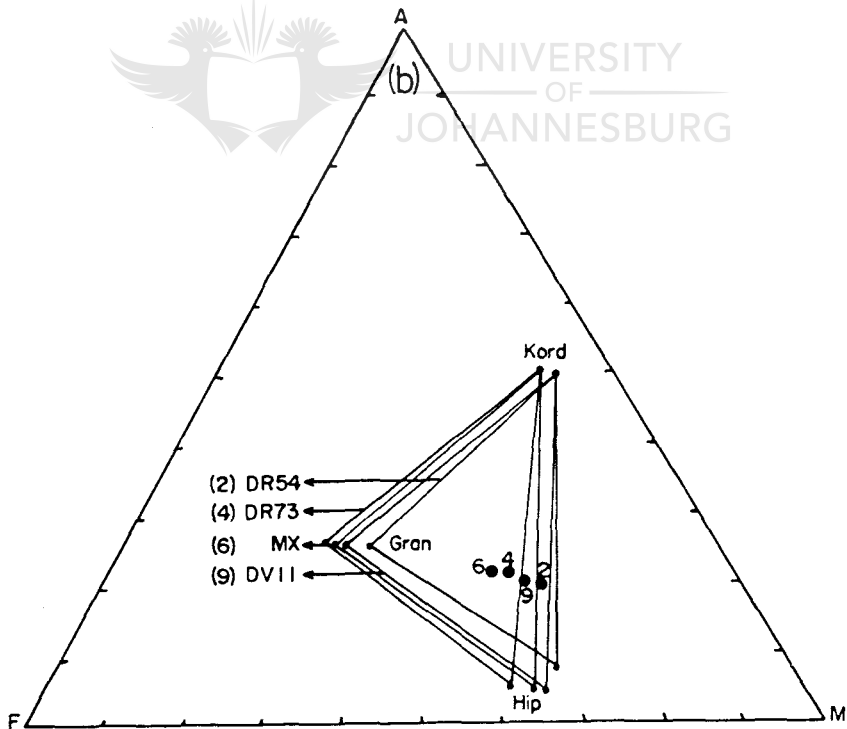
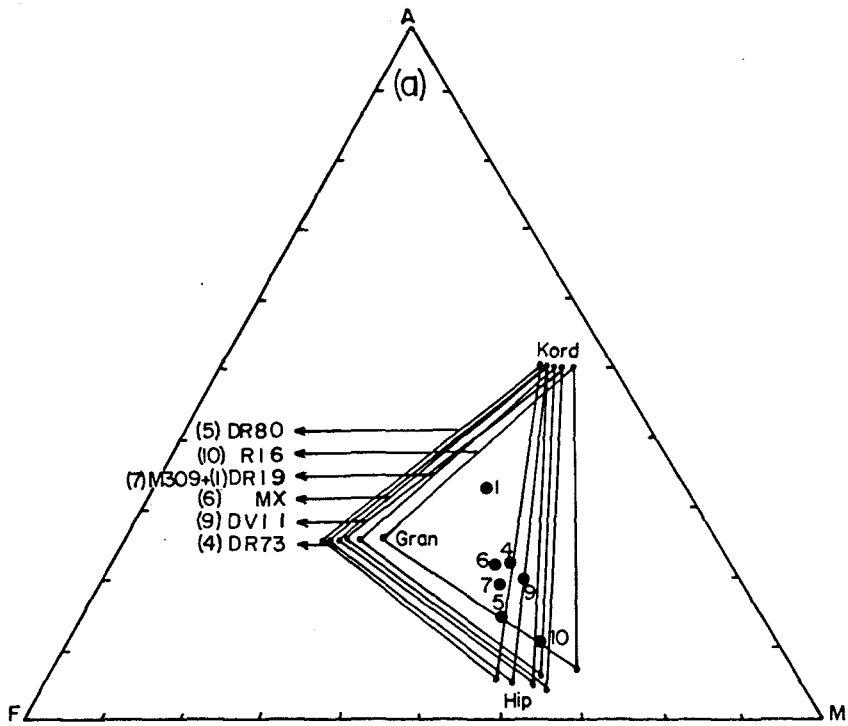
Figuur 68 Die invloed van die $MgO/MgO+FeO$ (mol)-verhouding op die posisie en wydte van die PT-interval waarin kordiëriet+granaat+hipersteen 'n stabiele assosiasie in pelitiese gesteentes vorm. β -70, 50 en 30 = 100. $MgO/(MgO+FeO)$ (Hensen en Green, 1972, Fig. 1, 4 en 6).

Die volgende afleidings in terme van die totale chemiese samestelling van die kordiëriet-granaatgranoliete kan met verwysing na figure 69a en b gemaak word:

- (i) die volgende drie individuele groepe monsters word deur soortgelyke $MgO/MgO+FeO$ verhoudings en grootliks verskillende $Al_2O_3/MgO+FeO$ -verhoudings gekenmerk:

(DV 11 en R 16); (MX, M 309 en DR 80);
(DR 73 en DR 19) - fig. 69a.

Uit die voorafgaande bespreking is dit duidelik dat die druk waarby granaat verskyn as gevolg van die deurlopende reaksie tussen kordiëriet en hipersteen afneem met 'n toenemende $Al_2O_3/MgO+FeO$ -verhouding van die gesteentes. Aangesien die $MgO/MgO+FeO$ -



Figuur 69a en b AFM-diagramme (projeksie deur K/vs) wat 'n gebrek aan korrelasie tussen die totale chemiese samestelling van die kordieriet-granaatgranoliete en die betrokke ferromagnesiese minerale illustreer. Die invloed van die $MgO/MgO+FeO$ - en $Al_2O_3/MgO+FeO$ -verhoudings (mol) word onderskeidelik in figure a en b ondersoek.

verhouding van granaat afneem met afnemende druk beteken dit dus dat die FeO-inhoud van granaat sal toeneem met toenemende $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}+\text{FeO}$ -verhouding van die gesteentes. Indien laasgenoemde verhouding dus 'n beslissende rol gespeel het in stabiliteitsverwantskappe van granaat, kordiëriet en hipersteen in hierdie ondersoek behoort die FeO-inhoud van granaat in bogenoemde drie groepe versamelings met soortgelyke $\text{MgO}/\text{MgO}+\text{FeO}$ -verhoudings ook sistematies toe te neem met 'n toename in die $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}+\text{FeO}$ -verhouding van die betrokke gesteentes. Dit geld egter slegs vir DV 11 en R 16 en nie vir Mx, M 309 en DR 80 nie, en ook nie vir DR 73 en DR 19 nie (Fig. 69a). Dit lyk dus nie asof die $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}+\text{FeO}$ -verhouding van die gesteentes in hierdie ondersoek 'n beslissende invloed het op die samestelling van die ferro-magnesiëse minerale in die granaatgranoliet nie;

- (ii) die volgende twee individuele groepe monsters in figuur 69b word deur soortgelyke $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}+\text{FeO}$ -verhoudings en verskillende $\text{MgO}/\text{MgO}+\text{FeO}$ -verhoudings gekenmerk:

(MX en DR 73) en (DV 11 en DR 54).

Aangesien die MgO-inhoud van granaat in gesteentes met soortgelyke $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}+\text{FeO}$ -verhoudings en by konstante temperatuur en druk afneem met afnemende $\text{MgO}/\text{MgO}+\text{FeO}$ -verhouding van die gesteentes (Hensen en Green, 1972, tabel 2) beteken dit dat die MgO-inhoud van granaat in monsters DR 73 en DR 54 onderskeidelik hoër moet wees as in die geval van monsters MX en DV 11. Dit is so in die geval van DR 54 en DV 11, maar nie in die geval van DR 73 en MX nie.

Die algemene gevolgtrekking is dus dat die totale chemiese samestelling van die kordiëriet-granaatgranoliet in hierdie ondersoek nie die samestelling van die betrokke ferro-magnesiëse minerale beïnvloed het nie. Die waargenome ver-

plasing van 3-fasevelde in die AFM-diagramme van figuur 66a-f is dus nie gekoppel aan subtiele variasies in die totale chemiese samestelling van die kordiëriet-granaat-granoliete nie, en gevolglik word die faseverwantskappe tussen kordiëriet, granaat, hipersteen en biotiet in hierdie gesteentes uitsluitlik deur die eksterne veranderlikes (P, T en μ_{H_2O}) beheer.

Die totale chemiese samestelling van die granaatgranoliete beheer dus nie die samestelling van die ferro-magnesiese minerale wat onderskeidelik in twee-veranderlike ewewig in die drie verskillende groepe gesteentes in figuur 63 is nie, maar speel wel 'n bepalende rol in die karakter van die mineraalversamelings wat tydens die tweede (M_2) periode van metamorfose in die Ortopirokseensone ontwikkel het. Hierdie stelling is reeds volledig met verwysing na die AFM-diagram van figuur 63 (Afd. VIII-1.2) bespreek en slegs die belangrikste punte word hier opgesom: Die drie hoof-tipes gesteentegroepe beslaan elk 'n omlýnde veld in figuur 63. Groep 1 en Groep 3 word onderskeidelik deur die afwesigheid van kordiëriet en granaat gekenmerk, terwyl kordiëriet, granaat en hipersteen 'n stabiele assosiasie in Groep 2 vorm. Die Groep 3 gesteentes (die granaatvrye kordiërietgranoliete), en die geassosieerde ferro-magnesiese minerale, word deur die hoogste MgO/FeO-verhoudings gekenmerk (Fig. 67). Die afwesigheid van granaat (en dus die volledige verloop van die reaksie $\text{granaat} + \text{kwarts} \rightleftharpoons \text{kordiëriet} + \text{hipersteen}$) in hierdie gesteentes kan slegs te wyte wees aan die feit dat bogenoemde reaksie nie by dieselfde druk-toestand as in die geval van die kordiëriet-granaatgranoliete (Groep 2) 'n aanvang geneem het nie. Hiervolgens, en met verwysing na figuur 68, beteken dit dus dat granaat in die Groep 3 gesteentes by 'n hoër druk begin afbreek het en reeds volledig gereageer het op 'n stadium toe granaat, hipersteen en kordiëriet steeds 'n stabiele assosiasie in die kordiëriet-granaatgranoliete (Groep 2) by 'n laer druk gevorm het. Die moontlike invloed van temperatuur en druk op die stabiliteitsverwantskappe van kordiëriet, granaat en

hipersteen word volledig in Afdeling VIII-2.3.4 bespreek.

2.3.3 Die stabiliteit van biotiet in die granaatgranoliet

Probleme gekoppel aan die stabiliteit van biotiet in die granaatgranoliet is hoofsaaklik beperk tot die gesteentes wat deur die teenwoordigheid van vier ferro-magnesiese minerale (kordiëriet, granaat, hipersteen en biotiet) gekenmerk word, dit wil sê die kordiëriet-granaatgranoliete. Die granaatvrye en kordiërietvrye granoliete bevat elk slegs drie ferro-magnesiese minerale en daar is op petrografiese gronde geen rede waarom biotiet in laasgenoemde twee groepe gesteentes nie as deel van die ewewigsversameling beskou kan word nie (Tabel 6). Granoliete wat geen water-ryke minerale bevat nie (biotiet en hornblende) is verder ook 'n raar verskynsel in die natuur en die meeste granolietterreine in die wêreld behoort volgens De Waard (1965) tot die hornblende-granolietfasies van metamorfose.

Die assosiasie biotiet+almandiet+hipersteen+kordiëriet (plus kwarts en veldspaat) is ook 'n redelike algemene verskynsel in granolietterreine (De Waard 1965 en 1966). Na aanleiding van die wydverspreide voorkoms van bogenoemde versameling het De Waard (1966, p. 486) selfs voorgestel dat die granolietfasies in 'n biotiet-almandiet-kordiëriet-subfasies onderverdeel kan word. Die beskikbare inligting uit die literatuur is dus 'n aanduiding dat biotiet wel stabiel kan wees in die teenwoordigheid van kordiëriet, granaat en hipersteen. Reinhardt (1968, p. 465) beskryf bogenoemde versameling in granoliete van die Grananoque gebied in Ontario, Kanada, maar is van mening dat al vier ferro-magnesiese minerale nie 'n ewewigsversameling verteenwoordig nie. Die teenwoordigheid van biotiet in pelitiese granoliete word egter steeds deur Reinhardt as noodsaaklik beskou. Indien biotiet afwesig is sal dit beteken dat hipersteen en sillimaniet 'n stabiele assosiasie moet vorm.

Laasgenoemde assosiasie is egter 'n uitsonderlike verskynsel in die natuur. In die geval van die granoliete onder bespreking word die assosiasie van hipersteen en sillimaniet egter verhoed deur die stabiele verbindingslyn tussen kordiëriet en granaat (Fig. 66a).

Die stabiliteitsverwantskappe van biotiet in die kordiëriet-granaatgranoliete van die huidige ondersoek kan egter nie sonder enige twyfel op petrografiese gronde geëvalueer word nie. Biotiet vorm altyd deel van die korona-assosiasie (d.w.s. die deurlopende reaksie tussen kordiëriet, granaat en hipersteen) en kan tot 18 volume persent van die gesteentes beslaan (Tabel 2, Afd. IV). Biotiet in laasgenoemde assosiasie vertoon wel soms tekens van onstabiliteit soos byvoorbeeld deur die vergroeiing tussen biotiet en kianiet (Fig. 9b en 12) geïllustreer word. In ander gevalle weer vertoon biotiet egter geen tekens van onstabiliteit in assosiasie met kordiëriet, granaat en hipersteen nie.

Die detail ondersoek van die faseverwantskappe tussen kordiëriet, granaat, hipersteen en biotiet in die AFM-diagramme van figure 66a-f kan egter meer lig werp op die probleem van die stabiliteit van biotiet in die kordiëriet-granaatgranoliete. Die mees opvallende kenmerk van bogenoemde AFM-diagramme is die waargenome sistematiese verplasing van die volgende 3-fasevelde: kordiëriet-granaat-hipersteen; kordiëriet-granaat-biotiet; granaat-hipersteen-biotiet en kordiëriet-hipersteen-biotiet. Die 3-fasevelde waarby biotiet betrokke is word wel gekompliseer deur die teenwoordigheid van kruisende verbindingslyne. In die geval van groepe monsters wat egter nie deur kruisende verbindingslyne gekenmerk word nie (bv. Fig. 66d) is dit opvallend dat die monstervolgorde en rigting van verplasing van sub-driehoek presies in ooreenstemming is met dié van die kordiëriet-granaat-hipersteen 3-faseveld in figure 66b en c. Hierdie opeenvolging kan met verwysing na figuur 66 as volg in die rigting van Fe-verryking opgesom word:

- (i) die 3-faseveld kordiëriet-granaat-hipersteen:
 R 16 → DR 54 → (DR 19+M 309) → DV 11 → MX
 DR 73 → DR 80 (Fig. 66b), en
 R 16 → DR 59 → M 309 → M 333 (Fig. 66c)
- (ii) die 3-faseveld granaat-kordiëriet-biotiet (Fig. 66d)
 R 16 → DR 54 → M 309 → DR 19 → MX
- (iii) Die 3-faseveld granaat-hipersteen-biotiet (Fig. 66e)
 DR 54 → DR 19 → MX → DR 80
- (iv) Die 3-faseveld kordiëriet-hipersteen-biotiet
 (Fig. 66f)
 R 16 → DR 54 → MX → DR 73 → DR 80

Bogenoemde sistematiese verplasing van 3-fasevelde in die versameling biotiet-granaat-hipersteen-kordiëriet kan moeilik verklaar word indien biotiet nie as deel van die ewewigsversameling beskou word nie.

Die teenwoordigheid van kruisende verbindingslyne in AFM-diagramme waarby biotiet betrokke is, asook die verstrooiing van verdelingspunte in verdelingsdiagramme waarin biotiet een van die fases verteenwoordig (Afd. VII, Fig. 53, 54 en 55), is natuurlik 'n bewys dat hierdie mineraal nie volkome in ewewig met die geassosieerde ferro-magnetiese minerale is nie. Dit is egter nie 'n positiewe bewys vir die algehele onstabiliteit van biotiet in hierdie gesteentes nie. Die verstrooiing van verdelingspunte in verdelingsdiagramme waarby biotiet betrokke is, asook die variasie in die samestelling van biotiet in individuele monsters, is intendeel 'n baie algemene verskynsel in hoë-gradse metamorfe terreine (Dallmeyer en Dodd, 1971; Dallmeyer, 1974; Hess, 1971; Guidotti e.a., 1975).

Die stabiliteit van biotiet in assosiasie met kordiëriet, granaat en hipersteen word ook ondersteun deur die eksperimentele inligting van Hensen en Green (1970, p. 437) en

Hensen (1971, p. 209). Na aanleiding van hierdie inligting het die teenwoordigheid van biotiet geen invloed op die deurlopende reaksieverwantskap tussen granaat, kordiëriet en hipersteen nie. Die samestelling van die samebestaande ferro-magnetiese minerale in bogenoemde versameling kan slegs deur die teenwoordigheid van biotiet beïnvloed word indien 'n addisionele komponent (bv. Ti^{+4} of Mn^{+2}) in biotiet en in een van die ander geassosieerde fases substitueer, en indien hierdie substitusie die verdeling van FeO en MgO tussen die twee betrokke fases beïnvloed. Die chemiese inligting in hierdie ondersoek (Afd. VI) is egter 'n aanduiding dat granaat, kordiëriet en hipersteen baie min TiO_2 bevat, terwyl die MnO-inhoud van biotiet weer baie laag is. Die MgO/MgO+FeO-verhouding van biotiet verskil egter van dié van die geassosieerde gesteente met die gevolg dat die teenwoordigheid van biotiet die relatiewe verhouding van kordiëriet, granaat en hipersteen in tweeveranderlik ewewig kan verander (Hensen, 1971, p. 209).

Indien biotiet dus wel as 'n stabiele fase in die kordiëriet-granaatgranoliete van hierdie ondersoek beskou word beteken dit dat een van die volgende twee 2-veranderlike versamelings stabiel moet wees (Hensen, 1971, p. 209):

- (i) kordiëriet-granaat-hipersteen-biotiet-kwarts-plagioklaas- H_2O , in 'n K_2O -arme sisteem, of
- (ii) kordiëriet-granaat-hipersteen-kwarts-biotiet-K-veldspaat-plagioklaas, in 'n H_2O -arme sisteem.

Die granaatgranoliete van die Bandelierkop-Formasie is verarm in K_2O (Fig. 18a en b, Afd. V) en word deur die relatiewe afwesigheid van K-veldspaat gekenmerk (Tabel 2). Die eerste versameling definieer dus die hoof-ewewig in hierdie gesteentes tydens die tweede (M_2) periode van metamorfose.

Die teenwoordigheid van biotiet as 'n stabiele fase in assosiasie met kordiëriet, granaat en hipersteen kompliseer egter die konstruksie van die AFM-projeksie in hierdie

ondersoek. Na aanleiding van hierdie konstruksie (Afd. VIII-1.3.3) kan 'n maksimum van drie fases saam in ewewig op die AFM-diagram voorgestel word omdat die aantal inerte komponente (Al_2O_3 , MgO en FeO) gelyk is aan 3. Met biotiet as 'n addisionele fase is $C = 3$, $P = 4$ en $F = 1$. Indien biotiet wel stabiel is beteken dit dus dat die keuse van komponente vir die konstruksie van die AFM-diagram nie voldoende is om die stabiliteitsverwantskappe van al die ferromagnesiese fases volledig te beskryf nie. Hierdie probleem kan aan die hand van een van die volgende twee moontlikhede opgelos word:

- (i) In die konstruksie van die AFM-diagram is H_2O as 'n mobiele komponent beskou. Indien H_2O egter inert is verander die situasie want dan is die aantal inerte komponente (Al_2O_3 - MgO - FeO - H_2O) gelyk aan 4, en vier ferromagnesiese minerale vorm dus 'n stabiele assosiasie.
- (ii) TiO_2 is nie as 'n komponent in die konstruksie van die AFM-diagram in hierdie ondersoek beskou nie. Biotiet kan egter tot 5 massapersent TiO_2 bevat (Tabel 20a), terwyl die geassosieerde minerale weer uiters min TiO_2 bevat. Die teenwoordigheid van TiO_2 kan dus die stabiliteitsveld van biotiet by hoër temperature vergroot (Hensen, 1971, p. 209).

Een of beide van bogenoemde faktore kon dus 'n rol gespeel het in die stabiliteitsverwantskappe van biotiet in die kordiëriet-granaatgranoliete. Die mobiele of inerte status van H_2O word later volledig bespreek (Afd. VIII-2.3.4.2d).

2.3.4 Die beweging van 3-fasevelde in AFM-diagramme vir die kordiëriet-granaatgranoliet

2.3.4.1 Rigting van beweging

Die sistematiese verplasing van sub-driehoeke in figure 66b en c is gekoppel aan die deurlopende reaksieverwantskap tussen kordiëriet, granaat en hipersteen in die Ortopirokseensone. Die rigting waarin hierdie reaksie verloop is reeds volledig in die afdeling oor petrografie bespreek (Afd. IV-1.2.1.1) en is duidelik in figure 11a-d geïllustreer. Granaat reageer dus om kordiëriet en hipersteen te vorm en die deurlopende karakter van hierdie reaksie gee aanleiding tot die twee-veranderlike stabiele assosiasie van die uitgangstof en produkte binne 'n beperkte PT-interval in die Ortopirokseensone (Fig. 68). Met verwysing na figuur 68 is dit duidelik dat kordiëriet+granaat 'n stabiele assosiasie by hoë druk vorm terwyl kordiëriet+hipersteen (sonder granaat) weer 'n stabiele assosiasie by laer druk vorm. Daar kan dus met 'n groot mate van vertroue aanvaar word dat die reaksie $\text{granaat} + \text{kwarts} \rightleftharpoons \text{kordiëriet} + \text{hipersteen}$ deur 'n verlaging in druk beheer is. Aangesien die MgO-inhoud van kordiëriet, granaat en hipersteen by konstante temperatuur afneem met afnemende druk (Hensen en Green, 1972, p. 335), volg dit dat die waargenome verplasing van sub-driehoeke in figuur 66b in die rigting van FeO-verryking plaasvind. Dit kan ook baie duidelik geïllustreer word indien die modale samestelling van chemies ekwiwalente monsters en die MgO-inhoud van die geassosieerde ferro-magnesiëse minerale in figuur 66b met mekaar vergelyk word. Met verwysing na laasgenoemde figuur is dit duidelik dat monsters DR 73 en M 309 naastenby dieselfde chemiese samestelling in terme van die AFM-komponente besit. Die chemiese samestelling word dus as 'n moontlike veranderlike uitgeskakel en gevolglik behoort die modale hoeveelheid granaat vanaf M 309 na DR 73 af te neem. Hierdie inligting kan tesame met die M-waardes (uit die AFM-diagram) vir die geassosieerde ferro-magnesiëse minerale as volg opgesom word:

<u>Monster</u>	Modale hoeveel- heid granaat	<u>M-waardes</u>			
		Gran	Kord	Hip	Biot
M 309	9	0,408	0,859	0,647	0,720
DR 73	1	0,352	0,822	0,620	0,660

Die verplasing van die 3-fasevelde kordiëriet-granaat-hipersteen vir monsters M 309 en DR 73 in figuur 66b is presies in ooreenstemming met die rigting van afnemende granaat en dus die rigting van Fe-verryking.

Met verwysing na die bespreking van die verwantskap tussen die AFM-diagram en die fasereël (Afd. VIII-1.3.1.1, Fig. 64) is dit soos reeds genoem ook duidelik dat elke individuele sub-driehoek in figuur 66b (en dus elke individuele monster) 'n toestand van chemiese ewewig onder verskillende eksterne toestande van metamorfose bereik het. In die volgende afdeling word 'n poging aangewend om die spesifieke veranderlike (temperatuur, druk of μ_{H_2O}) te identifiseer wat 'n hoofrol gespeel het in die verplasing van sub-driehoeke in die AFM-diagramme vir die granaatgranoliete.

2.3.4.2 Rede vir verplasing van sub-driehoeke in die AFM-diagramme van figure 66a-f

Die doel van hierdie afdeling is om al die beskikbare geologiese en petrochemiese inligting te gebruik om die waargenome verplasing van 3-fasevelde in die AFM-diagramme as 'n funksie van temperatuur, druk en die chemiese potensiaal van water te ondersoek. Gepubliseerde veld- en eksperimentele inligting word ook waar moontlik as verdere verwysings gebruik.

Die verplasing van 3-fasevelde in die huidige ondersoek word die beste aan die hand van die versameling almandiet+kordiëriet+hipersteen geïllustreer (Fig. 66b), en slegs

hierdie versameling word verder bespreek. Die akkurate evaluasie van die fisies veranderlikes wat moontlik verantwoordelik is vir die verplasing van sub-driehoek in die AFM-diagramme word ongelukkig bemoeilik as gevolg van die regionale verspreiding van die betrokke monsters en die oppervlakte wat deur die Ortopirokseensone beslaan word (Fig. 22). Dit is dus onwaarskynlik dat die hele Ortopirokseensone onderhewig was aan presies dieselfde fisiese toestande van metamorfose. As gevolg hiervan is dit duidelik dat variasies in temperatuur, druk en die chemiese potensiaal van die mobiele komponente binne hierdie gebied verwag kan word. Die sistematiese verplasing van 3-fasevelde in veral figuur 66b is egter 'n positiewe bewys dat een van die fisiese veranderlikes sistematies oor die hele gebied gevarieer het.

(a) Temperatuur as 'n moontlike eksterne veranderlike

Die beskikbare veldinligting is nie voldoende om die rol van temperatuur as 'n moontlike eksterne veranderlike in die Ortopirokseensone te evalueer nie. Die rede hiervoor dat geen van die beskikbare monsters naby aan mekaar versamel is nie (Fig. 22). Die petrochemiese inligting, asook gegewens uit die literatuur, kan egter as basis gebruik word om die moontlike invloed van temperatuur op die stabiliteitsverwantskappe van die mineraalversamelings onder bespreking te ondersoek.

Die elementverdelingsteorie kan in hierdie opsig belangrike inligting verskaf indien daar aanvaar word dat die verdeling van MgO en FeO tussen ferro-magnetiese mineraalpare hoofsaaklik temperatuurafhanklik is en nie grootliks deur variasies in druk beïnvloed word nie (Kretz, 1959; Holdaway en Lee, 1977). Die toepassing van hierdie teorie op die verdeling van MgO en FeO tussen samebestaande kordiëriet-granaat, kordiëriet-hipersteen en granaat-hipersteen (Afd.

VII, Fig. 49, 50 en 52), en die redelike sistematiese verspreiding van verdelingspunte in hierdie figure, kan dus 'n aanduiding wees dat temperatuur nie grootliks oor die gebied gevarieer het nie. Sekere mineraalpare toon egter ook opvallende afwykings vanaf die reëlmatige verdelingslyne in figure 49, 50 en 52, en gevolglik bestaan die moontlikheid tog dat hierdie afwykings toegeskryf kan word aan verskille in temperatuur. Indien die spesifieke monsters wat afwyk vanaf die reëlmatige verdelingslyne in bogenoemde verdelingsdiagramme egter vergelyk word met die ooreenstemmende posisies van die betrokke 3-faseversamelings in die AFM-diagramme van figure 66b en c, is dit duidelik dat temperatuur nie verantwoordelik kan wees vir die sistematiese verplasing van die sub-driehoek nie. Die volgende mineraalpare toon byvoorbeeld afwykings vanaf ewewig in die verdelingsdiagramme van figure 49, 50 en 52.

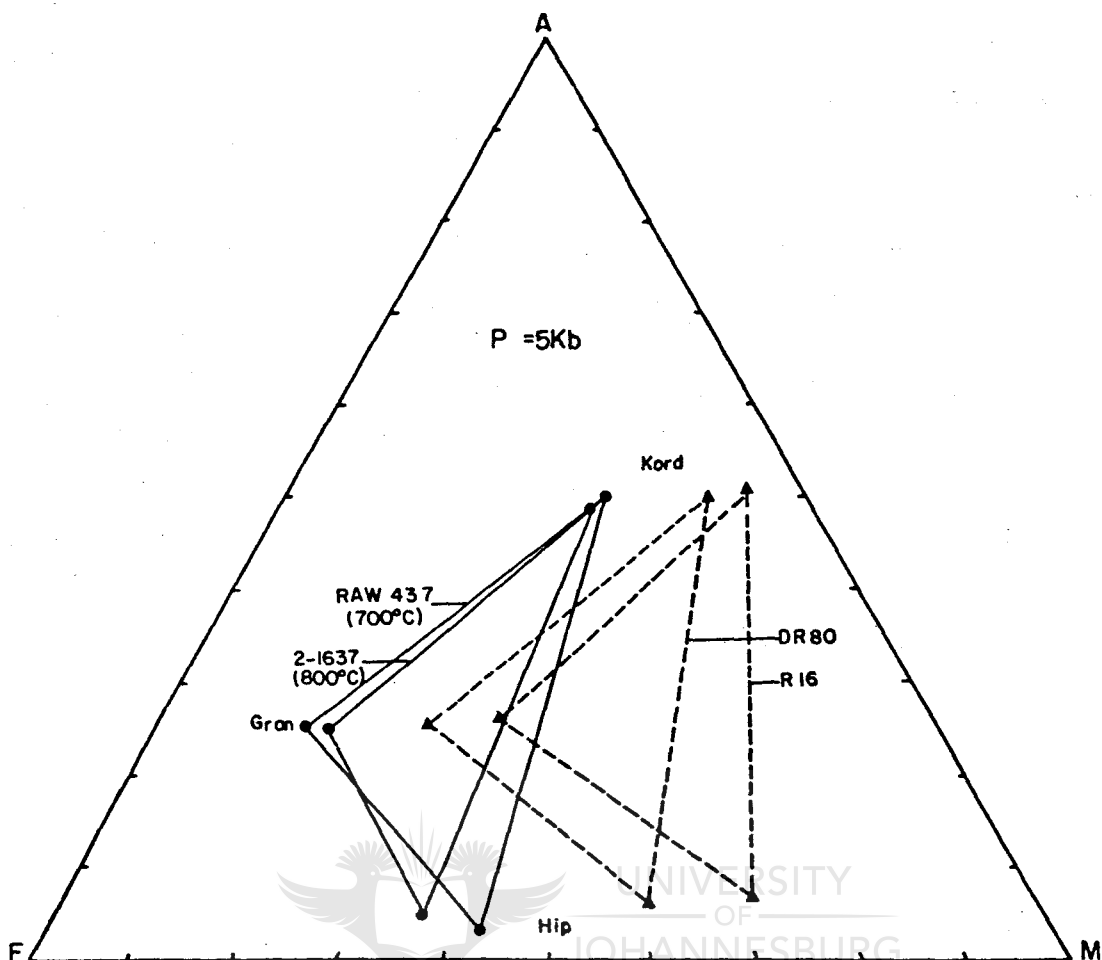
- (i) kordiëriet-granaat (Fig. 49): DV 11 en R 16
- (ii) hipersteen-granaat (Fig. 52): DV 11, R 16, M 333 en MX
- (iii) kordiëriet-hipersteen (Fig. 50): M 333 en MX

Met die uitsondering van die 3-faseversameling in een monster (M 333) vertoon die res van die versamelings in die AFM-diagram (Fig. 66b) geen kruisende verbindingslyne nie.

Die moontlike rol van temperatuur as 'n veranderlike in die verplasing van kordiëriet-granaat-hipersteen 3-fasevelde in AFM-diagramme kan ook met verwysing na veldinligting uit die literatuur ondersoek word. Die mees toepaslike inligting vir hierdie doel word deur Berg (1977) gegee vir kordiëriet-granaat-hipersteen-versamelings uit die kontakouereool van die Nain-kompleks in Labrador. Hierdie gebied was onderhewig aan 'n komplekse polimetamorfe geskiedenis met temperatuurwisselings van 645° tot 915°C terwyl die druk tussen 3,7 en 6,6 Kb gevarieer het (Berg, 1977, Tabel 7). Twee kordiëriet-granaat-hipersteenversamelings uit

laasgenoemde tabel wat by dieselfde druk, maar by grootliks verskillende temperature gekristalliseer het, word vir hierdie doel grafies in die AFM-diagram van figuur 70 voorgestel. Die drie-fasevelde vir die mees MgO-ryke (R 16) en mees Fe-ryke (DR 80) versamelings in die huidige ondersoek word ook in hierdie diagram geïllustreer. Al die toepaslike inligting uit tabel 7 (Berg, 1977) vir versamelings wat by dieselfde druk, maar verskillende temperature, gekristalliseer het word ongelukkig gekompliseer deur die teenwoordigheid van kruisende verbindingslyne as gevolg van die samestelling van granaat (kyk ook Fig. 2a, Berg, 1977). In die geval van die twee betrokke versamelings is die toename in die FeO-inhoud van kordiëriet, granaat en hipersteen met toenemende temperatuur en by konstante druk egter in ooreenstemming met beskikbare eksperimentele inligting (Hensen en Green, 1970, 1971, 1972; Holdaway en Lee, 1976).

Met verwysing na figuur 70 is dit ook duidelik dat 'n temperatuurverskil van 100°C in die geval van monsters RAW 437 en 2-1637 (Berg, 1977, Tabel 7) 'n relatiewe klein invloed het op die F/M verhoudings van kordiëriet, granaat en hipersteen. Die relatiewe geringe invloed van temperatuurveranderinge op die stabiliteitsverwantskappe van kordiëriet-granaat-hipersteen word ook deur eksperimentele inligting ondersteun (Hensen en Green, 1970, 1971, 1972). Die rede hiervoor is duidelik indien die oriëntasie van die PT-interval (waarin bogenoemde assosiasie stabiel is) ten opsigte van die temperatuur in 'n PT-diagram in aanmerking geneem word (Fig. 68). Dit is uit hierdie figuur duidelik dat 'n redelike groot variasie in temperatuur 'n relatief klein invloed op die stabiliteitsverwantskappe van kordiëriet+granaat+hipersteen behoort te hê. In teenstelling hiermee behoort klein veranderinge in druk 'n baie groter rol te speel.



Figuur 70 AFM-diagram (projeksie deur K/vs) wat die invloed van temperatuur by konstante druk (5 kb) op die relatiewe posisie van die kordiëriet-granaat-hipersteen 3-faseveld illustreer. Die twee 3-fasevelde RAW 437 en 2-1637, en die ooreenstemmende temperature, is met verwysing na Berg (1977, Tabel 7). Die 3-fasevelde vir monsters DR 80 en R 16 is uit die huidige ondersoek (Fig. 66b).

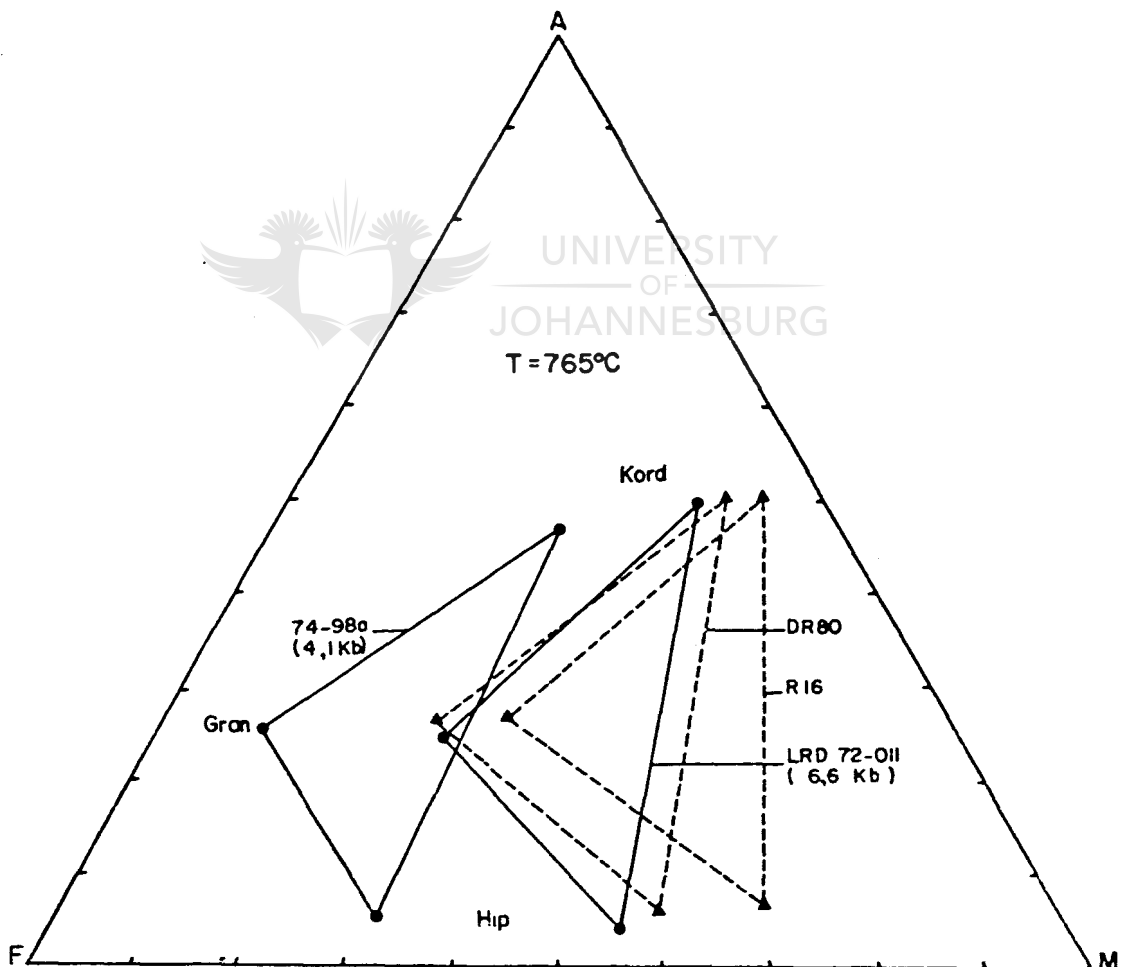
Die beskikbare inligting uit hierdie ondersoek en uit die literatuur is dus 'n goeie aanduiding dat die waargenome FeO-verryking van granaat, kordiëriet en hipersteen in die AFM-diagram van figuur 66b nie toegeskryf kan word aan 'n sistematiese toename in temperatuur tydens die tweede periode van metamorfose nie.

(b) Die rol van druk as 'n eksterne veranderlike

Die gebruik van die beskikbare veldinligting om die invloed

van druk op die verplasing van 3-fasevelde in figuur 66b te ondersoek word net soos in die geval van temperatuur ook deur die regionale verspreiding van die betrokke monsters beperk (Fig. 22). Die eksperimentele inligting (Hensen en Green, 1970, 1971, 1972) is egter 'n goeie aanduiding dat die stabiliteitsverwantskappe van kordiëriet+granaat+hipersteen tot 'n groot mate drukafhanklik is.

Die invloed van druk op die relatiewe posisie van die kordiëriet-granaat-hipersteen 3-faseveld in 'n AFM-diagram (Fig. 71) kan ook met verwysing na die inligting uit Berg (1977, Tabel 7) ondersoek word.



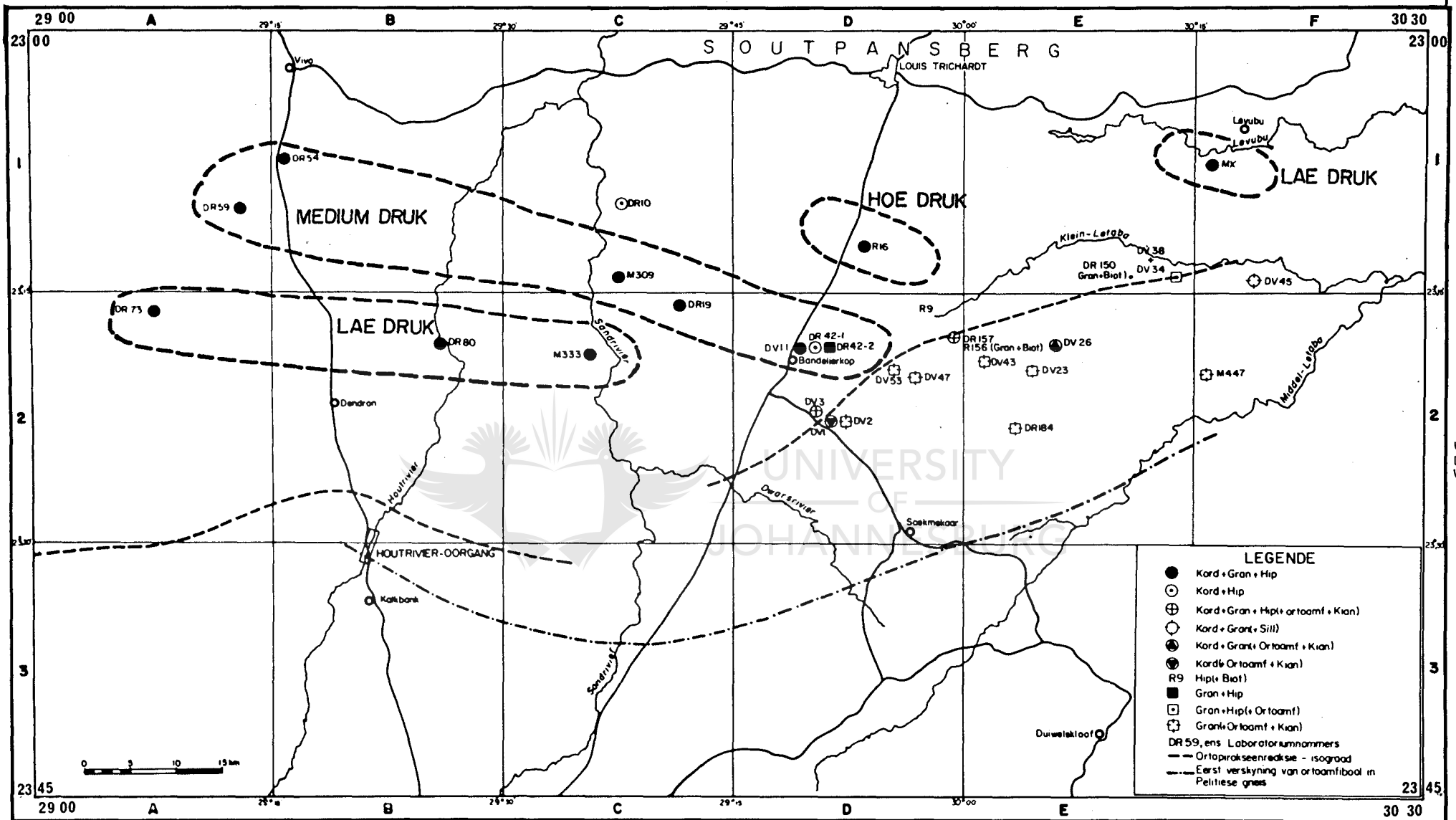
Figuur 71 AFM-diagram (projeksie deur K/vs) wat die invloed van druk by konstante temperatuur (765°C) op die relatiewe posisie van die kordiëriet-granaat-hipersteen 3-faseveld illustreer. Die twee 3-fasevelde 74-98a en LRD 72-011, en die ooreenstemmende drukwaardes, is met verwysing na Berg (1977, Tabel 7). Die 3-fasevelde vir monsters DR 80 en R 16 is uit die huidige ondersoek (Fig. 66b).

Die verplasing van die twee drie-fasevelde (74-98a en LRD 72-011) in hierdie diagram (Fig. 71) is baie meer opvallend as in die vorige geval (Fig. 70). Dit is dus duidelik dat 'n relatief klein verskil in druk (2,5 Kb in hierdie geval) by konstante temperatuur 'n baie groter invloed op die posisie van die 3-fasevelde in die AFM-diagram het as in die geval van 'n relatief groot temperatuurverskil. Die toename in die MgO-inhoud van die geassosieerde minerale by konstante temperatuur en met 'n verhoging in druk is ook in ooreenstemming met die eksperimentele inligting (Hensen en Green, 1972, p. 335). Die moontlikheid bestaan dus dat die waargenome sistematiese verplasing van 3-fasevelde in die rigting van FeO-verryking in die huidige ondersoek gekoppel kan wees aan 'n ooreenstemmende afname in totale druk tydens M_2 . Die probleem is egter of hierdie voorstel in verband gebring kan word met die regionale verspreiding van die betrokke monsters in hierdie ondersoek.

Die verspreiding van hierdie monsters word in figuur 22 (Afd. VI) gegee. Met verwysing na hierdie figuur (wat hier as Fig. 72 herhaal is) lyk dit asof mineraalversamelings met soortgelyke M-waardes vir die individuele minerale in die AFM-diagram van figuur 66b onderling 'n beperkte verspreiding in die Ortopirokseensone besit. Die beperkte aantal monsters regverdig egter nie 'n objektiewe afleiding in verband met moontlike drukgradiënte in die gebied nie.

(c) Die rol van H_2O as 'n eksterne veranderlike

Die beskikbaarheid van water tydens die tweede periode van metamorfose word onder andere deur die teenwoordigheid van biotiet in die granaatgranoliet asook deur tekens van wydverspreide anatekse in die Ortopirokseensone geïllustreer. Die mineraalversameling onder bespreking (dit wil sê die sub-driehoek kordiëriet-granaat-hipersteen) betrek wel nie biotiet nie, maar hierdie mineraal behoort steeds as 'n



Figuur 72 : Moontlike drukgradiënte in die M_2 -Ortopirokseenzone soos aangedui word deur die sistematiese verspreiding van kordieriet-granaat hipersteenversamelings met soortgelyke M-waardes vir die individuele minerale (Kyk Fig. 66b). Die inligting in hierdie figuur is dieselfde as in fig. 22.

addisionele stabiele fase in die kordiëriet-granaatgranoliete beskou te word (Afd. VIII-2.3.3). Die chemiese potensiaal van water kan egter die stabiliteitsverwantskappe tussen kordiëriet, granaat en hipersteen potensieel ook in die afwesigheid van biotiet beïnvloed. Dit is so omdat water in die kordiërietstruktuur opgeneem kan word. Die analyses van kordiëriet in die huidige ondersoek (Tabelle 11a en b) en uit die literatuur (Leake, 1960), is 'n aanduiding dat die mineraal tot 3 massapersent H_2O kan bevat. Kordiëriet kan dus (soms) as 'n waterryke mineraal beskou word en gevolglik kan die teenwoordigheid of afwesigheid van water die stabiliteitsverwantskappe van hierdie mineraal beïnvloed.

Die groot invloed van klein hoeveelhede water op die druk waarby Mg-kordiëriet stabiel is word ook duidelik deur die eksperimentele werk van Newton (1972) geïllustreer. Die inligting uit Newton se ondersoek is 'n aanduiding dat die reaksie waarin Mg-ryke kordiëriet by $830^{\circ}C$ afbreek om enstatiet, sillimaniet en kwarts te vorm vanaf 7,7 Kb druk vir watervrye kordiëriet toeneem tot 11,2 Kb druk vir waterryke kordiëriet. Die teenwoordigheid van H_2O vergroot dus die stabiliteitsveld van kordiëriet, terwyl die Mg-inhoud ook toeneem met afnemende PH_2O , of μH_2O , (Holdaway, 1976, p. 303 en Reinhardt, 1968, p. 475).

Die moontlike rol van H_2O as 'n veranderlike in die verplasing van 3-fasevelde in AFM-diagramme is egter gekoppel aan die mobiele of inerte status van hierdie komponent. H_2O kan natuurlik slegs as 'n eksterne veranderlike beskou word indien die chemiese potensiaal van water ook ekstern beheer is.

(d) Die mobiele of inerte status van H_2O in die granaatgranoliet

Die invloed van water op die stabiliteitsverwantskappe van

waterryke minerale tydens metamorfose het betrekking op twee algemene gevalle, naamlik:

- (i) Die chemiese potensiaal van H_2O kan of deur die mineraalversamelings self beheer word (d.i. 'n inerte komponent), of kan ekstern gekontroleer wees (d.i. 'n mobiele komponent).
- (ii) $P_{H_2O} = P_{\text{totaal}}$ of $P_{H_2O} < P_{\text{totaal}}$.
In hierdie geval is dit belangrik om die mol fraksie H_2O in die fluïde fase te bepaal. Hierdie bespreking het egter slegs betrekking op die mobiele of inerte status van H_2O . Die mol fraksie H_2O in die fluïde fase word in Afdeling X bespreek.

Die rol van mobiele en inerte komponente in metamorfose is uit 'n teoretiese oogpunt deur Thompson (1955, 1957), Zen (1963) en Greenwood (1961) bespreek. Die volgende eienskappe van mineraalversamelings kan moontlik 'n aanduiding wees dat H_2O as 'n mobiele komponent in 'n metamorfe sone beskou moet word (Guidotti, 1970, p. 317):

- (i) Die AFM-topologie vir 2- en 3-faseversamelings vanaf naby geleë dagsome behoort reëlmatig te wees en dus gekenmerk te word deur die afwesigheid van opvallende kruisende verbindingslyne. 'n Spesifieke 3-faseveld is byvoorbeeld verteenwoordigend van 'n reeks gesteentes wat onder dieselfde P, T en μ_{H_2O} toestande gevorm het.
- (ii) Die verdeling van elemente tussen mineraalpare van 'n 3-faseveld in die AFM-diagram behoort reëlmatig te wees vir monsters vanaf nabygeleë dagsome.
- (iii) Die samestelling van vaste-oplossingsminerale binne 'n spesifieke metamorfe fasies behoort deurlopend te verander as gevolg van deurlopende gradiënte in P, T of μ_{H_2O} .
- (iv) 'n Hoofrede waarom H_2O algemeen as mobiel beskou

word, en dus nie grafies voorgestel word nie, is gebaseer op die waarneming dat die faseverwantskappe in pelitiese gesteentes vir baie metamorfe terreine volledig beskryf kan word sonder om H_2O as 'n komponent te betrek.

Bogenoemde kriteria is natuurlik slegs van toepassing indien die betrokke versamelings in chemiese ewewig is. Hierdie kriteria kan verder ook deur die teenwoordigheid van addisionele komponente (bv. MnO en CaO in granaat, en TiO_2 in biotiet) beïnvloed word wat nie by die konstruksie van die AFM-diagram in aanmerking geneem is nie.

Indien bogenoemde kriteria nie van toepassing is nie kan dit beteken dat H_2O as 'n inerte komponent beskou moet word.

Die mineraalversamelings onder bespreking voldoen tot 'n groot mate aan die eienskappe wat bo bespreek is. Dit word geïllustreer deur die reëlmatige verdeling van MgO en FeO tussen samebestaande kordiëriet, granaat en hipersteen (Fig. 49, 50 en 52), asook deur die afwesigheid van opvallende kruisende verbindingslyne in AFM-diagramme vir bogenoemde versameling (Fig. 66b). Afwykings wat wel waargeneem is (bv. enkele mineraalpare wat afwyk vanaf reëlmatige verdelingslyne, asook enkele kruisende verbindingslyne) kan geredelik toegeskryf word aan die feit dat die betrokke monsters oor 'n gebied van meer as 4 500 Km^2 versprei is.

Die keuse tussen die mobiele of inerte status van H_2O in die granaatgranoliet word egter gekompliseer indien biotiet as 'n addisionele fase in die versameling kordiëriet+granaat+hipersteen beskou word, en wel as gevolg van die volgende redes:

- (i) Die 4-faseversameling biotiet-granaat-hipersteen-kordiëriet kan slegs as 'n stabiele versameling in 'n AFM-diagram beskou word indien H_2O 'n inerte komponent is, of indien die stabiliteit van boge-

noemde versameling deur addisionele komponente beïnvloed word (Afd. VIII-2.3.3).

- (ii) Die verstrooiing van verdelingspunte in verdelingsdiagramme vir samebestaande kordiëriet-biotiet, granaat-biotiet en hipersteen-biotiet (Fig. 53, 54 en 55), en die teenwoordigheid van kruisende verbindingslyne in AFM-diagramme vir 3-faseversamelings waarby biotiet betrek is.

Die stabiliteit van biotiet in assosiasie met drie ferro-magnetiese minerale kan geredelik deur die teenwoordigheid van tot 4,5 massapersent TiO_2 (Tabel 20a) in biotiet verklaar word. Die tweede punt kan weer gekoppel word aan die waarneming dat biotiet nie volkome in ewewig is met die geassosieerde ferro-magnetiese minerale nie (Afd. VII-2.1.2). Die waargenome sistematiese en deurlopende variasie in die samestelling van biotiet vanaf die Ortoamfiboolsone tot in die Ortopirokseensone (Afd. VI-1.4.3.3 en Fig. 33) is egter 'n positiewe bewys ten gunste van die mobiele status van H_2O . Hierdie variasie is onafhanklik van die geassosieerde ferro-magnetiese minerale en is in al die beskikbare monsters van die Pelitiese gneis waargeneem (Afd. VI, Tabel 22). Die feit dat die samestelling van biotiet nie slegs oor die Ortopirokseenisograad varieer nie, maar ook binne die Ortopirokseensone, is dus 'n goeie aanduiding dat μH_2O as 'n onafhanklike veranderlike beskou moet word.

In opsomming kan daar dus gesê word dat die beskikbare petrografiese en chemiese inligting 'n goeie aanduiding is dat H_2O in hierdie ondersoek as 'n eksterne veranderlike beskou moet word en dat variasies in die chemiese potensiaal van H_2O gevolglik ook 'n rol kon speel in die waargenome verplasing van 3-fasevelde in die AFM-diagramme van figure 66-67.

e. Bespreking

Na aanleiding van die voorafgaande bespreking is dit duidelik dat die stabiliteitsverwantskappe van mineraalversamelings in die granaatgranoliet deur temperatuur, druk en die chemiese potensiaal van H_2O beheer is. Die moontlike invloed van suurstofdruk (PO_2) is nie in aanmerking geneem nie omdat die algemene teenwoordigheid van grafiet, en die relatiewe afwesigheid van magnetiet en ilmeniet, 'n aanduiding is dat die suurstofdruk laag was.

Die akkurate evaluasie van die spesifieke veranderlike (P, T of μH_2O) wat verantwoordlik is vir die sistematiese verplasing van die kordiëriet-granaat-hipersteen 3-faseveld in figure 66b, en c word egter beperk deur die regionale verspreiding van die betrokke monsters. Al drie veranderlikes kon dus, en het waarskynlik ook, binne die Ortopirokseensone gevarieer. Bewyse is egter aangevoer dat temperatuur nie grootliks (en definitief nie sistematies) oor die gebied gewissel het nie, en dat die betrokke 3-faseversamelings dus onder verskillende toestande van totale druk (P) en/of die chemiese potensiaal van H_2O (μH_2O) gekristalliseer het. Totale druk en μH_2O het egter blykbaar 'n teenoorgestelde invloed op die stabiliteit van kordiëriet. Die mineraal word meer Mg-ryk met 'n toename in druk (Afd. VIII-2.3.4.2b) en meer Fe-ryk met 'n toename in P_{H_2O} (Afd. VIII-2.3.4.2c). Aangesien die sub-driehoek in 'n rigting van Fe-verryking beweeg beteken dit dus dat die druk of afgeneem het, en/of dat μH_2O toegeneem het. Die beskikbare inligting (d.w.s. die reaksie $Gran+Qz \rightleftharpoons Kord+Hip$) is eerder ten gunste van 'n sistematiese afname in druk (as gevolg van opheffing) tydens M_2 (kyk ook Fig. 68). Die interaksie tussen temperatuur, druk en μH_2O met oorgang van M_2 na M_3 word in afdeling X-3 aan die hand van 'n geometriese analise van faseverwantskappe in die Pelitiese gneis langs die Ortopirokseenreaksie-isograad bespreek.

2.4 GRAFIESE REKONSTRUKSIE VAN OPEENVOLGENDE MINERAAL- VERSAMELINGS EN REAKSIEVERWANTSKAPPE IN DIE ORTOPIROK- SEENSONE

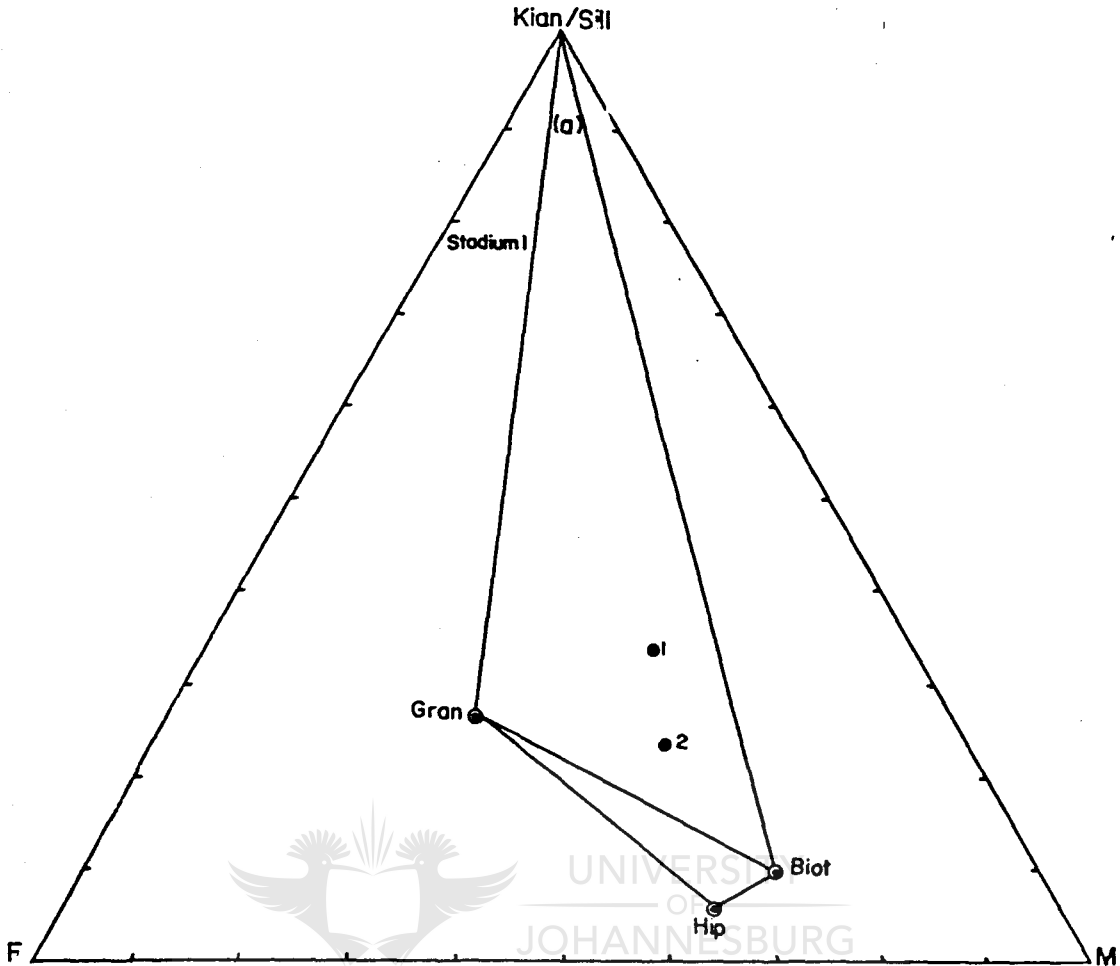
In die voorafgaande besprekings is slegs aandag geskenk aan die faseverwantskappe tussen kordiëriet, granaat, hipersteen en biotiet in die drie hooftepes granaatgranoliete. Hierdie mineraalversamelings is verteenwoordigend van die hoofewewig gedurende die tweede periode van metamorfose en verskaf die meeste inligting in verband met die veranderende fisiese toestande tydens hierdie stadium in die metamorfe ontwikkeling van die gebied. Die petrografiese karakter van hierdie gesteentes, en veral van die kordiëriet-granaatgranoliete, is egter 'n aanduiding van 'n meer komplekse metamorfe ontwikkeling (Afd. IV-1.2) as wat uit die vorige besprekings geblyk het. Aspekte van hierdie komplekse ontwikkelingsgeskiedenis kan by benadering afgelei word deur gebruik te maak van 'n grafiese rekonstruksie wat gebaseer is op petrografiese en chemiese inligting vir spesifieke monsters van die kordiëriet-granaatgranoliete.

Die kordiëriet-granaatgranoliete bestaan hoofsaaklik uit kordiëriet, granaat, hipersteen, biotiet, kwarts en plagioklaas. Verteenwoordigende monsters van hierdie gesteentes bevat egter soms ook klein hoeveelhede kianiet, spinel en K-veldspaat en kan dus nie volledig in terme van slegs een mineraalversameling beskryf word nie (Afd. IV-1.2). Hierdie gesteentes bied dus die beste beskikbare petrografiese inligting op grond waarvan 'n meer volledige metamorfe ontwikkeling vir die Ortopirokseensone gerekonstrueer kan word. Die res van die bespreking is gebaseer op chemiese en petrografiese inligting vir twee spesifieke monsters, naamlik DR 19 en R 13. Die chemiese samestelling van hierdie twee monsters word in tabel 7a gegee.

2.4.1 Fasetopologie tydens 'n vroeë stadium in die ontwikkeling van die kordiëriet-granaatgranoliete

Die rekonstruksie van die metamorfe ontwikkeling van die kordiëriet-granaatgranoliete is gebaseer op die aanname dat hierdie gesteentes oorspronklik geen kordiëriet of spinel bevat het nie, en hoofsaaklik uit granaat, biotiet en 'n aluminiumsilikaat (kianiet of sillimaniet) bestaan het. Hipersteen was op hierdie stadium reeds 'n stabiele mineraal in gesteentes met 'n geskikte chemiese samestelling. Die aanname dat hierdie gesteentes oorspronklik sillimaniet of kianiet bevat het kan nie onteenseglik op petrografiese gronde bewys word nie as gevolg van die probleme gekoppel aan die interpretasie van die vergroeiingsteksture tussen biotiet en kianiet (Afd. IV-1.2.1.2a). 'n Goeie aanduiding van die rol wat aluminiumryke minerale moontlik gedurende die vroeëre ontwikkeling van die kordiëriet-granaatgranoliete gespeel het word egter geïllustreer deur die feit dat die totale chemiese samestelling van hierdie gesteentes regs van die verbindingslyn tussen granaat en biotiet in die AFM-diagramme van figuur 66a en 73d stip. Dit is dus onwaarskynlik dat hierdie gesteentes gedurende M_1 byvoorbeeld slegs uit granaat, biotiet en hipersteen (plus kwarts en veldspaat) bestaan het.

Die volledige voorgestelde fasetopologie vir die vroeë ontwikkeling van die kordiëriet-granaatgranoliete word in figuur 73a gegee. Opeenvolgende stadiums in die ontwikkeling van hierdie gesteentes word in figure 73b, 73c en 73d geïllustreer. Die oorspronklike versamelings word in elke geval deur middel van stippellyne aangedui, terwyl die finale ewewigsversamelings deur soliede lyne gedefinieer word. Die chemiese samestelling van monsters DR 19 en R 13 is ook in al die diagramme gestip.



Figuur 73a Volledige voorgestelde fasetopologie vir 'n vroeë stadium in die ontwikkeling van die kordieriet-granaatgranoliet in die Ortopirokseensone. •¹ en •² is die samestelling van monsters DR 19 en R 13 onderskeidelik. Die diagram is 'n projeksie deur K/vs.

Dit is natuurlik nie moontlik om vas te stel of die topologie van figuur 73a verteenwoordigend is van die eerste (M_1) periode van hoë-gradse metamorfose of van vroeë stadiums tydens die tweede (M_2) periode van metamorfose nie. Dit is egter nie baie belangrik vir die doeleindes van hierdie rekonstruksie nie.

2.4.2 Die oorgang van stadium 1 na stadium 2

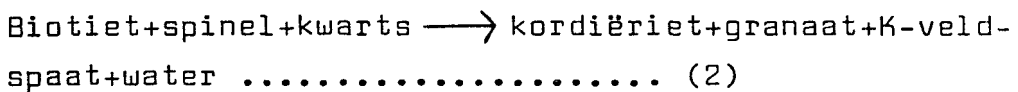
Die tweede stadium in die ontwikkeling van hierdie gesteentes word gedefinieer deur die eerste verskyning van kordieriet

ewewigsversameling gedurende die tweede stadium in die ontwikkeling van die kordiëriet-granaatgranoliete.

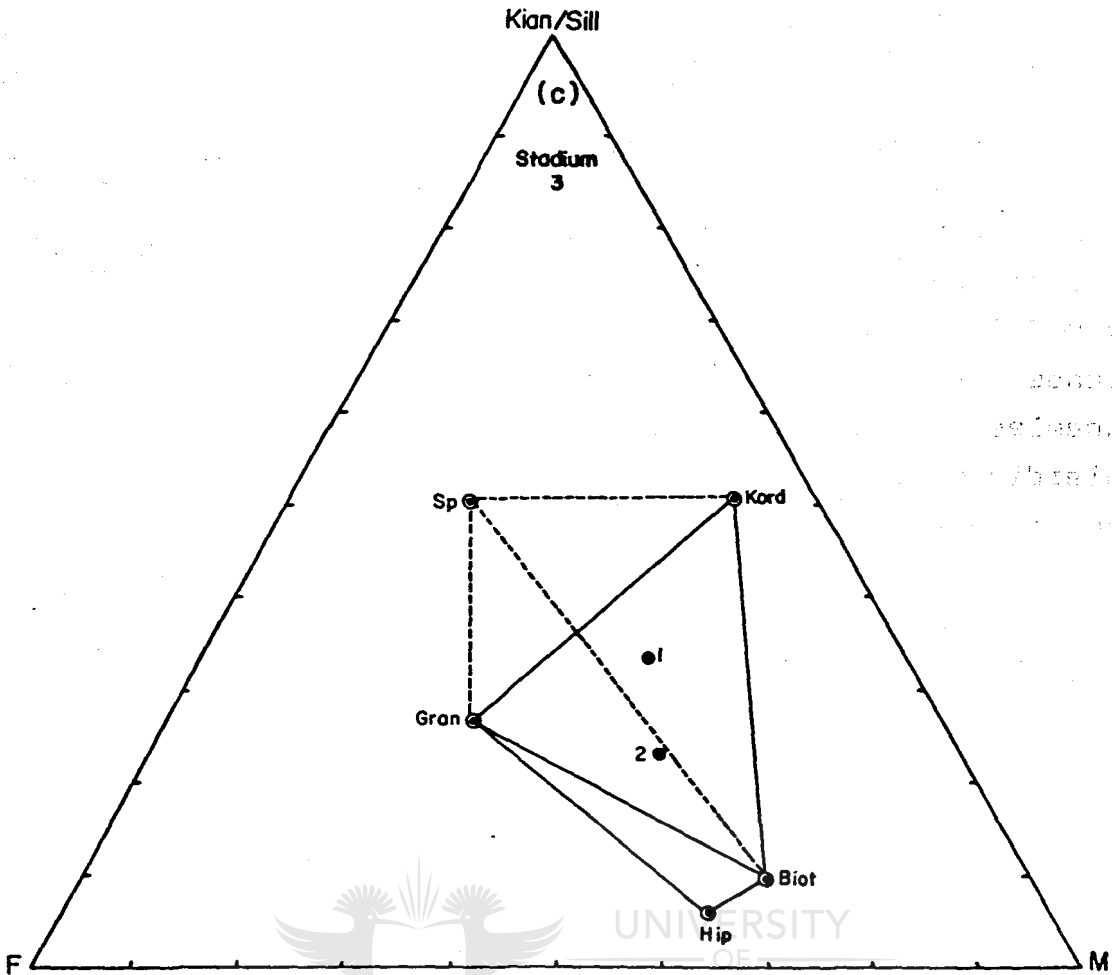
Al die minerale in figuur 73b kan natuurlik nie 'n ewewigsversameling onder willekeurig gespesifiseerde toestande van P,T en μ_{H_2O} in een gesteente vorm nie. Die verskillende 3-faseversamelings (sub-driehoek) kon egter wel in chemiese verskillende gesteentes in ewewig gewees het. In hierdie opsig moet dit in gedagte gehou word dat die totale chemiese samestelling van 'n spesifieke metamorfe gesteente slegs 'n termodinamiese betekenis het indien die hele sisteem (gesteente) volledig in ewewig is. In so 'n geval sal alle bewyse vir die teenwoordigheid van vroeëre relikversamelings natuurlik ook vernietig wees.

2.4.3 Die oorgang van stadium 2 na stadium 3

Spinel verdwyn gedurende hierdie stadium as 'n stabiele fase in die kordiëriet-granaatgranoliet. Die reaksie wat verantwoordelik is vir die verdwyning van spinel kon nie petrografies gedefinieer word nie, maar kan wel chemografies afgelei word (Fig. 73c).



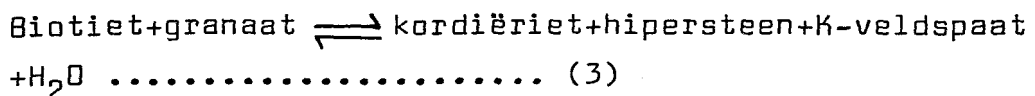
Hierdie reaksie gee aanleiding tot die verdwyning van spinel en die ontwikkeling van kordiëriet en granaat as 'n stabiele assosiasie in die Ortopirokseensone.

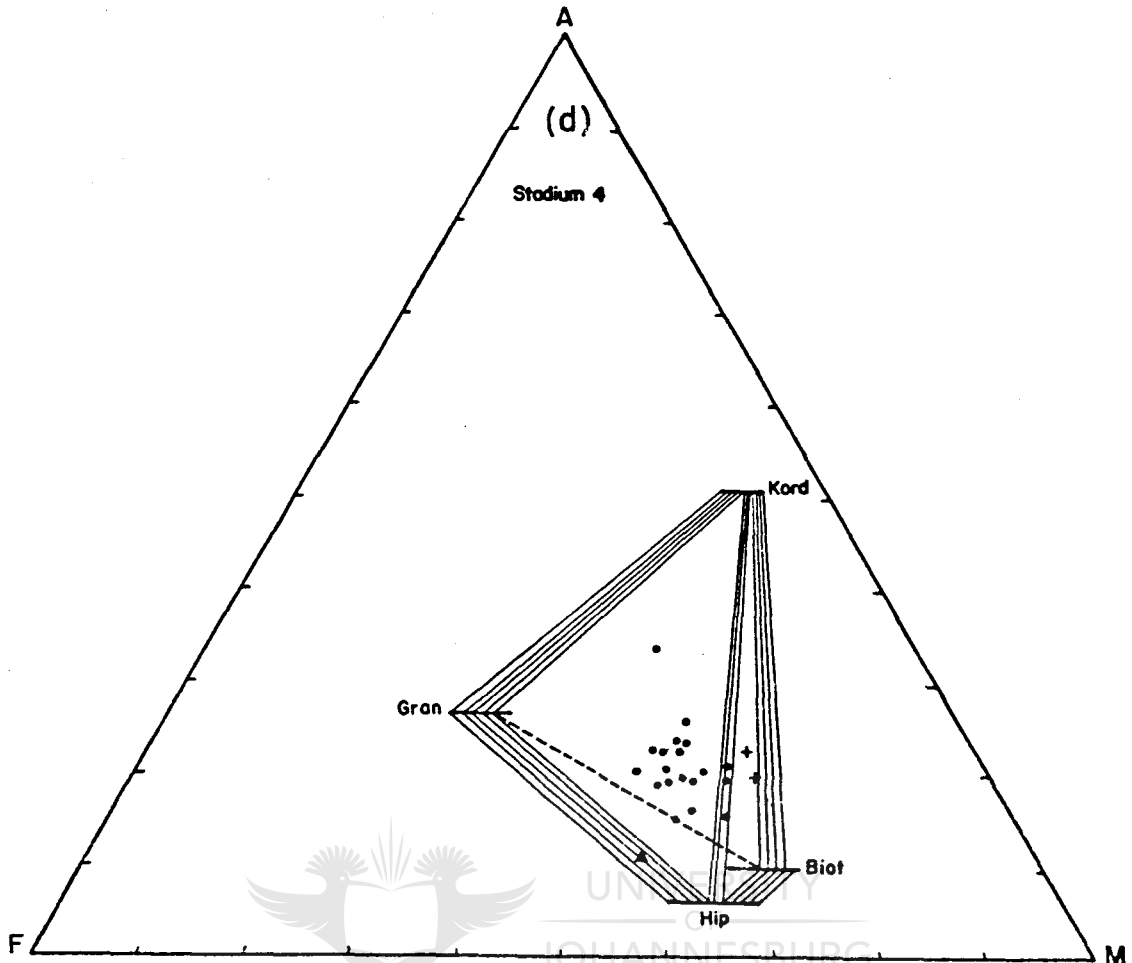


Figuur 73c Veranderende faseverwantskappe in die kordiëriet-granaatgranoliet met oorgang vanaf stadium 2 na stadium 3. Die faseverwantskappe kan weer eens aan die hand van 'n nie-deurlopende reaksie (reaksie 2) geïllustreer word. Stippel- en soliede verbindingslyne dui onderskeidelik die oorspronklike en finale versamelings aan. 1 = DR 19; 2 = R 13.

2.4.4 Die oorgang van stadium 3 na stadium 4

Die mineraalversamelings in figuur 73d illustreer die volledige fasetopologie vir die hoof-ewewig gedurende die tweede periode van metamorfose. Kordiëriet en hipersteen vorm vir die eerste keer 'n stabiele assosiasie as gevolg van die volgende reaksie:





Figuur 73d Stadium 4 illustreer die volledige faseverwantskappe in die kordieriet-granaatgranoliet tydens M_2 . Dit is nie duidelik of reaksie 3 ($Biot+gran \rightarrow kord+hip+K/vs+H_2O$) die deurlopende reaksie ($gran+Q_2 \rightleftharpoons kord+hip$) voorafgegaan het en of biotiet ook by laasgenoemde reaksie betrek is nie. • = kordieriet-granaatgranoliet; + = granaatvrye kordierietgranoliet; ▲ = kordierietvrye granaatgranoliet. Vir voorstellingsdoeleindes is die samestelling van hipersteen en biotiet by konstante A-waardes gestip.

Hierdie reaksie word algemeen in die literatuur beskryf (Berg, 1977; Winkler, 1974; Reinhardt, 1968) en definieer nie die eerste verskyning van hipersteen in die Ortopirokseensone nie. Hierdie mineraal was reeds stabiel gedurende die eerste periode van metamorfose (Afd. IV-3), en het waarskynlik oorspronklik ontwikkel as gevolg van dehidrasie-reaksies waarby minerale soos antofilliet, en moontlik ook biotiet, betrokke was.

Soos reeds genoem (Afd. VIII-2.3.3 en 2.3.4.2d) is dit nie

heeltemal duidelik of reaksie 3 die deurlopende reaksieverwantskap tussen kordiëriet, granaat en hipersteen voorafgegaan het, en of biotiet as deel van hierdie verwantskap beskou moet word nie.

2.4.5 Bespreking

Die ontwikkeling van die kordiëriet-granaatgranoliete is in die vorige afdeling skematies aan die hand van opeenvolgende AFM-diagramme ondersoek. Elke diagram is aan die voorafgaande een gekoppel deur middel van metamorfe reaksies wat chemografies afgelei is. Die voorgestelde opeenvolging van reaksies is dus wel chemies moontlik, maar daar kan natuurlik nie vanselfsprekend aanvaar word dat hierdie reaksies werklik in die voorgestelde vorm plaasgevind het nie. 'n Chemografiese interpretasie skeep slegs 'n basis vir die ondersoek van reaksies wat moontlik tussen verskillende fases in 'n gesteente plaasgevind het. Die werklike reaksies kan slegs afgelei word indien voldoende teksturele en chemiese inligting beskikbaar is. Hierdie inligting, en veral chemiese data, is nie beskikbaar nie, hoofsaaklik omdat tekens van vorige ewewigsversameling byna geheel en al vernietig is deur die deurlopende reaksieverwantskap tussen kordiëriet, granaat en hipersteen wat die hoofewewigstoestand tydens die tweede (M_2) periode van metamorfose definieer. Die volgende teksturele inligting is egter 'n aanduiding dat die skematiese rekonstruksie van opeenvolgende metamorfe gebeurtenisse in die Ortopirokseensone wel in chemies geskikte gesteentes kon plaasgevind het:

Petrografiese bewyse vir reaksie 1 word byvoorbeeld gegee deur die vergroeiing van spinel met kordiëriet wat soms in kontak met biotiet en kianiet gevind word (Fig. 8a en 12d). Hierdie vergroeiingstektuur, tesame met die waarneming dat beide spinel en kordiëriet as insluitels in mekaar gevind word (Fig. 8a) is 'n goeie aanduiding dat hierdie twee

minerale gelyktydig ontwikkel het. Verdere bewyse vir die stabiliteit van kordiëriet voordat die deurlopende reaksie tussen kordiëriet, granaat en hipersteen 'n aanvang geneem het word deur monster R 13 gegee. Hierdie monster illustreer die ontwikkeling van kordiëriet en hipersteen wat koronas om granaat vorm. Kordiëriet is egter nie tot hierdie koronas om granaat beperk nie maar kom self ook as insluitels in granaat voor. Hierdie insluitels bestaan uit 'n vergroeiing van kordiëriet, spinel, biotiet en kianiet (Fig. 12d), en verteenwoordig dus relikte van 'n vorige stabiele assosiasie waarby kordiëriet betrek is. Die chemiese samestelling van kordiëriet in hierdie insluitels behoort dus verskillend te wees van kordiëriet in die koronateksture. Hierdie moontlikheid kan egter nie verder ondersoek word nie aangesien geen mikrosonde analyses vir monster R 13 beskikbaar is nie.

3. FASEVERWANTSKAPPE IN DIE ORTOAMFIBOOLGNEIS VAN DIE ORTOAMFIBOOLSONE

Die Pelitiese gneis van die Ortoamfiboolsone word deur die teenwoordigheid van antofilliet, gedriet en kianiet gekenmerk terwyl kordiëriet en hipersteen afwesig is. Hierdie mineraalversamelings is dus uitsonderlik in die sin dat kordiëriet+ortoamfibool, wat baie algemeen in die literatuur beskryf word, afwesig is en dat die meeste gesteentes deur die teenwoordigheid van beide antofilliet en gedriet (of Al-antofilliet) gekenmerk word. Faseverwantskappe vir ortoamfibool in CaO-ryke gesteentes, wat ook kordiëriet bevat, is reeds by verskeie geleenthede in die literatuur beskryf (Stout, 1971, 1972; Robinson en Jaffe, 1969a en b; Robinson, Ross en Jaffe, 1971). Soortgelyke inligting bestaan egter nie vir kordiërietvrye, CaO-arme gesteentes nie. Hierdie ondersoek kan dus lig werp op die stabiliteitsverwantskappe van antofilliet en gedriet in CaO- en K₂O-arme gesteentes wat ook granaat, kianiet, biotiet,

kwarts en plagioklaas bevat.

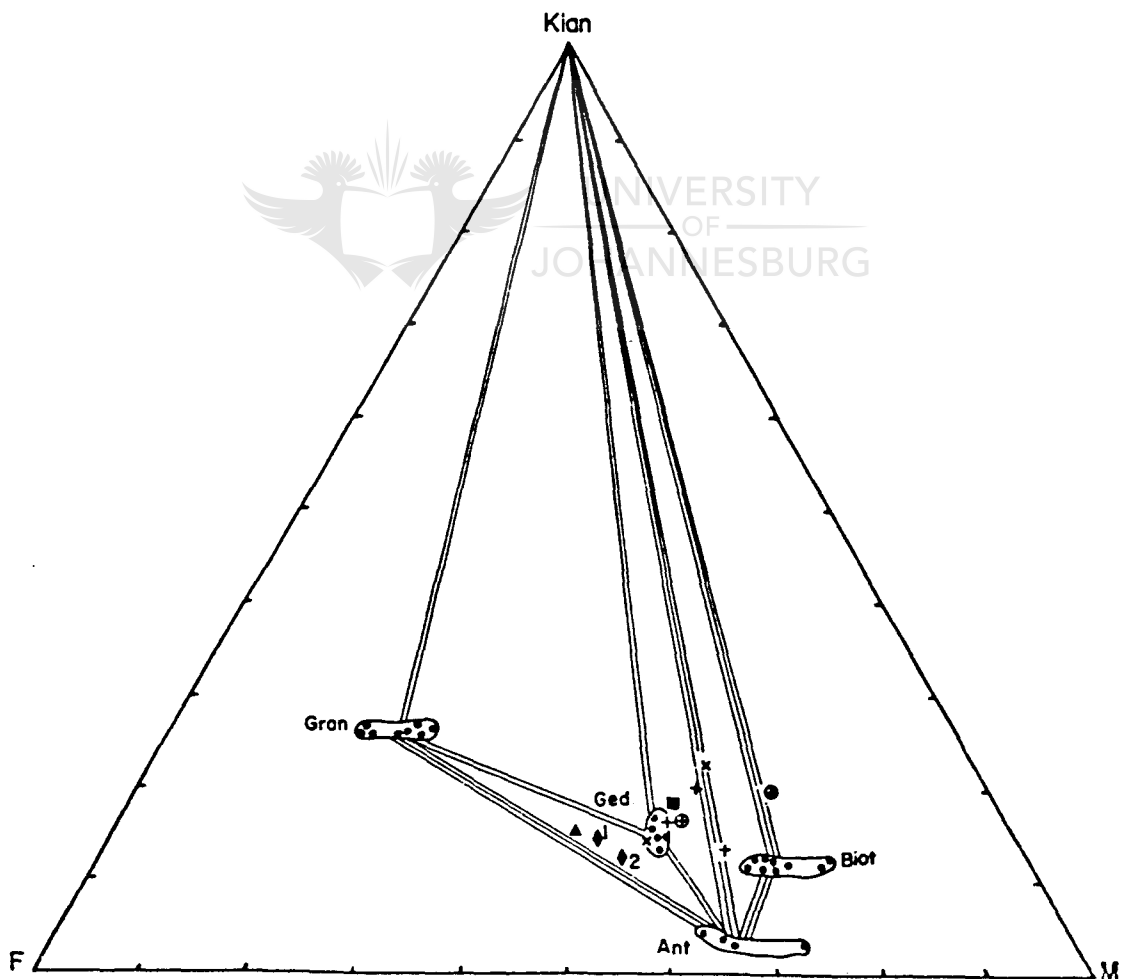
Die detail ondersoek van faseverwantskappe in die ortoamfiboolgneisse word egter deur verskeie probleme beperk waarvan die volgende die belangrikste is:

- (i) Bo en behalwe die gebrek aan voldoende petrografiese en chemiese inligting as gevolg van swak dag-some is die belangrikste beperking gekoppel aan die petrografiese onderskeid tussen antofilliet en gedriet. Hierdie twee minerale kan gewoonlik slegs positief geïdentifiseer word indien mikrosonde analyses beskikbaar is (Afd. VI-1.5.6). In die afwesigheid van voldoende chemiese inligting kan daar nie altyd met sekerheid vasgestel word of 'n spesifieke monster werklik slegs een ortoamfibool bevat nie aangesien addisionele mikrosonde analyses geredelik die teenwoordigheid van 'n tweede ortoamfibool kan bevestig. Hierdie probleem is veral ter sprake indien die tweede ortoamfibool byvoorbeeld slegs in klein hoeveelhede teenwoordig sou wees.
- (ii) Die tweede probleem is gekoppel aan die beperkte inligting in verband met die stabiliteitsverwantskappe van antofilliet en gedriet. Hierdie probleem is reeds na verwys (Afd. VI-1.5) en word later in hierdie afdeling meer volledig bespreek.
- (iii) Die algemene teenwoordigheid van vier ferro-magnetiese minerale in een gesteente skep 'n verdere probleem. Sommige mineraalversamelings word byvoorbeeld deur die teenwoordigheid van granaat, antofilliet, gedriet, biotiet en kianiet gekenmerk. Al die minerale in hierdie versameling kan, op grond van beperkings wat deur die fasereël gestel word, nie sondermeer as 'n stabiele assosiasie in die AKFM-sisteem beskou word nie. Petrografiese en chemiese inligting is egter 'n aanduiding dat granaat en ortoamfibool nie stabiel in die teen-

woordigheid van biotiet is nie (Afd. IV-1.1.3.1). Die stabiliteitsverwantskappe van eersgenoemde minerale word later in hierdie afdeling meer volledig bespreek.

3.1 ALGEMENE FASEVERWANTSKAPPE VIR ORTOAMFIBOOL

Die Algemene fase-topologie vir die ortoamfiboolgneisse word in die AFM-diagram van figuur 74 geïllustreer. Al-antofieliet is nie in hierdie figuur voorgestel nie. Die chemiese samestelling van die gesteentes word ook in hierdie diagram voorgestel.



Figuur 74 AFM-diagram (projeksie deur K/vs) wat die algemene faseverwantskappe in die ortoamfiboolgneisse van die Ortoamfiboolsonne illustreer.
 ▲ = gran-ged (DR 184); + = (gran)-ant-ged-kian-biot (DV 43, DV 53, DV 2); ⊕ = ant-ged-biot-kian (DV 1, DV 22); ■ = gran-ant-kian-biot (DV 23); × = gran-ged-biot (DV 47, M 447). ♦¹ en ♦² is onderskeidelik DV 34 en DV 38 (gran-hip-ant-biot) van die Ortopirokseenisograad.

Dit is met verwysing na figuur 74 duidelik dat al die minerale nie saam 'n stabiele assosiasie in een gesteente onder willekeurig gespesifiseerde toestande van P,T en μ_{H_2O} kan vorm nie. Die algemene faseverwantskappe in figuur 74 is egter 'n aanduiding dat die vier 3-faseversamelings (wat deur die sub-driehoek gedefinieer word) wel algemeen in gesteentes met geskikte chemiese samestellings verwag kan word.

Die waargenome mineraalversameling in die Ortoamfiboolsonne is egter meer kompleks as wat in figuur 74 weergegee word. Dit word geïllustreer deur die waarneming dat biotiet baie algemeen in kontak met gedriet of granaat waargeneem word. Die volledige faseverwantskappe in hierdie gesteentes behoort dus in die AKFM-volume van die tetraëder geïnterpreteer te word.

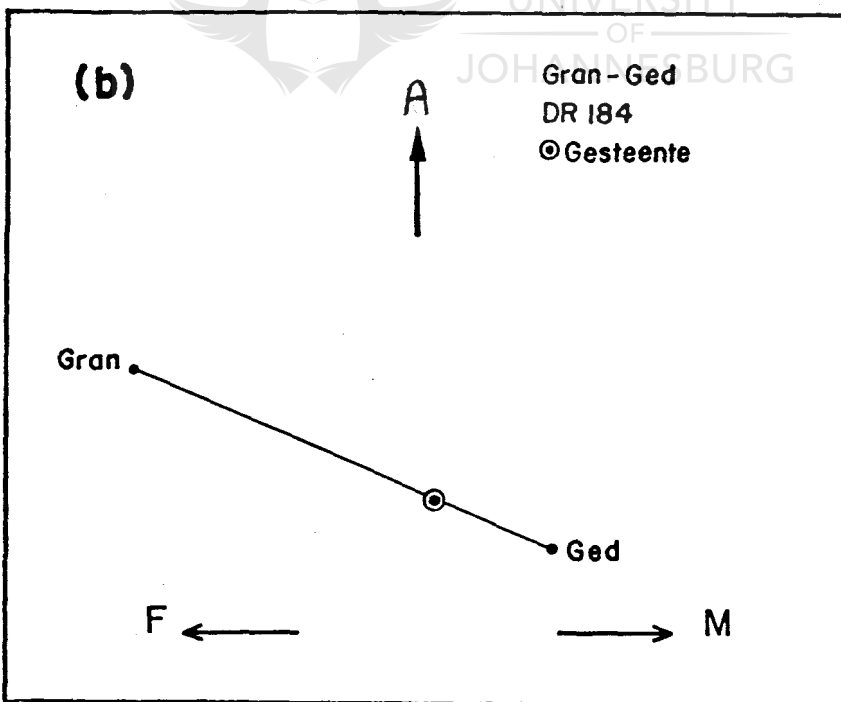
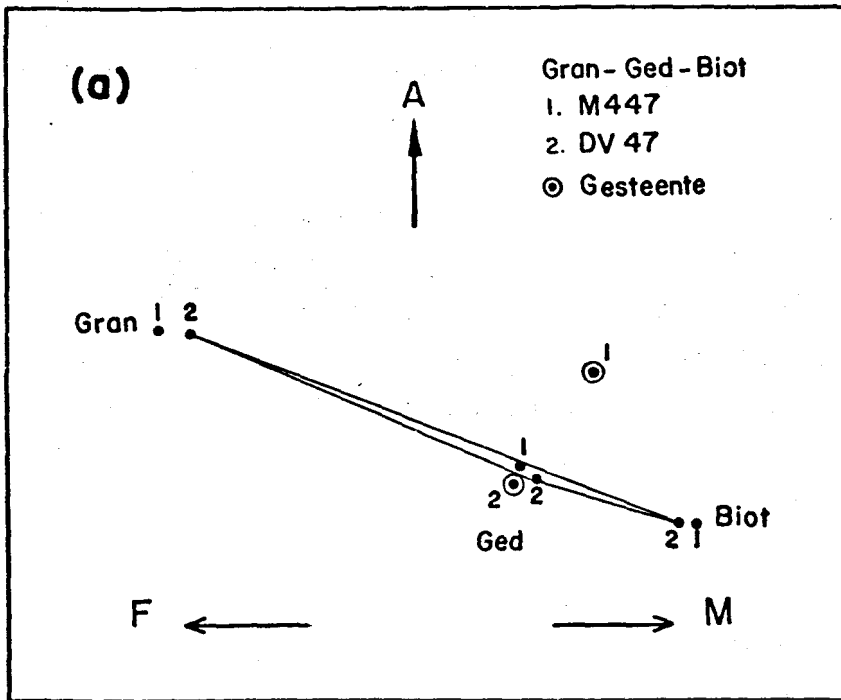
Die volgende mineraalversamelings is verteenwoordigend van die ortoamfiboolgneisse in die gebied onder bespreking. Kwarts en plagioklaas is addisionele fases in al die versamelings, behalwe die eerste versameling wat geen plagioklaas bevat nie:

- (i) granaat-gedriet-kwarts (DR 184)
- (ii) granaat-gedriet-biotiet (DV 47, M 447)
- (iii) granaat-gedriet-antofilliet-biotiet-kianiet (DV 43)
- (iv) gedriet, antofilliet-biotiet-kianiet (DV 1, DV 22)
- (v) granaat-antofilliet-biotiet-kianiet (DV 23)
- (vi) granaat-Al-antofilliet-gedriet-biotiet-kianiet (DV 53)
- (vii) granaat-Al-antofilliet-biotiet-kianiet (DV 2).

Monsters waarvoor totale- en enkelmineraal chemiese inligting beskikbaar is word in hakies by elke versameling aangedui. Daar moet in gedagte gehou word dat granaat waarskynlik slegs in die eerste versameling stabiel is, en ook

dat die identifikasie van slegs een ortoamfibool in die tweede, vyfde en sewende versamelings twyfelagtig is. Voordat die stabiliteitsverwantskappe van granaat en ortoamfibool in bogenoemde versamelings bespreek word is dit belangrik om eers vas te stel of die konstruksie van die AFM-diagram (Afd. VIII-1.3) geskik is om die faseverwantskappe in die ortoamfiboolgneisse ook voldoende te definieer. Twee versamelings, naamlik granaat-gedriet (DR 184) en granaat-gedriet-biotiet (DV 47, M 447) kan as basis vir hierdie doel gebruik word. Die faseverwantskappe vir hierdie twee versamelings word skematies in figuur 75 geïllustreer.

Die versameling granaat+gedriet+biotiet in figuur 75a kan slegs as 'n stabiele versameling in gesteentes met 'n baie beperkte chemiese samestelling verwag word. Die een gesteente (DV 47) plot baie naby aan hierdie beperkte 3-faseveld, terwyl die posisie van die tweede monster (M 447) grootliks afwyk. Die rede vir hierdie afwyking is onduidelik omdat M 447 geen kianiet bevat nie en mineralogies identies is aan DV 47. Bogenoemde toets is waarskynlik in elk geval nie aanvaarbaar nie omdat granaat in die eerste plek moontlik nie in ewewig met gedriet is nie, terwyl daar tweedens nie met sekerheid aanvaar kan word dat gedriet die enigste ortoamfibool in hierdie gesteentes verteenwoordig nie. 'n Meer aanvaarbare bewys vir die toepaslikheid van die AFM-konstruksie vir die voorstelling van faseverwantskappe in die ortoamfiboolgneisse word egter deur die versameling granaat+gedriet in figuur 75b gegee. Hierdie gesteente (DR 184) bestaan uit granaat, gedriet en kwarts, en die identifikasie van slegs een ortoamfibool kan met 'n groot mate van sekerheid aanvaar word (Afd. VI-1.5.6). Die chemiese samestelling van hierdie gesteente stip presies op die verbindingslyn tussen granaat en gedriet in figuur 75b. Die feit dat gedriet as 'n Na_2O -vrye mineraal in die AFM-diagram voorgestel kan word het dus blykbaar geen noemenswaardige invloed op die faseverwantskappe van ortoamfibool in hierdie sisteem nie.



Figuur 75a en b Skematiese voorstelling van die verwantskap tussen die chemiese en mineralogiese samestelling van monsters M 447 en DV 47 (Fig. a) en monster DR 184 (Fig. b). Die diagramme is korrek georiënteer ten opsigte van die A- en M-koördinate van die AFM-diagram.

3.2 DIE STABILITEITSVERWANTSKAPPE VAN GRANAAT IN DIE ORTOAMFIBOOLGNEIS

Die byna alomteenwoordigheid van klein hoeveelhede granaat in die ortoamfiboolgneisse van die Ortoamfiboolsone skep 'n probleem in soverre dit die interpretasie van die faseverwantskappe in hierdie gesteentes betref. Sommige van die granaatryke ortoamfiboolgneisse vertoon geen opvallende tekens van reaksieverwantskappe tussen granaat en enige ander mineraal nie en gevolglik kan die stabiliteitsverwantskappe van granaat nie altyd maklik op petrografiese gronde ge-evalueer word nie. Die volgende petrografiese en chemiese inligting is egter 'n goeie aanduiding dat granaat en ortoamfibool moontlik nie stabiel is in gesteentes wat ook biotiet bevat nie.

3.2.1 Petrografiese inligting

Die ortoamfiboolgneisse is reeds petrografies beskryf (Afd. IV-1.1.3.1 en 1.2.3) en slegs die belangrikste aspekte van hierdie ondersoek word hier opgesom:

- (i) Granaat word uiters selde of nooit in direkte kontak met antofilliet of gedriet in gesteentes waargeneem wat ook biotiet bevat nie. Hierdie waarneming is onafhanklik van die teenwoordigheid of afwesigheid van kianiet. Die enigste gesteente (DR 184) waarin granaat en gedriet wel 'n opvallende stabiele assosiasie vorm bevat egter geen biotiet, kianiet of plagioklaas nie. Granaat in die biotietryke ortoamfiboolgneisse besit in die algemeen ook 'n relikagtige voorkoms wat 'n verdere aanduiding van die onstabiele karakter van die mineraal in hierdie gesteentes is. Die res van die minerale, insluitende kianiet, gedriet en

antofilliet, word algemeen in onderlinge kontak waargeneem.

- (ii) Die teenwoordigheid van antofilliet, kianiet en gedriet in die Ortoamfiboolzone is direk gekoppel aan die hidrasie van kordieriet en hipersteen langs die M_3 -Ortopirokseenreaksie-isograad (Afd. IV-1.2.2). Hierdie hidrasie-reaksie is duidelik afgedruk op chemies identiese versamelings uit die M_2 -Ortopirokseenzone (Fig. 14c). Die mees opvallende eienskap van laasgenoemde gesteentes is egter die deurlopende reaksieverwantskap tussen granaat, hipersteen en kordieriet waartydens granaat effektief uit die gesteente verwyder word (Fig. 11). Die volledige verloop van hierdie deurlopende reaksie sal dus aanleiding gee tot die totale verdwyning van granaat uit die granaatgranoliet. Granaat in chemies ekwivalente gesteentes van die Ortoamfiboolzone kan dus geredelik as relikte van die ooreenstemmende M_2 -granolietversamelings beskou word.

3.2.2 Chemiese inligting

- (i) Die verstrooiing van verdelingspunte in verdelingsdiagramme vir granaat-antofilliet en granaatgedriet (Fig. 58b) is 'n aanduiding dat granaat nie in ewewig is met ortoamfibool nie. In teenstelling hiermee is soortgelyke inligting vir antofilliet-gedriet 'n goeie aanduiding dat hierdie twee minerale wel in chemiese ewewig is (Fig. 57). Dieselfde geld tot 'n mindere mate ook vir ortoamfibool-biotiet (Fig. 58a).
- (ii) Die chemiese samestelling van die biotietryke ortoamfiboolgneisse stip sonder uitsondering regs van die verbindingslyne tussen gedriet en kianiet

en gedriet en antofilliet in die AFM-diagram van figuur 74. Die enkele uitsondering is DR 184 wat egter, soos reeds genoem, geen biotiet of kianiet bevat nie.

Die beskikbare chemiese en petrografiese inligting ondersteun dus die voorstel dat granaat nie stabiel is in assosiasie met ortoamfibool in gesteentes wat ook biotiet en kianiet bevat nie. Bogenoemde inligting is egter beperk tot die laer-graadse ekwivalente van die kordiëriet-granaatgranoliete (Fig. 63) en gevolglik is dit moontlik dat granaat, ortoamfibool en biotiet wel stabiel kan wees in gesteentes wat oorspronklik geen kordiëriet bevat het nie (dit wil sê die kordiërietvrye granaatgranoliete, Fig. 63). Voorbeelde van laasgenoemde gesteentetipes is egter nie in die Ortoamfiboolsone beskikbaar nie. Dit kan toegeskryf word aan swak dagsone in laasgenoemde sone, asook die feit dat die kordiërietvrye granaatgranoliete in elk geval 'n baie ondergeskikte verspreiding in die Ortopirokseenzone besit (Fig. 17). Chemiese ekwivalente gesteentes is egter wel langs die Ortopirokseenisograad geïdentifiseer (DV 38 en DV 34, Fig. 17), en hierdie gesteentes illustreer duidelik dat die verdwyning van hipersteen aanleiding sal gee tot die stabiele assosiasie van granaat, antofilliet en biotiet in die Ortoamfiboolsone.

Dit is interessant om daarop te let dat DV 38 en DV 34 geen gedriet bevat nie, en links van die verbindingslyn tussen gedriet en kianiet in figuur 74 stip.

3.3 STABILITEITSVERWANTSKAPPE VAN ANTOFILLIET, GEDRIET EN KIANIET

Die stabiliteitsverwantskappe van bogenoemde minerale word deur beide die chemiese samestelling van die ortoamfiboolgneisse en die metamorfe ontwikkeling van die gebied beheer.

Gedriet en kianiet ontwikkel as gevolg van die hidrasie van kordiëriet langs die Ortopirokseenreaksie-isograad (Fig. 14) en gevolglik is die teenwoordigheid van hierdie minerale in die Ortoamfiboolsone direk gekoppel aan die teenwoordigheid of afwesigheid van kordiëriet in die Ortopirokseensone. Die stabiliteitsverwantskappe van kordiëriet in laasgenoemde sone is reeds volledig bespreek en die volgende drie hoof-tipes granaatgranoliete is chemies gedefinieer (Fig. 63):

- (i) kordiërietyrre granaatgranoliete ($M/F < 0,59$) - Groep 1
- (ii) kordiëriet-granaatgranoliete ($M/F : 0,59$ tot $0,70$) - Groep 2
- (iii) granaatvrye kordiërietgranoliete ($M/F > 0,70$) - Groep 3

Die ortoamfiboolgneisse kan chemies op presies dieselfde wyse by bogenoemde onderverdeling ingeskakel word, naamlik:

- (i) granaat-antofillietgneisse (geen gedriet of kianiet) $M/F < 0,59$) - Groep 1
- (ii) (granaat)-antofilliet-gedriet-kianietgneisse (granaat onstabiel) $M/F: 0,59$ tot $0,70$) - Groep 2
- (iii) antofilliet-gedriet-kianietgesteentes (granaat afwesig) $M/F > 0,70$) - Groep 3

Bogenoemde onderverdeling van die granaatgranoliete en chemies ekwivalente ortoamfiboolgneisse is reeds in figuur

63 geïllustreer. Die Groep 1 gesteentes word nie in die Ortoamfiboolsonne verteenwoordig nie maar kan, soos reeds genoem, uit chemies ekwivalente gesteentes langs die Ortopirokseenisograad afgelei word (DV 34 en DV 38, Tabel 8).

Die beskikbare inligting is dus 'n aanduiding dat die stabiliteitsverwantskappe van antofilliet en gedriet ook deur die chemiese samestelling van die gesteentes beheer word. Die teenwoordigheid of afwesigheid van kordiëriet (wat gekoppel is aan beide die chemiese samestelling en metamorfe ontwikkeling) speel die belangrikste rol in die gebied onder bespreking, maar is natuurlik nie die enigste bepalende faktor wat die teenwoordigheid van gedriet beheer nie. Die volgende basiese chemiese beperkings moet hier ook in aanmerking geneem word:

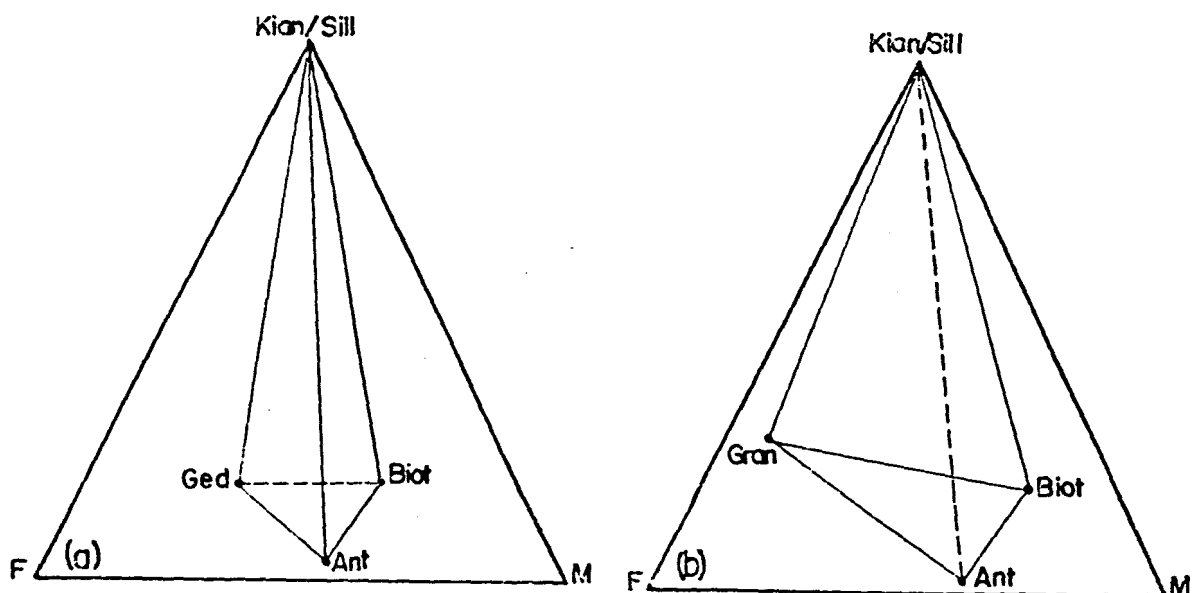
- (i) Die K_2O -inhoud van die gesteentes moet baie laag wees sodat die oormaat MgO , FeO en Al_2O_3 , wat nie in biotiet verbind is nie, beskikbaar is om gedriet en antofilliet te vorm.
- (ii) Die CaO en Na_2O -inhoud van die gesteentes moet ook laag wees anders sal minerale soos hornblende en 'n Na-ryke amfibool in die plek van gedriet vorm.

3.4 VOLLEDIGE FASETOPOLOGIE VIR DIE CaO - EN K_2O -ARME ORTOAMFIBOOLGNEISSE VAN DIE ORTOAMFIBOOLSONNE

Die poging om 'n meer volledige fasiestipe vir die ortoamfiboolgneisse in die gebied onder bespreking te definieer is nie baie realisties indien die beperkte inligting in aanmerking geneem word nie. Die Ortoamfiboolsonne besit egter 'n groot verspreiding in die gebied onder bespreking (Fig. 2), en gevolglik kan die inligting uit hierdie ondersoek 'n bydrae lewer tot die algemene stabiliteitsverwantskappe van hierdie minerale in soortgelyke hoë-gradse metamorfe

terreine.

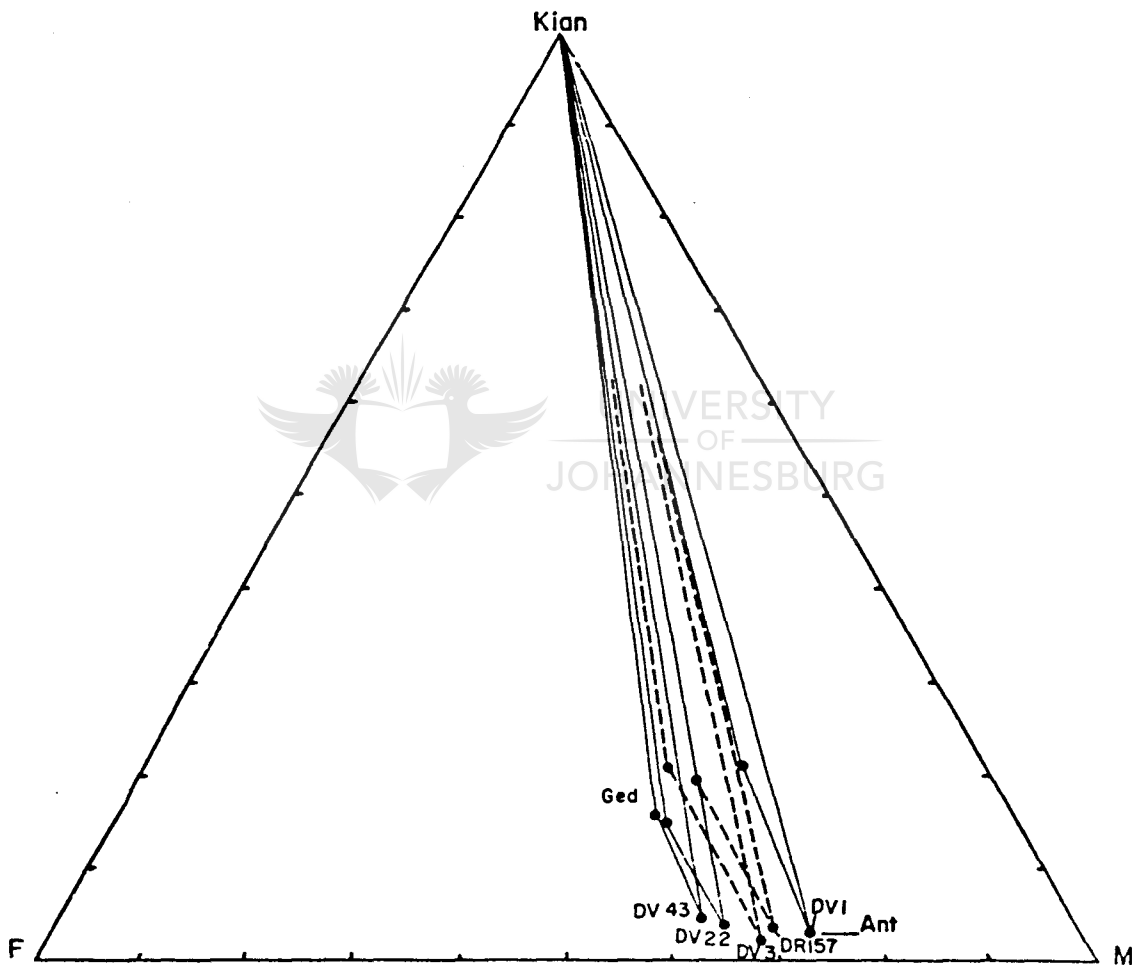
Die inligting uit die vorige afdelings is 'n goeie aanduiding dat die teenwoordigheid of afwesigheid van gedriet die bepalende faktor is in 'n poging om die faseverwantskappe in die ortoamfiboolgneisse te verklaar. Die chemiese inligting is 'n aanduiding dat gedriet beperk is tot gesteentes wat oorspronklik kordiëriet bevat het en wat dus regs van die verbindingslyn tussen gedriet en kianiet in die AFM-diagram van figuur 74 stip. Die enkele uitsondering is DR 184 wat egter geen biotiet bevat nie, en wat chemies ook grootliks van die res van die gesteentes verskil (Fig. 74 en Tabel 7e). Die beste benadering tot 'n volledige fasiestipe vir die ortoamfiboolgneisse is dus om gebruik te maak van twee fase-diagramme, een met gedriet en een sonder gedriet. Eersgenoemde diagram (Fig. 76a) is dus van toepassing op gesteentes wat regs van die gedriet-kianietverbindingslyn in figuur 74 stip terwyl laasgenoemde diagram (Fig. 76b) weer van toepassing is op gesteentes wat links van hierdie verbindingslyn stip.



Figuur 76a en b Skematiese voorstelling van faseverwantskappe in gedrietryke en granaatryke ortoamfiboolgneisse (Fig. a), en gedrietvrye en granaatryke ortoamfiboolgneisse (Fig. b).

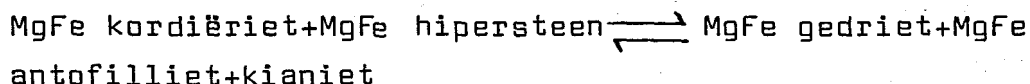
3.5 VERPLASING VAN DIE GEDRIET-ANTOFILLIET-KIANIET 3-FASEVELD MET DOORGANG VANAF DIE ORTOPIROKSEENISOGRAAD NA DIE ORTOAMFIBOOLSONE

Die relatiewe posisie van bogenoemde 3-fasevelde vir gesteentes langs die Ortopirokseenisograad en in die Ortoamfiboolsone word in die AFM-diagram van figuur 77 geïllustreer.



Figuur 77 AFM-diagram (projeksie deur K/vs) wat die verplasing van die gedriet-antofilliet-kianiet 3-faseveld in die rigting van F met oorgang van die Ortopirokseenisograad na die Ortoamfiboolsone illustreer. DV 3 en DR 157 = Ortopirokseenisograad; DV 43, DV 22 en DV 1 = Ortoamfiboolsone.

Dit is duidelik dat die samestellingsvelde van beide antofilliet en gedriet meer Fe-ryk word met 'n afname in die graad van metamorfose. Sodra bogenoemde minerale dus langs die isograad stabiel word vind die verplasing van die drie-fasevelde plaas as gevolg van die volgende deurlopende reaksie:



Die produkte en uitgangstowwe van bogenoemde reaksie is stabiel binne 'n beperkte PT-interval in die onmiddellike omgewing van die isograad. Kordiëriet en hipersteen verdwyn dus gou as gevolg van bogenoemde reaksie en dit gee aanleiding tot die stabiele assosiasie van antofilliet, gedriet, kianiet (en biotiet) binne die Ortoamfiboolsone.

Die invloed van die chemiese samestelling van die gesteentes op die samestelling van die minerale in bogenoemde 3-fase-versamelings kan ook aan die hand van figuur 77 geïllustreer word. DV 1 (uit die Ortoamfiboolsone) bevat geen granaat, en beide antofilliet en gedriet in hierdie gesteente is opvallend meer Mg-ryk as selfs in die geval van die granaat-ryke gesteentes langs die Ortopirokseenisograad (DV 3 en DR 157). Hierdie waarneming is presies in ooreenstemming met wat in die geval van die chemies ekwivalente granaatvrye kordiëriet-granoliete uit die Ortopirokseensone gevind is (Fig. 67).

AFDELING 1X
CHEMIESE ONDERSOEK
VAN
KRITIESE METAMORFE
REAKSIES IN DIE
PELITIESE GNEIS
 **VAN DIE** UNIVERSITY
OF ANNESBURG
BANDELIERKOP-FORMASIE

1. INLEIDING

Die Limpopo-metamorfe kompleks suid van die Soutpansberg word deur 'n komplekse polimetamorfe ontwikkeling gekenmerk wat in terme van ten minste drie opeenvolgende periodes van metamorfose beskryf kan word. Petrografiese bewyse vir hierdie voorgestelde metamorfe ontwikkeling en die geassosieerde metamorfe reaksies in beide die Ortopirokseensone- en Ortoamfiboolsones is reeds volledig bespreek (Afd. IV-1.2 en Tabel 6). Die probleme gekoppel aan die identifikasie en beskrywing van realistiese metamorfe reaksies is ook reeds kortliks na verwys (Afd. IV-1.2). Die doel van die volgende bespreking is nie om alle moontlike reaksies in die Pelitiese gneis te ondersoek nie, maar slegs daardie reaksies wat positief op petrografiese gronde geïdentifiseer kon word en wat 'n hoofrol in die ontrafeling van die metamorfe geskiedenis van die gebied gespeel het. Vir hierdie doel word veral drie reaksies as van besondere belang beskou, naamlik die reaksie wat aanleiding gegee het tot die ontwikkeling van kordiëriet en hipersteen in die koronateksture tydens die tweede (M_2) periode van metamorfose in die Ortopirokseensone, en die hidrasie van kordiëriet en van hipersteen tydens die derde (M_3) periode van metamorfose langs die Ortopirokseensone-reaksie-isograad.

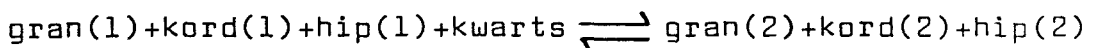
2. DIE M_2 -ORTOPIROKSEENSONE

2.1 DIE REAKSIE GRANAAT+KWARTS \rightleftharpoons KORDIËRIET+HIPERSTEEN

Die reaksie waarin granaat afbreek om kordiëriet en hipersteen te vorm verteenwoordig 'n byna perfekte voorbeeld van 'n vertraagde reaksie wat bewaar gebly het as 'n simplektitiese vergroeiing van kordiëriet en hipersteen wat koronas om granaat vorm (Fig. 11). Hierdie koronateksture

is in een of ander vorm in meer as 90 persent van al die monsters geïdentifiseer en skep dus 'n ideale geleentheid om die reaksie wat vir die ontwikkeling van hierdie teksture verantwoordelik is uit 'n kwantitatief oogpunt te ondersoek. Elke individuele korona verteenwoordig 'n oorspronklike granaatkristal, en in baie gevalle kan selfs die buitelyne van hierdie oorspronklike kristal steeds waargeneem word (Fig. 11b). Die teksture van hierdie koronas is 'n aanduiding dat slegs kordiëriet, granaat en hipersteen 'n hoofrol in die reaksie gespeel het en dat die ontwikkeling van kordiëriet en hipersteen nie met noemenswaardige volume veranderinge gepaard gegaan het nie. Die onversteurde voorkoms van die matriks tussen verskillende koronas is ook in ooreenstemming met bogenoemde voorstel (Afd. IV-1.2.1.1).

Die stabiliteitsverwantskappe van granaat, hipersteen en kordiëriet in hierdie koronateksture is reeds volledig bespreek (Afd. VII-2.1.1 en Afd. VIII-2.2.2), en met bogenoemde chemiese inligting as basis is dit duidelik dat hierdie drie minerale as 'n stabiele ewewigsversameling beskou kan word. Die ontwikkeling van kordiëriet en hipersteen is dus gekoppel aan 'n ware deurlopende reaksie waartydens die samestelling van al die betrokke fases deurlopend verander het as gevolg van veranderinge in die eksterne toestande van metamorfose (Fig. 66b). Hierdie reaksie kan in die volgende algemene vorm geskryf word:

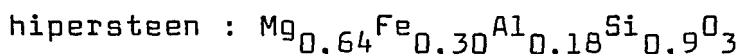
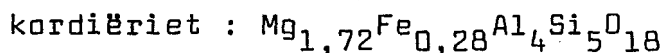
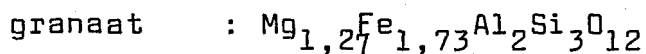


Granaat word deur die reaksie opgebruik en die laaste oorblywende granaat is steeds in ewewig met kordiëriet en hipersteen. Hierdie voorgestelde reaksie is dus in teenstelling met 'n nie-deurlopende (of nie-omkeerbare) reaksie waarin die uitgangstowwe en produkte nie in ewewig met mekaar is nie (Loomis, 1975).

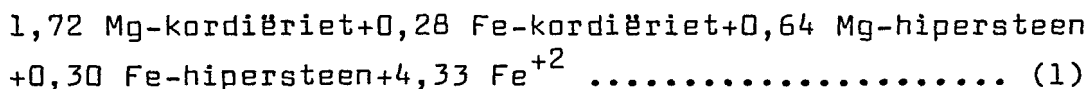
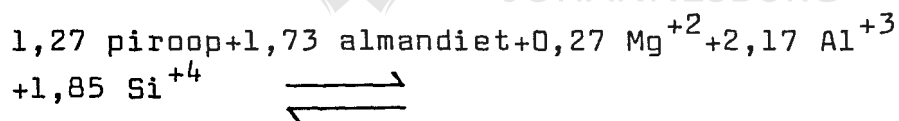
Die deurlopende reaksie in die kordiëriet-granaatgranoliete kan chemies aan die hand van enige geskikte monster onder-

soek word. Vir die doel van hierdie ondersoek is die chemiese inligting vir monster DR 54 gebruik omdat die koronateksture in hierdie monster baie duidelik omlin kan word.

Gemiddelde Ca- en Mn-vrye formules is vir al die betrokke minerale gebruik, en hierdie formules is genormaliseer tot $3 \text{ Mg} + \text{Fe}^{+2}$ vir granaat, $2 \text{ Mg} + \text{Fe}^{+2}$ vir kordiëriet en $1 \text{ Mg} + \text{Fe}^{+2}$ vir aluminiumryke hipersteen. Die volgende formules is dus gebruik (Tabelle 11a, 13a en 18a).



Indien bogenoemde koëffisiënte vir die drie minerale gebruik word kan die volgende eenvoudige reaksie as 'n eerste benadering geskryf word:



Hierdie reaksie is nie realisties nie maar illustreer duidelik dat dit nie moontlik sal wees om 'n gebalanseerde reaksie tussen bogenoemde fases te skryf nie. Dit is so omdat Mg toegevoeg en Fe verwyder moet word.

'n Meer realistiese benadering is om die reaksie in 'n vorm te skryf wat in ooreenstemming is met die volumetiese verhouding waarin kordiëriet en hipersteen in die koronateksture ontwikkel het. In 'n poging om vas te stel of kordiëriet en hipersteen wel in 'n konstante en voorspelbare verhouding in hierdie teksture ontwikkel is drie verteenwoordigende monsters vir detail volumetriese analyses uitgesonder. Die

een monster (DV 56) word deur talle (meer as 15 per slypplaatjie) individuele koronas gekenmerk, terwyl die ander twee monsters (DR 54 en DR 59) elk slegs een goed-gedefinieerde korona bevat. Chemiese inligting is nie vir monster DV 56 beskikbaar nie, maar wel vir monsters DR 54 en DR 59.

Die volgende metode is gebruik om die mees akkurate volumetriese waardes te verseker: 'n Mikrofotomosafek is eerstens vir elke individuele korona voorberei. Hierdie saamgestelde fotomosafek is vervolgens op deursigtige papier oorgetrek en die punttellings is met behulp van grafiekpapier met 'n 1 mm skaal gedoen. Die metode is tydrowend maar verseker dat elke moontlike punt akkuraat gestel kan word. In die geval van monster DV 56 is vier verskillende koronas in een slypplaatjie op hierdie manier geanaliseer. Die hoeveelheid granaat verskil grootliks van een korona na 'n ander in hierdie monster, maar hierdie variasie kan waarskynlik toegeskryf word aan die feit dat slegs 'n tweedimensionele beeld van die teksture in 'n slypplaatjie beskikbaar is. Die resultate van hierdie ondersoek word in tabel 49 opgesom.

Tabel 49 Volumetriese analise (volume persent) vir kordiëriet, granaat en hipersteen in koronateksture van monsters DV.56, DR.54 en DR.59

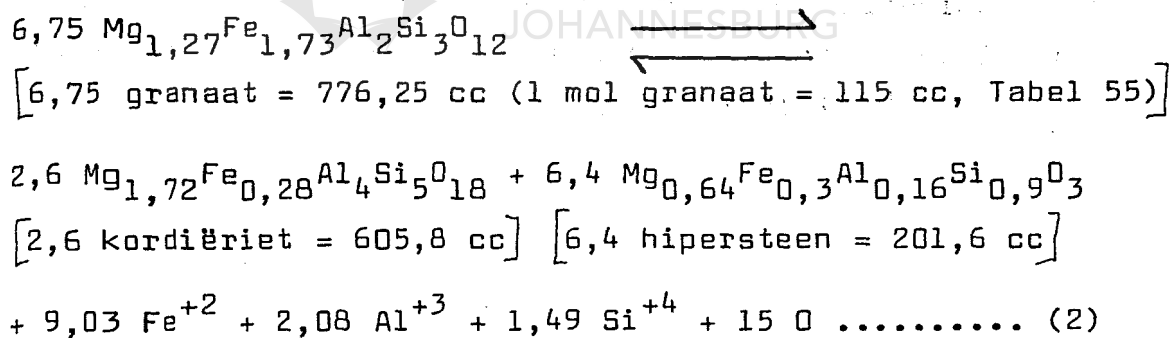
Monster	Hipersteen	kordiëriet	granaat	verh. van kord. tot hip.	Totale tellings
DV.56					
a	22,90	64,70	12,40	2,83	4350
b	23,70	67,90	8,40	2,87	3427
c	27,0	72,20	0,80	2,67	2720
d	25,30	74,70	-	2,95	1638
DR.54	38,60	56,50	4,9	1,46	6250
DR.59	33,90	53,80	12,3	1,59	4091

Dit is met verwysing na tabel 49 duidelik dat kordiëriet en hipersteen in monster DV 56 wel in 'n konstante volumetriese verhouding in die verskillende koronas teenwoordig is. Die verhouding van kordiëriet tot hipersteen in monsters DR 54 en DR 59 verskil wel van dié in monster DV 56, maar is onder-

ling baie dieselfde. Aangesien mikrosonde analises nie vir monster DV 56 beskikbaar is nie word 'n gemiddelde volumetriese verhouding van 60:40 vir kordiëriet tot hipersteen in monsters DR 54 en DR 59 uit tabel 49 vir die res van hierdie bespreking gebruik.

Die reaksiekoëffisiënte vir kordiëriet en hipersteen in reaksie 2 is dus op bogenoemde volumetriese verhouding, en 'n volume van 233 cm³ vir kordiëriet, en 31,5 cm³ vir hipersteen gebaseer (Tabel 55, Afd. X-3). Die reaksie is verder op die aanname gebaseer dat al die beskikbare Mg in granaat gebruik is om kordiëriet en hipersteen te vorm. Hierdie aanname is aanvaarbaar aangesien beide kordiëriet en hipersteen Mg-ryke minerale is.

Die volgende reaksie kan dus moontlik die ontwikkeling van die koronateksture in die kordiëriet-granaatgranoliete verklaar:



Die volumeverandering (ΔV) vir die kristallyne fases in bogenoemde reaksie is slegs + 4%. Hierdie klein verskil in volume tussen die produkte en uitgangstowwe is in ooreenstemming met die tekstorele inligting wat 'n aanduiding is dat die reaksie nie met enige noemenswaardige volumeverandering gepaard gegaan het nie.

Die Ca- en Mn-inhoud van granaat is nie by bogenoemde reaksie in berekening gebring nie. Granaat bevat onderskeidelik slegs 2,9 en 1,6 mol persent grossulariet en spessartiet (Tabel 13a) wat egter steeds in oormaat is omdat

kordiëriet en hipersteen baie min Ca^{+2} en Mn^{+2} bevat.

Die volgende algemene gevolgtrekkings kan met verwysing na reaksie 2 gemaak word:

- (i) Geen elemente is tot die reaksie toegevoeg nie en silika (kwarts) is dus nie vanselfsprekend as 'n uitgangstof betrokke nie.
- (ii) Die reaksie kan nie in 'n gebalanseerde vorm geskryf word nie. Dit geld veral vir Fe^{+2} , Si^{+4} en Al^{+3} is egter ook in oormaat, en al hierdie elemente moet op een of ander manier van die reaksiepunt verwyder word.
- (iii) Die ontwikkeling van die koronateksture is dus nie 'n iso-chemiese proses nie, en gevolglik moet die volume van hierdie teksture as oop-sisteme beskou word. Hierdie gevolgtrekking is in ooreenstemming met die ontwikkeling van ander koronateksture wat in die literatuur beskryf word. Kwak (1974, p. 77) het byvoorbeeld na aanleiding van 'n detail chemiese en teksturele ondersoek van koronateksture, waarin stouroliet deur verskillende minerale vervang word, tot die gevolgtrekking gekom dat realistiese reaksies slegs vir individuele teksture geskryf kan word, en dan ook slegs indien hierdie teksture as oop-sisteme beskou word. Dieselfde geld vir die ontwikkeling van koronateksture waarin granaat deur plagioklaas, biotiet en hornblende vervang word (Misch en Onyeagocha, 1976), asook die reaksie $2 \text{ granaat} + 5 \text{ kwarts} + 4 \text{ sillimaniet} \rightleftharpoons 3 \text{ kordiëriet}$ (Hollister, 1977).
- (iv) Die konstante samestelling van kordiëriet en hipersteen in verskillende koronateksture in dieselfde slypplaatjies (Tabelle 12c en 19) is 'n aanduiding dat die onderskeie teksture dieselfde ewewigstoestand definieer. Dieselfde geld ook vir kordiëriet en hipersteen wat nie met die koronas geassosieer

is nie. Die minerale in die koronateksture is dus ook in ewewig met soortgelyke minerale in die matriks van die gesteente.

Die oormaat silika in reaksie 2 skeep nie 'n groot probleem nie en kan deur die teenwoordigheid van druppelvormige insluitels van kwarts in kordiëriet verklaar word (Fig. 9c). Aluminium skeep egter 'n probleem omdat die gesteentes geen geskikte Al-ryke mineraal bevat wat die oormaat aluminium kon opneem nie. Hierdie element is dus waarskynlik uit die gesteente verwyder. Dit beteken dat Al^{+3} as 'n mobiele komponent beskou moet word. Dit is in ooreenstemming met die voorstel van Kwak (1974, p. 76), maar in teenstelling met dié van Carmichael (1969). Die oormaat Fe^{+2} skeep egter die grootste probleem. Die kordiëriet-granaatgranoliete word deur die relatiewe afwesigheid van yster-oksiedes gekenmerk (Tabel 2). 'n Mineraal soos biotiet kon ook nie die oormaat Fe^{+2} opgeneem het nie omdat die Fe-inhoud van biotiet, wat algemeen as insluitels in die koronateksture teenwoordig is, nie so opvallend verskillend is van biotiet in die res van die gesteente nie (Tabel 23).

Die moontlikheid dat reaksie 2 met die ontwikkeling van 'n smeltfase gepaard gegaan het is hier nie in aanmerking geneem nie. Die migmatitiese karakter van die granaatgranoliet is egter 'n aanduiding dat hierdie gesteentes wel gedeeltelike smelting ondergaan het en dat die leukokratiese are en liggame (Fig. 3 en 5) die smeltprodukte van hierdie proses verteenwoordig (Afd. 11-2.3). Die leukokratiese materiaal bevat soms klein hoeveelhede sillimaniet, terwyl hipersteen en granaat veral naby die kontak met die granaatgranoliet gekonsentreer is. In die geval van 'n smeltreaksie moet biotiet as 'n uitgangsfase betrek word en gevolglik is dit moontlik dat reaksie 2 'n baie meer komplekse meganisme het as wat hier voorgestel is. Dit verander egter nie die

feit dat reaksie 2 in 'n oop-sisteem plaasgevind het en steeds realisties in terme van slegs drie kristallyne fases ondersoek kon word nie.

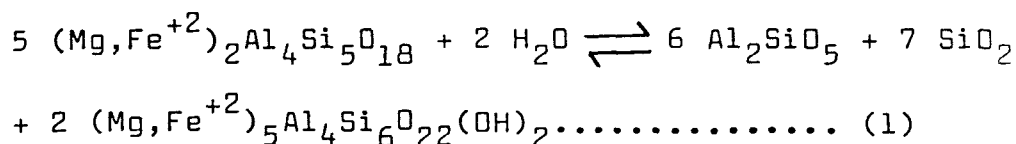
3. DIE ORTOPIROKSEENREAKSIE-ISOGRAAD

Hidrasiereaksies waarby kordiëriet en hipersteen betrokke is definieer die oorgang van die tweede na die derde periode van metamorfose (Afd. IV-1.2.2). Hierdie reaksies is beperk tot die onmiddellike omgewing van die Ortopirokseens-reaksie-isograad (Fig. 14a) alhoewel aanvanklik tekens van hidrasie soms ook in die kordiëriet-granaatgranoliete van die Ortopirokseensone waargeneem kan word (Fig. 13b en c).

Die hidrasie van kordiëriet is natuurlik beperk tot die kordiërietryke granoliete, terwyl die hidrasie van hipersteen ook in die kordiërietvrye granaatgranoliete waargeneem is.

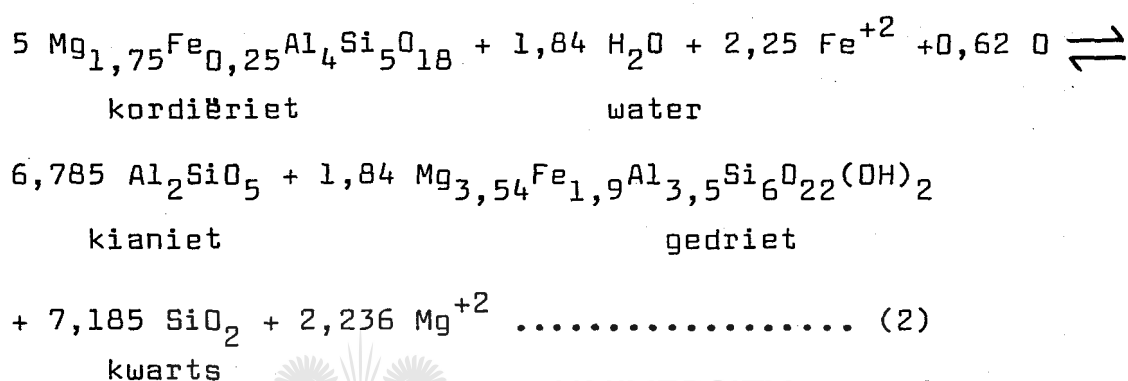
3.1 DIE REAKSIE KORDIËRIET+WATER \rightleftharpoons GEDRIET+KIANIET+KWARTS

Die volgende reaksie word algemeen in die literatuur vir die hidrasie van kordiëriet voorgestel (Hietanen, 1959; Vernon, 1972).



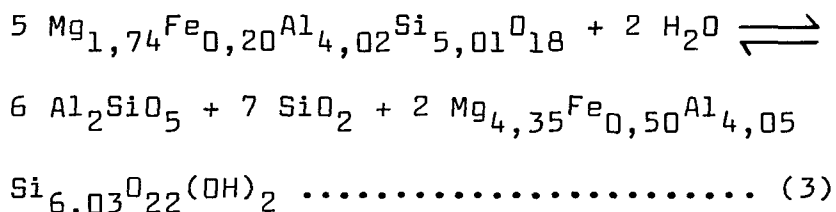
In die geval van die huidige ondersoek is chemiese analyses vir kordiëriet en die hidrasieprodukte van kordiëriet in twee monsters (DR 157 en DV 3) langs die Ortopirokseenisograad beskikbaar. Hierdie analyses word in tabelle 11b en 25b

gegee. Dit behoort dus moontlik te wees om reaksie 1 in 'n meer akkurate vorm te skryf. Vir hierdie doel is chemiese analises vir kordiëriet en gedriet in monster DR 157 gebruik. Die analises vir kordiëriet (Tabel 11b) in hierdie monster is herbereken op 'n watervrye basis van 18 suurstofatome, terwyl die analises vir gedriet (Tabel 25b) herbereken is op 'n natriumvrye basis van 23 suurstofatome. Die volgende reaksie kan nou vir die hidrasie van kordiëriet langs die Ortopirokseenisograad geskryf word:



Die chemiese inligting vir die natuurlike gesteentes is dus 'n aanduiding dat dit nie moontlik is om 'n gebalanseerde reaksie vir die hidrasie van kordiëriet in 'n vorm te skryf wat algemeen in die literatuur voorgestel word nie. Dit is verder interessant om daarop te let dat XMg (100 Mg/Mg + Fe⁺²) vir kordiëriet en gedriet in reaksie 2 onderskeidelik 87,5 en 65,0 is. Die waarneming dat kordiëriet in hierdie reaksie baie meer magnesiumryk as gedriet is, is in ooreenstemming met al die beskikbare inligting vir samebestaande kordiëriet en gedriet uit die literatuur (Lal en Moorhouse, 1969; Robinson en Jaffe, 1969a en 1969b, Robinson, Ross en Jaffe, 1971; Chinner en Fox 1974; Ramsay en Kamimeni, 1977). Reaksie 2 sou slegs gebalanseer kon word indien die volgende teoretiese samestelling vir gedriet gebruik is: (Mg_{4,76} Fe_{0,68} Al_{3,5} Si₆ O₂₂ (OH)₂). XMg vir hierdie samestelling (87,5) is egter presies dieselfde as dié vir kordiëriet in reaksie 2. Hierdie inligting is dus 'n goeie aanduiding dat reaksie 1 nie as 'n realistiese weergawe van die werklike reaksie in natuurlike gesteentes beskou kan word nie.

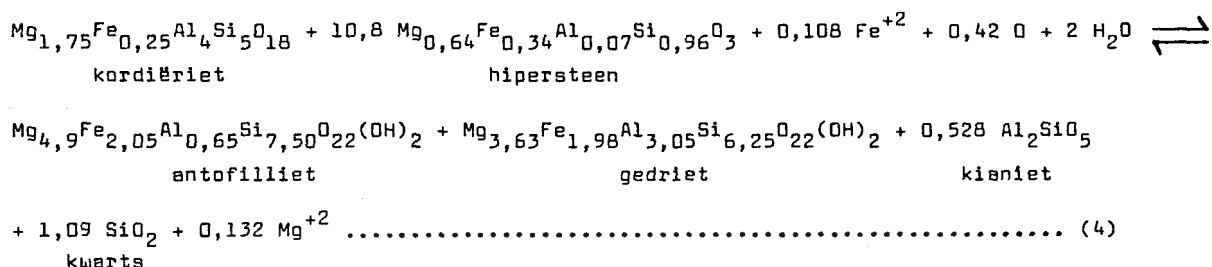
Vernon (1972) het na aanleiding van 'n detail petrografiese en chemiese ondersoek van identiese hidrasiereaksies in soortgelyke hoë-gradse metamorfe gesteentes van die Arunta kompleks in Australië die volgende reaksie vir die hidrasie van kordiëriet voorgestel:



Hierdie reaksie is in presies dieselfde vorm as reaksie 1 en is volgens Vernon (1972, p. 126) in ooreenstemming met die petrografiese inligting. Vernon gee egter nie 'n chemiese analise vir gedriet nie en maak dus gebruik van 'n teoretiese samestelling om bogenoemde reaksie te balanseer. Let daarop dat XMg vir gedriet (89,7) in reaksie 3 ook presies dieselfde is as dié vir kordiëriet - 'n situasie wat soos reeds genoem nie in ooreenstemming met hierdie ondersoek, of met gepubliseerde inligting is nie.

Die reaksie waarin kordiëriet langs die Ortopirokseenisograad hidreer om gedriet, kianiet en kwarts te vorm kan dus nie vir 'n geslote sisteem gebalanseer word nie. In die geval van 'n oop-sisteem kan die reaksie slegs plaasvind indien Fe^{+2} tot die sisteem toegevoeg en Mg^{+2} verwyder word. Die moontlikheid bestaan egter ook dat 'n addisionele kristallyne fase by die reaksie betrek is. Die enigste moontlike kandidaat in so 'n geval is granaat, biotiet en hipersteen. Granaat kan buite rekening gelaat word omdat identiese hidrasie-reaksies ook in die granaatvrye kordiërietgranoliete plaasgevind het. Biotiet kan slegs 'n rol speel indien K-veldspaat ook by die reaksie betrek is. Die gesteentes bevat egter geen K-veldspaat nie. Die mees waarskynlike kandidaat is dus hipersteen. Op petrografiese gronde is dit egter nie maklik om vas te stel of die waargenome hidrasie van hipersteen (Fig. 14b) aan die hidrasie

van kordiëriet in dieselfde monster gekoppel is nie, en of die twee reaksies onafhanklik van mekaar verloop. Hierdie probleem is reeds volledig bespreek (Afd. IV-1.2.2), en met verwysing na hierdie bespreking is dit duidelik dat die moontlikheid van 'n gekoppelde reaksie tussen kordiëriet en hipersteen nie heeltemal buite rekening gelaat kan word nie. Hierdie moontlikheid kan aan die hand van die volgende gekoppelde reaksie getoets word. Individuele chemiese analyses vir kordiëriet (Tabel 11b, no. 3), gedriet (Tabel 25b, no. 7), hipersteen (Tabel 18c, no. 1) en antofilliet (Tabel 25a, no. 5) in monster DR 157 is gebruik.



Hierdie reaksie kan ook nie perfek gebalanseer word nie. Daar moet egter in gedagte gehou word dat individuele analyses vir die verskillende fases in bogenoemde reaksies gebruik is en dat hierdie samestellings waarskynlik nie 'n korrekte weergawe is van die werklike reaksie wat by enige spesifieke punt plaasgevind het nie. Die geringe tekort aan Fe^{+2} en suurstof, en die klein oormaat Mg^{+2} is dus moontlik nie werklik vir die reaksie as 'n geheel nie. Die belangrike punt hier is egter dat die aanvanklike hidrasie van kordiëriet en hipersteen langs die Ortopirokseenisograad heel moontlik aan 'n soortgelyke tipe reaksie toegeskryf kan word. Vernon (1972, p. 129) beskryf ook die moontlikheid dat hipersteen en kordiëriet tydens die vroeëre stadiums van hidrasie kon reageer om gedriet, kianiet en kwarts te vorm. In die geval van die huidige ondersoek word egter voorgestel dat antofilliet waarskynlik ook by hierdie aanvanklike reaksie betrek is.

Die algemene gevolgtrekking is dus dat reaksie (2), en moontlik ook reaksie (4), 'n meer realistiese weergawe vir die hidrasie van kordiëriet in kwartsryke pelitiese gesteene-

tes is. Dit beteken natuurlik dat die hidrasie van kordiëriet in pelitiese gesteentes as 'n deurlopende reaksie beskou moet word aangesien kordiëriet en ortoamfibool in reaksies 2 en 4 deur grootliks verskillende MgO/FeO-verhoudings gekenmerk word. Hierdie voorstel is in ooreenstemming met die waarneming dat bogenoemde reaksies nie beperk is tot die M_3 -Ortopirokseenisograad nie. Aanvanklike tekens van die hidrasie van kordiëriet kan reeds in die M_2 -Ortopirokseensone waargeneem word terwyl die byna volledige verloop van hierdie reaksie ook in gesteentes van die Ortoamfiboolsone geïllustreer kan word (Afd. IV-3).

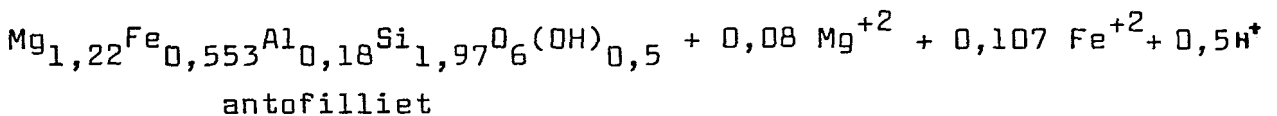
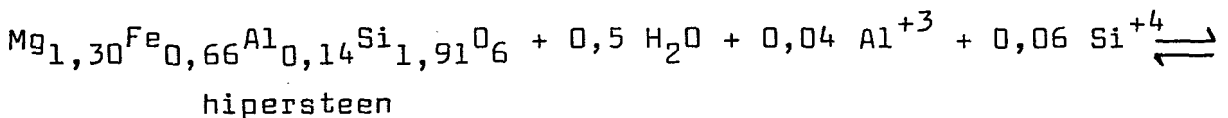
Die voorgestelde reaksies vir die hidrasie van kordiëriet in die huidige ondersoek is egter steeds onvolledig omdat die teenwoordigheid van natrium in gedriet nie in aanmerking geneem is nie. Gedriet bevat egter tot 2,2 massapersent Na_2O (Tabel 25b) en gevolglik moet 'n addisionele natriumryke mineraal as 'n uitgangstof by reaksies 2 en 4 betrek word. Plagioklaas is die enigste ander natriumryke mineraal in hierdie gesteentes, en die waargenome geringe toename in die anortietinhoud van plagioklaas met oorgang vanaf die Ortopirokseen- na die Ortoamfiboolsone (Tabel 32) kan dus ook verklaar word indien natrium vir die ontwikkeling van gedriet deur plagioklaas vrygestel is.

In bogenoemde bespreking is aanvaar dat die reaksie waarin kordiëriet afbreek om gedriet en kianiet te vorm 'n hidrasiereaksie is. Indien water egter in genoegsame hoeveelhede in die kordiërietstruktuur opgeneem word kan die reaksie $kordiëriet + water \rightleftharpoons gedriet + kianiet + kwarts$ selfs as 'n dehidrasiereaksie beskou word (Green en Vernon, 1974, p. 222; Robinson en Jaffe, 1969a, p. 412). Die belangrike termodinamiese implikasies van so 'n voorstel is dat die helling van bogenoemde reaksie in PT-ruimte van positief na negatief sal verander. Green en Vernon (1974, p. 223) het hierdie moontlikheid eksperimenteel ondersoek en tot die gevolgtrekking gekom dat die ontwikkeling van gedriet en kianiet uit kordiëriet wel 'n hidrasie- en nie 'n dehidrasiereaksie is nie.

Die waargenome hidrasie van hipersteen in die kordiërietvrye granaatgranoliete langs die Ortopirokseenisograad (Afd. IX-3.2) is ook in ooreenstemming met 'n voorstel dat die oorgang van die tweede (M_2) na die derde (M_3) periodes van metamorfose ten minste gedeeltelik deur 'n styging in waterdruk beheer is.

3.2 DIE REAKSIE HIPERSTEEN+WATER \rightleftharpoons ANTOFILLIET

Die teenwoordigheid van kordiërietvrye granaatgranoliete langs die Ortopirokseenisograad skep 'n ideale geleentheid om 'n akkurate reaksie vir die hidrasie van hipersteen te skryf. Hierdie gesteentes bevat geen kordiëriet, gedriet of kianiet nie, en die meeste hipersteenkorrrels word deur 'n mantel van antofilliet omring (Fig. 14b). Kwarts speel nie 'n rol in die reaksie nie (Afd. IV-1.2.2.2) en gevolglik is die algemene reaksie, hipersteen+kwarts+water \rightleftharpoons antofilliet, nie van toepassing nie. Die werklike reaksie wat langs die Ortopirokseenreaksie-isograad plaasgevind het kan afgelei word deur gebruik te maak van chemiese analyses vir hipersteen en antofilliet in monster DV 38 (Fig. 14b). Die analise vir hipersteen (Tabel 18c, no. 5) en antofilliet (Tabel 25a, no. 1) in hierdie gesteente is herbereken op 'n basis van 6 suurstofatome. Bykomstige komponente is buite rekening gelaat:



Hierdie reaksie is presies in ooreenstemming met die reaksie wat deur Vernon (1972, p. 131) vir die hidrasie van hipersteen in soortgelyke gesteentes voorgestel is. Die klein

oormaat Mg^{+2} , Fe^{+2} en H^+ in hierdie reaksie kan toegeskryf word aan die feit dat die samestelling van hipersteen moontlik oorspronklik nie heeltemal konstant was nie.

Hierdie moontlikheid kan egter nie getoets word nie omdat onveranderde hipersteen in monster DV 38 nie vir sonering getoets is nie. Die soortgelyke MgO/FeO -verhoudings van hipersteen en antofilliet in bogenoemde reaksie is 'n aanduiding dat die hidrasie van hipersteen in die kordiëriet-vrye granaatgranoliete 'n nie-deurlopende reaksie verteenwoordig. Dit is natuurlik in ooreenstemming met die goedgedefinieerde karakter van die M_3 -Ortopirokseenisograad.

Die drie reaksies wat in hierdie afdeling bespreek is vorm die basis vir die detail ondersoek van die fisiese toestande van metamorfose tydens M_2 en met die oorgang vanaf M_2 na M_3 (Afd. X).



AFDELING X
FISIESE TOESTANDE
VAN METAMORFOSE
IN DIE
SUIDELIKE GRENSSONE
**VAN DIE** UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG
LIMPOPO -
METAMORFEKOMPLEKS

1. INLEIDING

Die detail ondersoek van die metamorfe ontwikkeling van 'n komplekse polimetamorfe terrein is tot 'n groot mate afhanklik van 'n akkurate evaluasie van die PT-toestande tydens opeenvolgende periodes van metamorfose. So 'n ondersoek kan egter slegs suksesvol uitgevoer word indien geskikte mineraalversamelings en toepaslike chemiese en eksperimentele of termodinamiese inligting beskikbaar is. Meer belangrik is dat dit egter ook moontlik moet wees om verskillende diagnostiese ewewigsversamelings aan die verskillende periodes van metamorfose te koppel. Dit is nie altyd moontlik in die geval van 'n prograad metamorfe ontwikkeling nie omdat voorafbestaande mineraalversamelings gewoonlik deur hierdie proses vernietig word (Vernon, 1976, p. 97). In die geval van retrograadmetamorfose word al die minerale gewoonlik nie by die reaksies betrek nie en gevolglik kan die proses van metamorfose in meer detail ondersoek word (Vernon, 1976; Berg, 1977).

Die grootste gedeelte van die metamorfose ontwikkeling van die gebied onder bespreking kan in terme van 'n retrograadmodel beskryf word (Afd. IV-3 en Afd. VII-3). Die effek van die eerste (M_1) periode van prograadmetamorfose kan slegs indirek afgelei word en word nie verder by hierdie bespreking betrek nie. Die tweede (M_2) en derde (M_3) periodes van retrograadmetamorfose kan egter beide in terme van realistiese metamorfe reaksies en ewewigsversamelings gedefinieer word. Die invloed van M_2 is hoofsaaklik beperk tot die Ortopirokseensone, terwyl M_3 weer beperk is tot die Ortoamfiboolsone. Beide metamorfe sones kan baie akkuraat omlin word (Fig. 2) en hierdie situasie skep dus 'n ideale geleentheid om die ooreenstemmende PT-toestande in groter detail te ondersoek.

Die grootste gedeelte van hierdie ondersoek het betrekking op die ewewigstoestande wat aanleiding gegee het tot die

ontwikkeling van kordiëriet en hipersteen tydens M_2 , en antofilliet, gedriet en kianiet tydens M_3 . Termodinamiese en eksperimentele inligting is vir bogenoemde reaksies beskikbaar en gevolglik behoort dit moontlik te wees om die ooreenstemmende fisiese toestande kwantitatief te ondersoek. Hierdie reaksies is reeds volledig bespreek (Afd. IX) en kan kortliks as volg opgesom word:

- (i) Kordiëriet+hipersteen \rightleftharpoons granaat+kwarts (M_2 -Ortopirokseensone)
- (ii) Kordiëriet+water \rightleftharpoons gedriet+kianiet (M_3 -Ortopirokseensone-reaksie-isograad)
- (iii) Hipersteen+water \rightleftharpoons antofilliet (M_3 -Ortopirokseensone-reaksie-isograad)

Die hipersteen-ougietgranoliet word ook by hierdie ondersoek betrek aangesien die teenwoordigheid van samebestaande piroksene in hierdie gesteentes as 'n onafhanklike kontrole vir temperatuur en druk in die Ortopirokseensone gebruik kan word.

2. DIE M_2 -ORTOPIROKSEENSONE

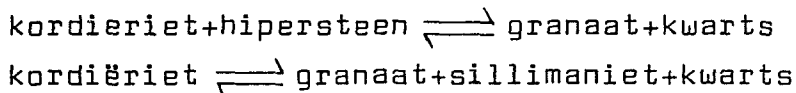
2.1 DIE GRANAATGRANOLIETE

Twee mineraalpare in hierdie gesteentes is potensieel geskik vir die kwantitatiewe bepaling van temperatuur en druk, naamlik kordiëriet+granaat en granaat+hipersteen.

2.1.1 Kordiëriet+granaat

Die verwantskap tussen temperatuur en druk en die verdeling

van MgO en FeO tussen samebestaande kordiëriet+granaat in hoë-gradse pelitiese metamorfe gesteentes is die afgelope aantal jare aan die hand van verskeie teoretiese en eksperimentele modelle ondersoek (Hensen, 1971, 1972, 1977; Hensen en Green, 1970, 1971, 1972, 1973; Currie, 1971, 1974; Weisbrod, 1973; Wood, 1973; Thompson, 1976; Holdaway, 1976; Holdaway en Lee, 1977). Die ewewigsverwantskappe van kordiëriet en granaat in 'n gegewe mineraalversameling word hoofsaaklik deur die volgende twee reaksies beheer:



Die versameling kordiëriet+granaat+hipersteen (of sillimaniet)+kwarts verteenwoordig 'n toestand van twee-veranderlike ewewig in die sisteem MgO-FeO-Al₂O₃-SiO₂, en gevolglik besit samebestaande kordiëriet en granaat 'n definitiewe samestelling by konstante temperatuur en druk. Die temperatuur en druk van hierdie ewewig kan dus bereken word indien die samestelling van die twee fases bekend is.

Hensen en Green (1970, 1972) het beide reaksies eksperimenteel ondersoek en P-T-X-diagramme opgestel (1973, Fig. 3) aan die hand waarvan die temperatuur en druk afgelei kan word indien die samestelling van kordiëriet en granaat bekend is. Currie (1971) het die tweede reaksie eksperimenteel ondersoek en 'n termodinamiese model vir die berekening van PT-toestande voorgestel. Die resultate van hierdie eksperimentele studies stem ongelukkig nie ooreen nie. Die grootste probleme is gekoppel aan die verwantskap tussen Kd MgO-FeO (Kord-Gran) en temperatuur. Currie se resultate is 'n aanduiding dat hierdie verdelingskoëffisiënt toeneem met 'n toename in temperatuur terwyl Hensen en Green se inligting voorspel dat die verdelingskoëffisiënt afneem met 'n toename in temperatuur. Die teenstrydige eksperimentele inligting is reeds volledig bespreek (Afd. VI-2.1.1.1) en daar is gewys dat die inligting uit die huidige onder-

soek eerder in ooreenstemming is met Hensen en Green se voorgestelde model. Beide modelle is egter in hierdie ondersoek gebruik om die PT-toestande vir die deurlopende reaksie tussen granaat, kordiëriet en hipersteen te bereken. Daar moet egter in gedagte gehou word dat Currie se model moontlik hier nie van toepassing is nie aangesien die betrokke gesteentes nie sillimaniet bevat nie. Dit is egter nie duidelik of hierdie beperking enige opvallende invloed op die bekende PT-toestande sal hê nie. Die toepassing van Currie se model gee byvoorbeeld presies dieselfde resultate vir kordiëriet-granaat-hipersteenversamelings (monster W-53, Reinhardt, 1968) en geassosieerde hipersteenvrye en sillimanietryke gesteentes (Currie, 1971, Tabel 1).

So en behalwe bogenoemde probleme kan die karakter van die deurlopende reaksie, kordiëriet+hipersteen \rightleftharpoons granaat+kwarts, ook deur verskeie ander faktore beïnvloed word. Die eksperimentele inligting is dus werklik slegs van toepassing indien natuurlike versamelings aan die volgende vereistes voldoen:

- (i) die suurstoffugasiteit (f_{O_2}) moet laag wees om betekenisvolle oksidasie van yster in kordiëriet en granaat te verhinder;
- (ii) die waterdruk moet laag wees om die hidrasie van kordiëriet te verhoed.
- (iii) granaat mag slegs klein hoeveelhede Ca^{+2} en Mn^{+2} bevat wat Mg^{+2} en Fe^{+2} kan vervang;
- (iv) kordiëriet en granaat moet in chemiese ewewig wees.

Die mineraalversamelings onder bespreking voldoen aan al hierdie vereistes soos in tabel 50 geïllustreer word.

Die chemiese samestelling van die kordiëriet-granaatgranoliet (Fig. 18c) stem verder ook redelik goed ooreen met die eksperimentele samestellings wat deur Hensen en Green

gebruik is, en gevolglik is dit duidelik dat hierdie gesteentes ideaal geskik is vir direkte vergelyking met bogenoemde eksperimentele inligting.

Tabel 50 Vergelyking van chemiese toestande in die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfe kompleks met eksperimentele toestande van Hensen en Green (1972)

Chemiese parameters	Eksperimentele toestande	Natuurlike toestande
1. f_{O_2}	laag (grafiet-kroesies is gebruik)	laag (teenwoordigheid van grafiet en sulfiedes)
2. a_{H_2O}	$P_{H_2O} < P_S$	P_{H_2O} waarskynlik kleiner as P_S soos aangedui word deur die teenwoordigheid van grafiet
3. Ca-inhoud van granaat	6 mol persent	5,7 mol persent grossulariet
4. Mn-inhoud van granaat	Mn is afwesig	2,30 mol persent spessartiet
5. Addisionele fases	K-veldspaat, plagioklaas	Plagioklaas, biotiet, sulfiedes

Chemiese inligting vir samebestaande kordiëriet+granaat+hipersteen in die kordiëriet-granaatgranoliet word in tabel 51 opgesom. Die inligting in hierdie tabel is gebaseer op die kernsamestelling van kordiëriet (Tabel 11a), die randsamestelling van granaat in gevalle van sonering (monsters DR 80 en MX, Tabel 13a) en die gemiddelde samestelling van hipersteen (Tabelle 18a en b) in individuele monsters. $MgO/MgO+FeO$ (mol)-verhoudings vir kordiëriet en granaat is gebruik om die temperatuur en druk vir individuele kordiëriet-granaatpare te bereken (Hensen en Green, 1973, Fig. 3). Hierdie inligting word in kolom A van tabel 51 gegee.

Tabel 51 Chemiese inligting en berekende temperatuur en druk vir samebestaande kordieëriet-granaat+hipersteen in die kordieëriet-granaatgranoliete

Monster nommer	Gran MgO/MgO+FeO	Kord MgO/MgO+FeO	Kord-Gran		A		B		C	
			Kd	LnKd	P(Kb)	T, ° C	T, ° C	P(Kb)	T, ° C	
DR 19	0,397	0,843	8,16	2,10	7,7	610	645	7,5	784	
DR 54	0,422	0,862	8,54	2,15	7,9	620	640	7,7	794	
DR 59	0,426	0,840	8,54	2,15	7,9	700	630	7,7	797	
DR 73	0,355	0,822	8,37	2,13	7,3	590	640	7,3	789	
DR 80	0,368	0,806	8,00	2,08	7,2	650	650	7,2	780	
DV 11	0,376	0,857	9,89	2,29	8,0	575	580	7,7	834	
R 16	0,434	0,878	9,42	2,24	8,3	500	600	8,2	820	
MX	0,408	0,819	8,03	2,08	7,3	740	645	7,4	780	
M 309	0,408	0,859	8,83	2,18	7,8	600	615	7,6	805	
M 333	0,396	0,857	9,12	2,21	8,0	550	605	7,8	810	

A Hensen en Green (1973)

B Thompson (1976)

C Currie (1971)

Die berekende temperatuur en druk in kolom A wissel tussen 500 en 740°C, en tussen 7,2 en 8,3 Kb. Die gemiddelde temperatuur van 614°C is heeltemal onaanvaarbaar vir die granulietfasies van metamorfose en is glad nie in ooreenstemming met die beskikbare veldinligting en addisionele eksperimentele inligting nie (Afd. X-2.1.3 en 2.2). Thompson (1976) het 'n gewysigde metode vir die berekening van temperatuur voorgestel waarvolgens Hensen en Green se eksperimentele resultate gekalibreer is met inligting vir natuurlike kordieëriet-granaatversamelings. Die gewysigde temperature gebaseer op Thompson (Fig. 1a) se stip van LnKd (kord-gran) teen 1/T word in kolom B (Tabel 51) gegee. Hierdie metode gee 'n gemiddelde temperatuur van 625°C wat baie min van die vorige waarde verskil. Die enigste voordeel van laasgenoemde metode is dat die berekende temperatuur vir individuele mineraalpare in tabel 51 onderling baie minder varieer as in die vorige geval.

Meer realistiese temperatuurwaardes kan egter verkry word indien Currie (1971) se termodinamiese model gebruik word.

Die absolute temperatuur (T) kan na aanleiding van hierdie model as volg bereken word:

$$T = \frac{4515}{6,37 - \text{LnKd}}$$

Die litostatiese druk kan afgelei word deur van toepaslike P-X diagramme gebruik te maak (Currie, 1971, Fig. 2). Die volgende wiskundige vergelyking is ook van toepassing:

$$P = P^0 + \frac{P^1}{2} (X \text{ Gran} + X \text{ Kord}), \text{ Kb}$$

waar $X = \text{Mg}/\text{Mg} + \text{Fe}^{+2}$

$$P^1 = 0,003138 \cdot T \cdot \text{LnKd}.$$

$$P^0 = \text{ewewigsdruk vir Fe-granaat en Fe-kordiëriet by die berekende temperatuur (T).}$$

Die berekende temperatuur en druk vir individuele kordiëriet-granaatpare word in kolom C (Tabel 51) gegee. Die gemiddelde temperatuur (800°C) verskil grootliks van die gemiddelde waarde (614°C) wat met behulp van Hensen en Green se model bereken is. Die gemiddelde druk (7,61 Kb) is egter in goeie ooreenstemming met die gemiddelde waarde van 7,74 Kb in kolom A (Tabel 51).

Nieteenstaande die goeie korrelasie tussen die eksperimentele en natuurlike toestande (van hierdie ondersoek) is dit duidelik dat Hensen en Green (1973) se eksperimentele resultate nie gebruik kan word om die temperatuur vir die deurlopende reaksie tussen kordiëriet, granaat en hipersteen in die Ortopirokseensone te bepaal nie. In teenstelling hiermee gee die toepassing van Currie se model (1971) temperatuurwaardes wat nie slegs realisties is vir die fisiese toestande van metamorfose in die Ortopirokseensone nie, maar wat ook ooreenstem met temperatuurtoestande wat algemeen vir die granulietfasies van metamorfose aanvaar

Tabel 51 Chemiese inligting en berekende temperatuur en druk vir samebestaande kordieëriet-granaat+hipersteen in die kordieëriet-granaatgranoliete

Monster nommer	Gran MgO/MgO+FeO	Kord MgO/MgO+FeO	Kord-Gran		A		B		C	
			Kd	LnKd	P(Kb)	T, ° C	T, ° C	P(Kb)	T, ° C	
DR 19	0,397	0,843	8,16	2,10	7,7	610	645	7,5	784	
DR 54	0,422	0,862	8,54	2,15	7,9	620	640	7,7	794	
DR 59	0,426	0,840	8,54	2,15	7,9	700	630	7,7	797	
DR 73	0,355	0,822	8,37	2,13	7,3	590	640	7,3	789	
DR 80	0,368	0,806	8,00	2,08	7,2	650	650	7,2	780	
DV 11	0,376	0,857	9,89	2,29	8,0	575	580	7,7	834	
R 16	0,434	0,878	9,42	2,24	8,3	500	600	8,2	820	
MX	0,408	0,819	8,03	2,08	7,3	740	645	7,4	780	
M 309	0,408	0,859	8,83	2,18	7,8	600	615	7,6	805	
M 333	0,396	0,857	9,12	2,21	8,0	550	605	7,8	810	

A Hensen en Green (1973)

B Thompson (1976)

C Currie (1971)

Die berekende temperatuur en druk in kolom A wissel tussen 500 en 740°C, en tussen 7,2 en 8,3 Kb. Die gemiddelde temperatuur van 614°C is heeltemal onaanvaarbaar vir die granulietfasies van metamorfose en is glad nie in ooreenstemming met die beskikbare veldinligting en addisionele eksperimentele inligting nie (Afd. X-2.1.3 en 2.2). Thompson (1976) het 'n gewysigde metode vir die berekening van temperatuur voorgestel waarvolgens Hensen en Green se eksperimentele resultate gekalibreer is met inligting vir natuurlike kordieëriet-granaatversamelings. Die gewysigde temperature gebaseer op Thompson (Fig. 1a) se stip van LnKd (kord-gran) teen 1/T word in kolom B (Tabel 51) gegee. Hierdie metode gee 'n gemiddelde temperatuur van 625°C wat baie min van die vorige waarde verskil. Die enigste voordeel van laasgenoemde metode is dat die berekende temperatuur vir individuele mineraalpare in tabel 51 onderling baie minder varieer as in die vorige geval.

Meer realistiese temperatuurwaardes kan egter verkry word indien Currie (1971) se termodinamiese model gebruik word.

Die absolute temperatuur (T) kan na aanleiding van hierdie model as volg bereken word:

$$T = \frac{4515}{6,37 - \text{LnKd}}$$

Die litostatiese druk kan afgelei word deur van toepaslike P-X diagramme gebruik te maak (Currie, 1971, Fig. 2). Die volgende wiskundige vergelyking is ook van toepassing:

$$P = P^0 + \frac{P^1}{2} (X_{\text{Gran}} + X_{\text{Kord}}), \text{ Kb}$$

waar $X = \text{Mg}/\text{Mg} + \text{Fe}^{+2}$

$$P^1 = 0,003138 \cdot T \cdot \text{LnKd}.$$

$$P^0 = \text{ewewigsdruk vir Fe-granaat en Fe-kordiëriet by die berekende temperatuur (T).}$$

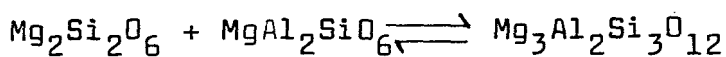
Die berekende temperatuur en druk vir individuele kordiëriet-granaatpare word in kolom C (Tabel 51) gegee. Die gemiddelde temperatuur (800°C) verskil grootliks van die gemiddelde waarde (614°C) wat met behulp van Hensen en Green se model bereken is. Die gemiddelde druk (7,61 Kb) is egter in goeie ooreenstemming met die gemiddelde waarde van 7,74 Kb in kolom A (Tabel 51).

Nieteenstaande die goeie korrelasie tussen die eksperimentele en natuurlike toestande (van hierdie ondersoek) is dit duidelik dat Hensen en Green (1973) se eksperimentele resultate nie gebruik kan word om die temperatuur vir die deurlopende reaksie tussen kordiëriet, granaat en hipersteen in die Ortopirokseensone te bepaal nie. In teenstelling hiermee gee die toepassing van Currie se model (1971) temperatuurwaardes wat nie slegs realisties is vir die fisiese toestande van metamorfose in die Ortopirokseensone nie, maar wat ook ooreenstem met temperatuurtoestande wat algemeen vir die granulietfasies van metamorfose aanvaar

word (Winkler, 1974; Hewins, 1975). Die moontlikheid kan natuurlik nie buite rekening gelaat word dat Currie se model bloot toevallig 'n realistiese temperatuurwaarde gee nie omdat die versamelings onder bespreking geen sillima-niet bevat nie. Hierdie moontlikheid word later in hierdie afdeling volledig bespreek. Meer interessant egter is die opreestemmende drukwaardes wat met behulp van die twee verskillende modelle verkry is. 'n Moontlike verklaring hiervoor kan met verwysing na figuur 3 (Hensen en Green, 1973) verkry word. Uit hierdie figuur is dit duidelik dat die onderskeie kontoere vir X Kord en X Gran mekaar teen 'n baie lae helling ten opsigte van die temperatuuras sny. Hierdie eksperimentele inligting is dus goeie aanduiding dat kordieriet-granaat 'n baie meer akkurate geobarometer as geotermometer is (kyk ook Hensen, 1977; Berg, 1977). Die grootliks verskillende temperatuurwaardes vir individuele mineraalpare in kolom A (Tabel 51) kan natuurlik ook met verwysing na bogenoemde figuur verklaar word.

2.1.2 Granaat-Hipersteen

Die oplosbaarheid van aluminium in ortopirokseen in ewewig met granaat is afhanklik van temperatuur en druk. Wood en Banno (1973) en Wood (1974) het op grond van eksperimentele inligting vir die sisteme $\text{MgSiO}_3\text{-FeSiO}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ en $\text{CaSiO}_3\text{-FeSiO}_3\text{-MgSiO}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'n termodinamiese model voorgestel wat gebruik kan word om die druk te bereken indien die temperatuur bekend is. Hierdie model is op die volgende eenvoudige ewewigsverwantskap gebaseer:



ortopirokseen-
vaste oplossing

granaat

Die verwantskap tussen die samestelling van bogenoemde fases en die temperatuur en druk van die reaksie kan aan die hand van die volgende vergelyking voorgestel word (Wood, 1974, vgl. 12).

$$P = \frac{RT}{\Delta V_r} \ln \left(\frac{(X_{Al}^{M_1}) (1-X_{Al}^{M_1})}{(1-y)^3 \text{Gran}} \right) + \left(\frac{7012-3,89 T}{\Delta V_r} \right) - C (X_{Fe}^{\text{Opx}})^2 (1-2X_{Al}^{M_1})$$

$$(X_{Fe}^{\text{Opx}})^2 = Fe^{+2}/Fe^{+2} + Mg^{+2}$$

$$C = 10450 \text{ bar}$$

$(1-y)$ gran = totale $Fe^{+2} + Mg^{+2}$ in die oktaëdriese posisies van granaat

$X_{Al}^{M_1} = Al^{+3}$ in die M_1 oktaëdriese posisie van ortopirokseen

ΔV_r = volume verandering vir die reaksie (Wood, 1974, Tabel 1).

Bogenoemde vergelykings is nie direk op natuurlike granaat-hipersteenversamelings van toepassing nie omdat die verskillende funksies in verskillende eenhede gegee word. Die volgende eenhede is deur Wood (1974) in bogenoemde vergelykings gebruik:

$$\Delta V = \text{cc}$$

$$\Delta H = \text{Kal/gfg}$$

$$\Delta S = \text{Kal}$$

$$R = 1.987 \text{ Kal/mol graad.}$$

Hierdie eenhede moet dus omgeskakel word na die standaard entropie-eenheid wat in cc bar/mol graad gegee word. Die

omrekeningsfaktor vir Kal na cc bar is 41,8596.

Bogenoemde vergelyking kan nou in 'n korrekte vorm geskryf word:

$$P = \frac{83,183.T}{\Delta V_T} \ln \left(\frac{(X_{Al}^{M_1}) (1-X_{Al}^{M_1})}{(1-y)^3 \text{Gran}} \right) + \left(\frac{7012-3.89.T}{\Delta V_T} \right) \cdot 41,860$$

$$- C(X_{Fe})_{Opx} (1-2 X_{Al}^{M_1})$$

Hierdie vergelyking kan nou gebruik word om 'n onafhanklike waarde vir druk in die Ortopirokseensone te probeer verkry. Die chemiese gegewens wat gebruik is om die ewewigsdruk vir samebestaande granaat-hipersteen in die granaatgranoliet te bereken word in tabel 52 opgesom. Hierdie inligting is gebaseer op die randsamestelling van granaat in gevalle van sonering (Tabelle 13a en b), en die gemiddelde samestelling vir hipersteen (Tabelle 18a en b) in individuele monsters. Temperature vir individuele mineraalpare is uit tabel 51 (kolom C) verkry. 'n Gemiddelde temperatuur van 800°C is gebruik in die geval van die een monster (DR 42-2) wat geen kordieriet bevat nie.

Tabel 52 Chemiese inligting en berekende drukwaardes vir individuele granaat-hipersteenpare in die granaatgranoliet

Monster nommer	$(1-y)^3 \text{Gran}$	$X_{Al}^{M_1}$	$T^\circ\text{k}$	ΔV_T	$(X_{Fe})_{Opx}$	P (Kb)
DR 19	0,901	0,097	1057	-8,32	0,350	7,10
DR 54	0,871	0,143	1067	-8,54	0,320	3,97
DR 59	0,859	0,145	1070	-8,54	0,337	3,77
DR 73	0,844	0,110	1062	-8,38	0,380	5,28
DR 80	0,837	0,111	1053	-8,48	0,400	4,48
MX	0,860	0,80	1053	-8,22	0,351	8,33
R 16	0,851	0,125	1093	-8,45	0,290	6,13
DV 11	0,822	0,095	1107	-8,30	0,338	8,60
M 333	0,889	0,110	1083	-8,38	0,391	6,62
M 309	0,829	0,121	1078	-8,42	0,353	5,10
DR 42-2	0,809	0,102	1073	-8,34	0,360	6,10

Die berekende druk in tabel 52 wissel tussen 3,77 en 8,60 Kb met 'n gemiddelde waarde van 5,95 Kb. Hierdie waarde is heelwat laer as die gemiddelde waarde van 7,6 Kb gebaseer op die modelle van beide Hensen en Green (1973) en Currie (1971) vir kordiëriet-granaatpare. Indien individuele waardes vir granaat-hipersteen en kordiëriet-granaatpare in dieselfde gesteentes vergelyk word (Tabelle 51 en 52) is dit duidelik dat die korrelasie in die meeste gevalle baie swak is en met tot 3,9 Kb (DR 59) verskil. Die onderlinge verskille van een monster na 'n ander is in dieselfde grootte orde.

Die rede vir hierdie lae, en onderlinge grootliks verskillende drukwaardes gebaseer op Wood (1974) se geobarometer is nie baie duidelik nie. Een moontlike verklaring is dat die aluminiumryke ortopirokseene in hierdie ondersoek nie geskik is vir gebruik as 'n potensiële geobarometer nie. Hierdie voorstel is gebaseer op die waargenome verwantskap tussen die aluminiuminhoud van hipersteen en van die ooreenstemmende gesteentes (Fig. 27b).

'n Tweede moontlikheid is dat die analitiese gegewens vir granaat en hipersteen nie akkuraat genoeg is nie. Dit is 'n welbekende feit dat mikrosonde analyses algemeen onakkurate waardes vir veral SiO_2 in piroksene gee. Onakkurate waardes vir SiO_2 het natuurlik 'n belangrike invloed op die berekende hoeveelheid oktaëdriese aluminium in hipersteen. Die Wood geobarometer is veral sensitief vir verskille in $\text{Al}^{\text{VI}} (X_{\text{Al}}^{\text{M}_1})$, en op grond hiervan het Wood (1974) voorgestel dat 'n gemiddelde waarde vir Al^{IV} en Al^{VI} gebruik moet word om $X_{\text{Al}}^{\text{M}_1}$ te bereken. Hierdie benadering is nie in die huidige ondersoek gebruik nie omdat dit die reeds lae drukwaardes slegs verder verlaag. Dit is ook glad nie 'n uitgemaakte saak dat die grootliks verskillende drukwaardes in tabel 52 aan analitiese foute toegeskryf kan word nie. Die chemiese formules vir hipersteen (Tabelle 18a en b) stem eerstens baie goed ooreen met die ideale formule van ortopirokseene. Tweedens is dit uit tabel 52 ook duidelik

dat die berekende drukwaardes sistematies varieer met variasies in $X_{Al}^{M_1}$ van hipersteen. Hierdie negatiewe korrelasie tussen druk en die aluminiuminhoud van pirokseen skakel die moontlikheid van betekenisvolle analitiese foute grootliks uit.

'n Laaste moontlike verklaring is dat die Wood geobarometer hoofsaaklik van toepassing is op hoë temperatuur en drukversamelings in stollingsgesteentes, en met 'n groot mate van versigtigheid in die metamorfe omgewing toegepas moet word. Hierdie moontlikheid kan nie verder ondersoek word nie weens die gebrek aan gepubliseerde inligting waarin bogenoemde geobarometer wel op metamorfe mineraalversamelings toegepas is.

2.1.3 Bespreking van die berekende PT-toestande aan die hand van onafhanklike eksperimentele en veldinligting

Die kwantitatiewe bepaling van die temperatuur- en druktoestande in die Ortopirokseensone gebaseer op die eksperimentele modelle van Hensen en Green (1972, 1973) en Currie (1971) geen ooreenstemmende drukwaardes maar grootliks verskillende temperatuurwaardes vir die ewewigsversameling kordieriet+granaat+hipersteen. Die gemiddelde temperatuur van 800°C gebaseer op Currie se model is in ooreenstemming met temperatuurtoestande wat algemeen vir die granulietfasies van metamorfose aanvaar word. In teenstelling hiermee is die gemiddelde temperatuur van 614°C gebaseer op Hensen en Green se model heeltemal onaanvaarbaar vir hoë-graadse metamorfose.

Hensen (1977, p. 83) het voorgestel dat die suksesvolle toepassing van Currie se model soms toevallig geologies realitiese temperatuurwaardes gee en dat addisionele eksperimentele inligting (Holdaway, 1976; Holdaway en Lee, 1977), asook inligting vir natuurlike versamelings, in

ooreenstemming is met die voorstel dat Kd-MgO-FeO (Kordgran) afneem met toenemende temperatuur. Die feit dat hoë Kd-waardes ($Kd = 10-12$) wel soms in hoë-gradse metamorfe terreine beskryf word (Gable en Sims, 1969), word deur Hensen (1977) toegeskryf aan katioonuitruilingsreaksies tussen kordiëriet en granaat, of kordiëriet en biotiet by laer temperature. Dit is in hierdie opsig egter interessant om daarop te let dat Hollister (1977), na aanleiding van 'n detail chemiese ondersoek van die ontwikkeling van kordiëriet as gevolg van 'n komplekse reaksie waarby onder andere granaat en sillimaniet betrek is, tot die gevolgtrekking gekom het dat geen uitruiling van Mg^{+2} en Fe^{+2} na afloop van hierdie reaksie tussen kordiëriet en granaat plaasgevind het nie. Die gemiddelde Kd-waarde ($Kd = 9,1$) vir kordiëriet en granaat in hierdie sillimaniet-ryke granoliete gee egter 'n onrealistiese lae temperatuur indien Hensen en Green se model gebruik word, terwyl die toepassing van Currie se model 'n temperatuur gee wat weer in ooreenstemming met onafhanklike veldinligting is (Hollister, 1977, p. 228).

In die geval van die huidige ondersoek was kordiëriet wel op 'n latere stadium (en by 'n laer temperatuur) betrokke by ionuitruilingsreaksies wat granaat blykbaar nie geaffekteer het nie (Afd. VI-1.1.3 en 1.2.3.1). Die effek van hierdie uitruilingsreaksie kan egter duidelik geïdentifiseer word en is uitsluitlik beperk tot 'n smal sone in kordiëriet direk in kontak met granaat.

Die hoë Kd-waardes ($Kd = 8,3$) wat vir die interne samestelling van kordiëriet in kontak met granaat in hierdie ondersoek verkry is (Afdeling VII-2.1.1, Fig. 49) kan dus nie aan bogenoemde moontlikheid toegeskryf word nie. Dit lyk dus nie asof daar op hierdie stadium 'n algemeen aanvaarbare verklaring vir die waarneming is dat Hensen en Green (1973) se eksperimentele resultate soms onrealistiese temperature vir natuurlike kordiëriet-granaatversamelings gee, terwyl Currie (1971) se model soms wel realistiese

waardes gee nie. Die algemene gevoel (Holdaway en Lee, 1977) is egter dat Hensen en Green se eksperimentele werk meer akkuraat is as dié van Currie. Dit is dus duidelik dat eksperimentele inligting vir die ewewigsverwantskappe van kordiëriet en granaat in pelitiese metamorfe gesteentes nie altyd van toepassing is op natuurlike mineraalversamelings nie, en dat addisionele inligting vir die bepaling van temperatuur en druk waar moontlik gebruik moet word. Dit geld veral in die geval van die huidige ondersoek aangesien Currie (1971) se eksperimentele resultate moontlik nie van toepassing is op die sillimanietvrye versamelings nie.

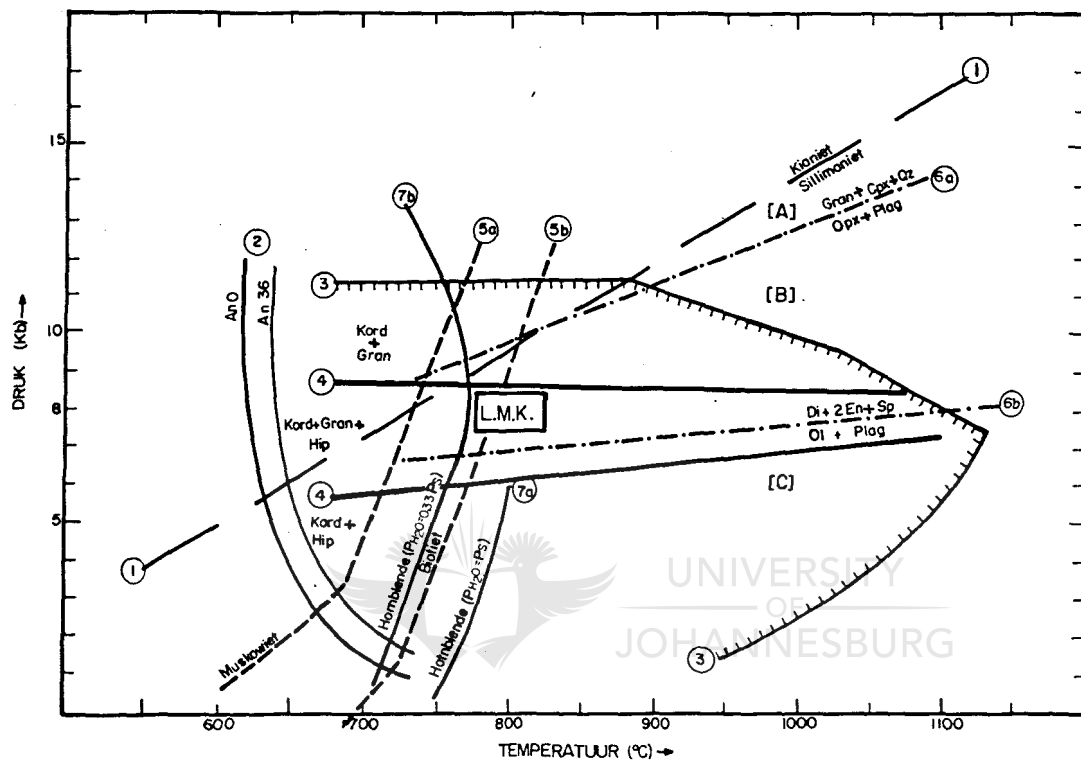
Die temperatuur van metamorfose in die Ortopirokseensone kan ook by benadering afgelei word deur gebruik te maak van eksperimentele inligting vir die ontwikkeling van anatektiese smelte in hoë-graadse metamorfe terreine. Die dagsome van die granaatgranoliet word deur die teenwoordigheid van konkordante en diskordante leukokratiese granitiese materiaal gekenmerk (Fig. 3 en 5). Die proses van gedeeltelike smelting wat tot die ontwikkeling van hierdie leukokratiese materiaal aanleiding gegee het is nie chemies ondersoek nie. Die beskikbare petrografiese en veldinligting (Afd. II-2.3) is egter 'n goeie aanduiding dat die migmatitiese voorkoms van die granaatgranoliete aan die hand van 'n anatektiese model verklaar kan word.

Die proses van anatekse, en die temperature waarby hierdie proses plaasvind, word grootliks deur die mineralogie van die metamorfe gesteentes en die beskikbaarheid van water beheer (Winkler, 1974). Die meeste geologiese inligting is 'n aanduiding dat anatektiese smelte in metamorfe terreine onderversadig is ten opsigte van water en dat die klassieke minimumsmeltkurwes van byvoorbeeld Tuttle en Bowen (1958) nie altyd van toepassing is op natuurlike gesteentes nie (Wyllie, 1977; Brown en Fyfe, 1970). Skrywers soos Fyfe (1970) en Brown en Fyfe (1970) is verder van mening dat water in hoë-graadse metamorfe gesteentes hoofsaaklik beperk

is tot minerale soos muskowitziet, biotiet en hornblende. Die proses van anatekse is beperk tot hoë-graadse metamorfe terreine en gevolglik sal smelting in hierdie "droë" gesteentes nie op 'n groot skaal plaasvind voordat die stabiliteitsgrense van hierdie waterryke minerale oorskry is nie. Minerale soos byvoorbeeld biotiet sal dus by 'n sekere minimum temperatuur afbreek om water vir smelting vry te stel, en die omvang van die proses is afhanklik van die temperatuurinterval bo hierdie minimum smeltkurwe in die andersins relatiewe droë gesteentes.

Toepaslike eksperimentele inligting (Brown en Fyfe, 1970) vir die ontwikkeling van granitiese smelte in droë hoë-graadse metamorfe gesteentes word in die PT-diagram van figuur 78 geïllustreer. Verdere eksperimentele inligting in hierdie figuur word ook gegee vir die minimum temperatuur van anatekse in waterryke granitiese gesteentes (Winkler, 1974), die stabiliteitsveld van kordieriet en samebestaande kordieriet, granaat en hipersteen (Hensen en Green, 1972), en die inversie van sillimaniet na kianiet (Richardson, e.a., 1969). Die posisie van laasgenoemde inversiekurwe in figuur 78 is met verwysing na Hensen en Green (1973, Figuur 1b) en Hensen (1977, Figuur 2).

Biotiet is die enigste waterryke mineraal in die granaatgranoliet, en as 'n druk van ongeveer 7,5-8 Kb as 'n minimum waarde vir die hoë-graadse metamorfose aanvaar word is dit duidelik dat die ontwikkeling van anatektiese smelte in hierdie gesteentes nie sal plaasvind voordat 'n minimum temperatuur van ongeveer 770-800°C oorskry is nie. Hierdie kombinasie van temperatuur en druk plaas die ontwikkeling van die anatektiese smelt in die sillimaniet-stabiliteitsveld wat in ooreenstemming is met die teenwoordigheid van sillimaniet in die leukokratiese graniet (Afd. II-2.3). Die voorgestelde smelttemperatuur van 770-800°C vir die granaatgranoliete is natuurlik slegs geldig indien al die beskikbare water in biotiet opgesluit is met die gevolg dat die waterdruk baie laer as die totale druk moet wees. Geen



Figuur 78: PT-diagram met toepaslike eksperimentele inligting en voorgestelde PT-veld vir die M_2 -Ortopirokseensone. Lyn 1: Kianiet-sillimaniet inversie kurwe (Richardson e.a. 1969). Lyn 2: Minimum smeltkurwes vir gneisse met plagioklaas An 0-36 (Winkler 1974). Lyn 3: Stabiltietsveld vir kordieriet (Hensen en Green, 1972 Fig. 1b). Lyn 4: Stabiltietsveld vir kordieriet + granaat + hipersteen in pelitiese gesteentes met $MgO/MgO+FeO = 0,70$ (Hensen en Green 1972, Fig. 1b). Lyn 5a en 5b: Smeltkurwes vir muskowitziet en biotiet (Brown en Fyfe, 1970 Fig. 2). Lyn 6a: Verskyning van granaat in kwartsryke tholeiïete met $MgO/MgO+FeO = 0,60$ (Green en Ringwood, 1967). Lyn 6b: Boonste stabiltietsgrens vir olivien + anortiet (Green en Ringwood, 1967; Kushiro en Yoder, 1966; Irving en Green, 1970). Lyn 7a: Stabiltietsgrens vir hornblende as gevolg van die reaksie $Hb1 + Qz = Opx + Cpx + Plag + H_2O$ met $P_{H_2O} = P_s$ (Binns, 1969). Lyn 7b: Selfde as 7a, maar bereken vir $P_{H_2O} = 0,3 P_s$ (Binns, 1969). A: Hoë-druk granoliete; B: Intermediêre-druk granoliete; C: Laedruk granoliete (Green en Ringwood, 1967). L.M.K.: Voorgestelde PT-veld vir die M_2 -Ortopirokseensone in die Limpopo-metamorfekompleks suid van die Soutpansberge.

poging is egter in hierdie ondersoek aangewend om die waterdruk tydens die tweede (M_2) periode van metamorfose te bereken nie. Met verwysing na die PT-diagram van figuur 78 is dit egter duidelik dat die granaatgranoliete by 'n temperatuur van ongeveer 800°C en 'n druk van ongeveer 8 Kb in 'n volkome gesmelte toestand sal wees indien $P_{\text{H}_2\text{O}} = P_s$. Dit is egter nie die geval nie en gevolglik kan daar aanvaar word dat die waterdruk tydens M_2 wel heelwat laer as die totale druk was. Die teenwoordigheid van klein hoeveelhede grafiet, en heelwat sulfiedes in die granaatgranoliet (Tabel 2) is ook in ooreenstemming met hierdie voorstel (French, 1966). Die beskikbare inligting is egter nie 'n aanduiding of gedeeltelike smelting van die granaatgranoliete gekoppel is aan 'n verhoging in $P_{\text{H}_2\text{O}}$ as gevolg van die afbreek van biotiet nie, en of biotiet onstabiel geraak het as gevolg van 'n verlaging van $P_{\text{H}_2\text{O}}$ wat gekoppel is aan gedeeltelike smelting met die gevolglike oplossing van water in hierdie smelt nie.

Die voorstel dat sommige graniete as gevolg van die gedeeltelike smelting van pelitiese metamorfe gesteentes ontwikkel het is ook eksperimenteel deur Green (1976) ondersoek. Beide sintetiese en natuurlike pelitiese materiaal is in hierdie ondersoek gebruik en die eksperimente is uitgevoer met 2 en 5% H_2O by 4,7 en 10 Kb druk. Die resultate van hierdie ondersoek is 'n aanduiding dat smelting 'n aanvang neem by temperature van $780-820^{\circ}\text{C}$ en dat 'n granitiese smelt by hierdie temperature in ewewig is met residuele granaat (of kordiëriet) + biotiet+kwarts+plagioklaas+sillimaniet. Die teenwoordigheid van kordiëriet in die granitiese materiaal is volgens hierdie eksperimentele inligting 'n aanduiding dat smelting by 'n diepte van minder as 25 km plaasgevind het, terwyl die teenwoordigheid van granaat weer 'n aanduiding is dat die proses by dieptes groter as 25 km plaasgevind het. Die leukokratiese graniet in hierdie ondersoek bevat behalwe sillimaniet en hipersteen ook verspreide granaatkristalle (Afd. 11-2.3), en die eksperimentele resultate van Green (1976) is dus ook in

ooreenstemming met die voorgestelde temperatuur- en druktoestande van ongeveer 800°C en 7,5-8 Kb vir die metamorfose in die Ortopirokseensone.

Die teenwoordigheid van die granaatvrye kordiërietgranoliete in die Ortopirokseensone skep laastens 'n geleentheid om 'n maksimumwaarde vir druk tydens die tweede periode van metamorfose te bereken. Hierdie gesteentes bestaan uit kordiëriet, hipersteen, biotiet, kwarts en plagioklaas en verteenwoordig die finale produkte van die deurlopende reaksieverwantskap tussen kordiëriet, granaat en hipersteen in gesteentes met $100 \text{ MgO}/\text{MgO}+\text{FeO} \text{ (mol)} > 0,70$ (Afd. VIII-2.3.1 en 2.3.2.3). Waardes van $100 \text{ MgO}/\text{MgO}+\text{FeO} \text{ (mol)}$ vir kordiëriet in twee van hierdie monsters (DR 10 en DR 42-1, Tabel 11a) wissel tussen 86,3 en 89. Die eksperimentele resultate van Hensen en Green (1972 en 1973, Fig. 3) is 'n aanduiding dat die versameling kordiëriet+hipersteen+kwarts, met $100 \text{ MgO}/\text{MgO}+\text{FeO} \text{ (kord)} =$ ongeveer 88, stabiel is by 'n maksimum druk van 8-9 Kb en by 'n temperatuur van 800°C indien $P_{\text{H}_2\text{O}} < P_s$.

Die berekende temperatuur en druk van ongeveer 800°C en 7,5-8 Kb gebaseer op Currie (1971) se model is dus in ooreenstemming met al die beskikbare veld- en addisionele eksperimentele inligting vir die granaatgranoliet van die Ortopirokseensone.

2.2 DIE MAFIESE GRANOLIET

Die teenwoordigheid van samebestaande orto- en klinopirokseen in die hipersteen-ougietgranoliet, en die wye verspreiding van hierdie versamelings binne die Ortopirokseensone, skep 'n geleentheid om 'n onafhanklike temperatuurkontrole vir die fisiese toestande van metamorfose in hierdie sone te verkry. Die temperatuur van metamorfose kan bereken word indien die samestelling van ortopirokseen

in ewewig met klinopirokseen bekend is.

Die oplosbaarheid van die $Mg_2Si_2O_6$ komponent in diopsied as 'n funksie van temperatuur is oorspronklik deur Davis en Boyd (1965) ondersoek en is later deur Boyd (1969) as 'n geotermometer gebruik. Die toepassing van hierdie termometer is egter beperk tot pirokseenversamelings wat baie min FeO en Al_2O_3 bevat. Wood en Banno (1973) het die invloed van Fe^{+2} op die ontmeningsgaping tussen enstatiet en diopsied ondersoek. Op grond van die beskikbare eksperimentele inligting het hulle die volgende empiriese verwantskap tussen die Fe^{+2}/Mg^{+2} verhouding van ortopirokseen en die oplosbaarheid van die $(Mg_2Si_2O_6)$ ortopirokseenkomponent in samebestaande klinopirokseen as funksie van temperatuur voorgestel (Wood en Banno, 1973, Vgl. 27):

$$T = \frac{-10202}{\ln K - 7.65 X_{Fe}^{Opx} + 3.88 (X_{Fe}^{Opx})^2 - 4.6}$$

waar $X_{Fe}^{Opx} = \frac{Fe^{+2}}{Fe^{+2} + Mg}$

$$K = \frac{a_{Mg_2Si_2O_6}^{Cpx}}{a_{Mg_2Si_2O_6}^{Opx}}$$

Die berekening van die aktiwiteit van die $Mg_2Si_2O_6$ komponent in orto- en klinopirokseen is gebaseer op 'n ideale oplossingsmodel waarin Mg^{+2} en Fe^{+2} nie by voorkeur tussen die M_1 en M_2 struktuurposisies verdeel is nie (Wood en Banno, 1973, p. 118).

Die Wood-Banno geotermometer kan egter slegs suksesvol toegepas word om die ewewigstemperatuur vir samebestaande orto- en klinopirokseen te bereken indien akkurate chemiese analyses vir hierdie twee minerale beskikbaar is. Ongelukkig

kan die beskikbare mikrosonde analyses vir hipersteen en ougiet in die hipersteen-ougietgranoliet nie altyd as baie akkuraat beskou word nie (Tabelle 34 en 35). Hierdie probleem is reeds bespreek (Afd. VI-2.2) en daar is voorgestel dat die waardes vir SiO_2 in tabelle 34 en 35 veral onder verdenking is. Onakkurate analitiese waardes vir SiO_2 het nie slegs 'n groot invloed op die berekende waardes vir tetraëdriese en oktaëdriese aluminium in pirokseen nie, maar beïnvloed uiteindelik ook die berekening van die aktiwiteit van die $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ komponent in hierdie minerale. Die probleem vererger grootliks indien die analitiese waardes vir Mg^{+2} en Fe^{+2} ook onder verdenking is. In so 'n geval sou dit betekenisloos wees om die Wood-Banno model vir die berekening van temperatuur te gebruik. Die analitiese waardes vir MgO en FeO in tabelle 34 en 35 kan egter met 'n redelike mate van sekerheid as akkuraat aanvaar word. Hierdie voorstel is gebaseer op die waargenome byna ideale verdeling van MgO en FeO tussen hipersteen en ougiet in die verdelingsdiagram van figuur 59 (Afd. VII-2.2). Vir die doeleindes van die toepassing van die Wood-Banno geotermometer word daar dus aanvaar dat die analyses in tabelle 34 en 35 akkuraat is, behalwe vir waardes van SiO_2 .

Die berekende ewewigstemperatuur vir samebestaande piroksene in die hipersteen-ougietgranoliet word in tabel 53 gegee. Weens die probleme gekoppel aan die berekening van akkurate waardes vir die aktiwiteit van die $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ -komponent in hipersteen en ougiet is dit duidelik dat die temperatuurwaardes in hierdie tabel slegs 'n aanduiding is van die temperatuurinterval waarin hipersteen en ougiet moontlik in ewewig is.

Die temperatuur in tabel 53 is verder gebaseer op die aanname dat alle yster in pirokseen as Fe^{+2} teenwoordig is. Indien die piroksene egter 'n sekere hoeveelheid Fe^{+3} bevat sal die berekende temperatuur toeneem as gevolg van 'n vermindering in die waardes van $x_{\text{Fe}}^{\text{Opx}}$ wat in vgl. 27 gebruik

is. Wood en Banno (1973) het egter gewys dat 'n substitusie van 10 persent Fe^{+2} deur Fe^{+3} die berekende temperature met slegs $20\text{-}30^{\circ}\text{C}$ sal laat toeneem.

Tabel 53 Chemiese inligting vir samebestaande hipersteen en ougiet in die hipersteen-ougietgranoliet en die ooreenstemmende ewewigstemperature gebaseer op vgl. 27 (Wood en Banno, 1973)

Monster	$X_{\text{Fe}}^{\text{Opx}}$	$^a_{\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6}^{\text{Cpx}}$	$^a_{\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6}^{\text{Cpx}}$	Temperatuur ($^{\circ}\text{C}$) Vgl. 27
M 130	0,352	0,382	0,032	825
R 51	0,408	0,311	0,022	775
M 331	0,469	0,253	0,015	728
M 292	0,412	0,311	0,017	748
M 339	0,416	0,301	0,025	839
DR 55	0,320	0,415	0,020	779
M 109	0,403	0,322	0,020	766
M 315	0,397	0,323	0,037	838
M 201	0,481	0,240	0,030	804
M 194	0,402	0,310	0,032	822

Die Wood-Banno geotermometer is deur Hewins (1975, p. 207) gebruik om metamorfe temperature vir verskeie granolietterreine in verskillende wêrelddele te bereken. Die resultate van laasgenoemde ondersoek is 'n aanduiding dat die meeste mafiese granoliete by temperature tussen 780 en 860°C ontwikkel het. Die gemiddelde temperature (772°C) wat in hierdie ondersoek vir die hipersteen-ougietgranoliet bereken is stem dus ook goed ooreen met bogenoemde resultate.

Daar kan laastens genoem word dat die reaksie hornblende + kwarts \longrightarrow ortopirokseen + klinopirokseen + plagioklaas + H_2O eksperimenteel deur Binns (1969b) ondersoek is wat voorgestel het dat die dehidrasie van amfiboliete en die ontwikkeling van pirokseengranoliete by ongeveer 775°C en 8 Kb druk sal plaasvind indien $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0,3$ Ps. Die eksperimentele inligting van Binns word ook in figuur 78 gegee. Petrografiese bewyse vir die ontwikkeling van die hipersteen-ougietgranoliete in die huidige ondersoek as gevolg van bogenoemde reaksie is reeds in afdeling IV-2.4 en figuur 16 bespreek. Hierdie inligting is dus ook in ooreenstemming met 'n minimum temperature van ongeveer 780°C vir die

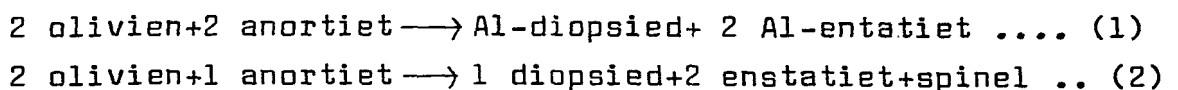
metamorfe toestande in die M_2 -Ortopirokseensone.

Die mineralogie van die hipersteen-ougietgranoliete van die huidige ondersoek is egter nie slegs 'n goeie kontrole vir temperatuurtoestande in die Ortopirokseensone nie maar skep ook 'n geleentheid om 'n onafhanklike waarde vir die waarskynlike druktoestande te verkry. Na aanleiding van die eksperimentele werk van Green en Ringwood (1967) kan die mineralogiese samestelling van mafiese granoliete gebruik word om die granulietfases van metamorfose in drie verskillende druktipes onder te verdeel:

- (i) Lae-druk granoliete: word deur die stabiele assosiasie van olivien+plagioklaas gekenmerk.
- (ii) Intermediêre-druk granoliete: olivien+plagioklaas is onstabiel, en ortopirokseen+plagioklaas vorm 'n stabiele assosiasie.
- (iii) Hoë-druk granoliete: word deur die stabiele assosiasie van granaat+klinopirokseen+plagioklaas gekenmerk, terwyl ortopirokseen+plagioklaas onstabiel is.

Met 'n verdere toename in druk (die eklogietfases) verdwyn plagioklaas, en diopsied+piroop vorm 'n stabiele versameling.

Die stabiliteitsvelde van die intermediêre en lae-druk granoliete word in figuur 78 geïllustreer. Reaksiëkurwe 6b definieer die oorgang van die lae- na die intermediêre-druk granoliete. Die volgende twee reaksies is hier ter sprake:



Die verskyning van granaat met oorgang van die intermediêre na die hoë-druk granoliete is aan die volgende twee reaksies gekoppel (reaksiëkurwe 6a in Fig. 78):

4 ortopirokseen+1 anortiet → almandiet-piroop+1 klinopirokseen+1 kwarts (3)

2 ortopirokseen+1 anortiet → grossulariet-almandiet-piroop+1 kwarts (4)

Die posisie van reaksiekurwes 6a en 6b in figuur 78 is egter nie slegs drukafhanklik nie maar word ook deur die chemie van die gesteentes beheer. Verskeie faktore speel hier 'n rol (Green en Ringwood, 1967), maar vir die doeleindes van die huidige ondersoek is die graad van silikaversadiging en die MgO/FeO-verhouding die twee belangrikste faktore wat die mineralogiese samestelling van die hipersteen-ougietgranoliete kan beïnvloed. Reaksies 1 en 2 is beperk tot oliviennormatiewe gesteentes en by konstante temperatuur neem die druk waarby hierdie reaksies plaasvind toe met toenemende MgO/MgO+FeO (mol)-verhouding van die gesteentes. Die posisie van reaksiekurwe 6b in figuur 78 is in ooreenstemming met 'n 100 MgO/MgO+FeO-waarde van ongeveer 60-70. Granaat verskyn ook by 'n laer druk in hierdie gesteentes as in die geval van kwarts-normatiewe gesteentes, en in beide gevalle neem die druk waarby granaat verskyn ook toe met 'n toename in MgO/MgO+FeO-verhouding van die gesteentes. Reaksiekurwe 6a in figuur 78 definieer die eerste verskyning van granaat in kwartsnormatiewe gesteentes met 100 MgO/MgO+FeO van ongeveer 60.

Dit is dus duidelik dat die granulietfasies nie alleen op grond van die mineralogie van hipersteen-ougietgranoliete in verskillende druktipes onderverdeel kan word nie maar dat die chemie van die gesteentes ook in berekening gebring moet word. Die versameling ortopirokseen+klinopirokseen+plagioklaas is slegs diagnosties van die intermediêre-druk granoliete indien hierdie gesteentes normatiewe kwarts bevat. Onder presies dieselfde druktoestande kan 'n oliviennormatiewe gesteente egter deur die versameling granaat+klinopirokseen+plagioklaas+ortopirokseen gekenmerk word (Green en Ringwood, 1967, p. 823).

Chemiese analises en normatiewe mineraalsamestellings vir dertien hipersteen-ougietgranoliete uit hierdie ondersoek is in tabel 9a (Afd. V) gegee. Vier van hierdie monsters bevat normatiewe kwarts terwyl die res olivien-normatief is met 'n normatiewe olivieninhoud wat tussen 1,6 en 16,5 persent wissel. Die magnesium tot ysterverhouding ($100 \text{ MgO}/\text{MgO}+\text{FeO}$) van nege van hierdie monsters wissel tussen 60 en 74. Die een uitsondering is M 201 met $100 \text{ MgO}/\text{MgO}+\text{FeO} = 56$. Geeneen van hierdie gesteentes bevat egter olivien nie en word almal deur die stabiele assosiasie hipersteen+ougiet+plagioklaas gekenmerk. Die chemiese samestelling van hierdie gesteentes is dus geskik vir 'n direkte vergelyking met die eksperimentele resultate van Green en Ringwood (1967) wat in figuur 78 geïllustreer word. Indien 'n gemiddelde temperatuur van 800°C vir die Ortopirokseen-sone aanvaar word is die afwesigheid van olivien in die onderversadigde hipersteen-ougietgranoliete 'n aanduiding dat hierdie gesteentes by 'n minimum druk van ongeveer 6,5 Kb gekristalliseer het. Op soortgelyke wyse is die afwesigheid van granaat in die versadigde granoliete 'n aanduiding van 'n maksimum druk in die omgewing van 9,5 Kb. Die hipersteen-ougietgranoliete is dus verteenwoordigend van die intermediêre-druk granoliete, en hierdie druk-interval (Fig. 78) stem baie goed ooreen met die voorgestelde druk van ongeveer 8 Kb vir die ontwikkeling van kordiëriet en hipersteen in die granaatgranoliete.

2.3 OPSOMMING VAN PT- TOESTANDE IN DIE M_2 -ORTOPIROKSEENSONE

Die PT-toestande tydens die tweede periode van hoë-gradse metamorfose is in die vorige afdeling bespreek aan die hand van al die beskikbare eksperimentele inligting vir die versamelings kordiëriet+hipersteen+granaat in die granaatgranoliet, en ortopirokseen+klinopirokseen+plagioklaas in die hipersteen-ougietgranoliet. Die resultate van hierdie ondersoek word kortliks in tabel 54 saamgevat en in figuur

78 geïllustreer.

Tabel 54 Opsomming van eksperimentele inligting wat vir die berekening van temperatuur en druk in die M_3 -Ortopirokseensone gebruik is

Verwysing	Mineraalversameling	Berekende PT-Toestande	
		Temp. (°C)	Druk (Kb)
Currie (1971)	Kordiëriet + granaat	800°C	7,61
Hensen en Green (1973)	Kordiëriet + granaat	-	7,74
Hensen en Green (1972,1973)	Maksimum druk vir die stabiliteit van hipersteen + kordiëriet in die granaatvrye kordiërietgranoliete. 100 MgO/MgO+FeO (mol) (Mord) = ± 88.	-	8,0-9,0
Green (1976)	Die ontwikkeling van die granaat- (hipersteen, en sillimaniet) bevattende leukokratiese graniet	780-820	>7,0
Brown en Fyfe (1970)	Aanvang van anatekse in watervrye biotietryke (en muskovietvrye) granitiese gesteentes by 8 Kb druk	770-800	-
Wood en Benno (1973)	Die versameling hipersteen + ougiet	792	-
Bliss (1969)	Die reaksie $Hbl + Qz = Opx + Cpx + Plag + H_2O$ by 8 Kb druk en $PH_2O = 0,3 P_g$	>775	-
Green en Ringwood (1967)	Die versameling hipersteen + ougiet + plagiokless	-	6,5-9,5
<u>Voorgestelde PT-toestande in die Ortopirokseensone</u>		780-820	7,6-8,5

3. DIE M_3 -ORTOAMFIBOOLSONE

Die teenwoordigheid van samebestaande antofilliet, gedriet en kianiet in die ortoamfiboolgneisse van die Ortoamfiboolsone is gekoppel aan die hidrasie van kordiëriet en hipersteen langs die M_3 -Ortopirokseenreaksie-isograad. Hierdie hidrasiereaksies is reeds volledig uit beide 'n petrografiese en chemiese oogpunt beskryf (Afd. IV-1.2.2 en Afd. IX-3) en kan in die volgende vereenvoudigde vorm voorgestel word:

(i) kordiëriet+water \longrightarrow gedriet+kianiet+kwarts

(ii) hipersteen+water \longrightarrow antofilliet

Die eerste reaksie is beperk tot die kordiëriet-granaatgranoliete terwyl die tweede reaksie in dieselfde gesteentes en ook in die kordiërietvrye granaatgranoliete waargeneem is. Eksperimentele inligting is vir beide reaksies beskikbaar (Greenwood, 1963; Green en Vernon, 1974), en hierdie

resultate kan tesame met die inligting vir die stabiliteitsverwantskappe van kordiëriet, granaat en hipersteen in die Ortopirokseensone gebruik word om akkurate afleidings in verband met die PT-toestande tydens die derde periode van metamorfose te maak.

Die eksperimentele werk van Greenwood (1963) en Green en Vernon (1974) is onderskeidelik beperk tot 'n studie van die ewewigsverwantskappe van hipersteen+antofilliet en kordiëriet +hipersteen+antofilliet+kianiet, terwyl geen eksperimentele inligting vir samebestaande antofilliet en gedriet in assosiasie met bogenoemde fases beskikbaar is nie. In die geval van die huidige ondersoek is die chemiese samestelling vir beide die uitgangstowwe en produkte in die twee hidrasie-reaksies bekend, en hierdie gegewens kan gebruik word om die stabiliteitsverwantskappe van minerale soos antofilliet, gedriet en kianiet in meer detail te ondersoek. Weens die gebrek om volledige eksperimentele inligting word hierdie verwantskappe eers uit 'n teoretiese oogpunt beskou.

3.1 GEOMETRIESE ANALISE VAN FASEVERWANTSKAPPE IN DIE KORDIËRIET-GRANAATGRANOLIETE LANGS DIE M_3 -ORTOPIROKSEENREAKSIE-ISOGRAAD)

Die teoretiese analise van faseverwantskappe in die kordiëriet-granaatgranoliete langs die ortopirokseenisograad is gebaseer op die metode van Schreinemakers (Zen, 1966) wat 'n grafiese voorstelling is van geen-veranderlike, een-veranderlike en twee-veranderlike ewewig op 'n PT-diagram vir 'n n-komponente, n+2 fasesisteem. Hierdie metode kan veral handig te pas kom in gevalle waar geen of onvolledige eksperimentele inligting vir 'n spesifieke mineralogiese sisteem beskikbaar is. In so 'n geval kan 'n kennis van die rangskikking van een-veranderlike lyne om 'n geen-veranderlike punt 'n belangrike bydrae lewer in verband met die waarskynlike fisiese toestande waaronder 'n gegewe mineraalversameling

of versamelings, gevorm het. Die doel van hierdie ondersoek is dus om vas te stel of die metode van Schreinemakers gebruik kan word om die twee-veranderlike veld te definieer waarin antofilliet, gedriet en kianiet moontlik 'n stabiele assosiasie kan vorm.

Die teoretiese agtergrond vir die konstruksie van PT-diagramme gebaseer op Schreinemakers se metode is volledig deur Zen (1966) uiteengesit en word nie hier bespreek nie.

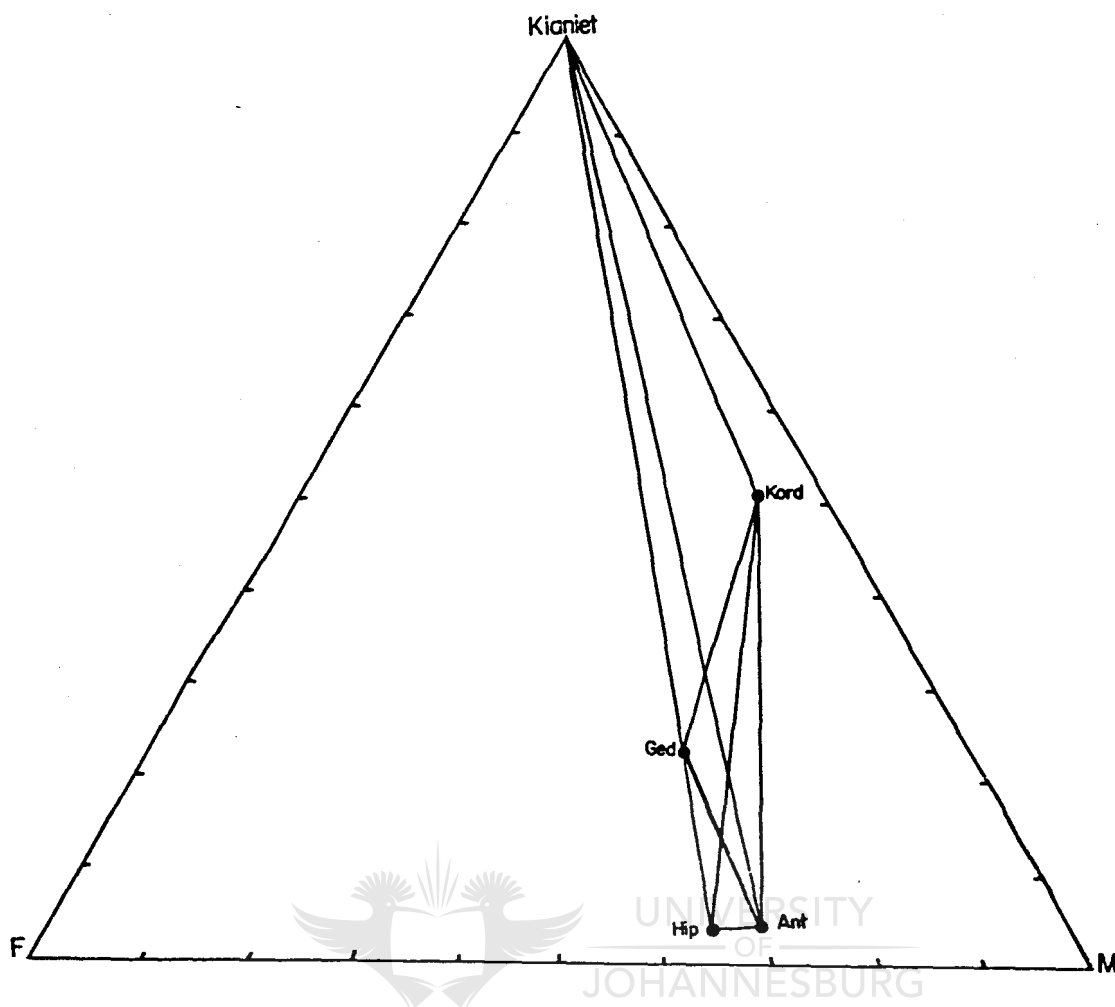
3.1.1 Die sisteem $MgO-FeO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$

Die kordiëriet-granaatgranoliete langs die Ortopirokseen-isograad kan deur die volgende beperkende mineraalversameling voorgestel word:

Kordiëriet+granaat+hipersteen+biotiet+antofilliet+
gedriet+kianiet+kwarts+plagioklaas+ertsminerale

Die chemiese en petrografiese inligting is 'n aanduiding dat granaat, en moontlik ook biotiet (Afd. IV-1.2.2 en Afd. VIII-3.2), geen rol in die hidrasiereaksies langs die isograad gespeel het nie (kyk ook Vernon, 1972). Gedriet bevat egter natrium (Tabel 25b) met die gevolg dat plagioklaas waarskynlik as 'n addisionele fase by die reaksies betrek is (Afd. IX-3.1). Indien die relatief klein hoeveelhede natrium egter buite rekening gelaat word kan die oorblywende fases volledig deur die sisteem $MgO-FeO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ beskryf word. Die AFM-diagram van figuur 79 is 'n projeksie deur SiO_2 en H_2O op die AFM-vlak van hierdie sisteem en gevolglik is kwarts en water addisionele fases in elke versameling. Hierdie diagram (Fig. 79) verteenwoordig dus die volgende fases:

kwarts+water+kordiëriet+hipersteen+antofilliet+gedriet+
kianiet



Figuur 79 : Die ternêre sisteem $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-FeO}$ wat die chemografiese verwantskappe tussen die vyf fases in monster DR 157 langs die Ortopirokseenisograad illustreer.

3.1.2 Chemografiese verwantskappe

Die vyf fases in figuur 79 kan slegs by 'n geen-veranderlike punt in ewewig wees. Vyf een-veranderlike lyne is dus om hierdie geen-veranderlike punt gerangskik, en hierdie een-veranderlike lyne begrens vyf twee-veranderlike velde waarin drie fases 'n stabiele assosiasie vorm.

Die rangskikking van een-veranderlike lyne om 'n geen-veranderlike punt in 'n PT-diagram is 'n funksie van die chemiese

verwantskappe tussen die betrokke fases. Die chemografiese verwantskappe in figuur 79 is gebaseer op genormaliseerde formules vir gemiddelde analyses van kordieriet, hipersteen, antofilliet en gedriet in monster DR 157 (Tabelle 11b, 18c, 25a en 25b). Hierdie formules, en die ooreenstemmende molare volumes vir die betrokke fases wat in die konstruksie van die een-veranderlike lyne gebruik is, word in tabel 55 gegee.

Tabel 55 Chemiese formules en molare volumes wat in die berekening van een-veranderlike lyne in Figuur 80 gebruik is.

Mineraal	Formule	Volume (Cm ³) ^X
Kordieriet (C)	$Mg_{1,75}Fe_{0,25}Al_4^{IV}Si_5O_{18}$	233 ^a
Hipersteen (H)	$Mg_{0,64}Fe_{0,35}Al_0^{VI}Al_{0,025}^{IV}Si_{0,045}O_{0,955}O_3$	31,5 ^a
Gedriet (G)	$Mg_{3,66}Fe_{1,99}Al_1^{VI}Al_{1,5}^{IV}Si_{6,2}O_{22}(OH)_2$	254,5 ^b
Antofilliet (A)	$Mg_{4,88}Fe_{2,11}Al_0^{VI}Al_{0,15}^{IV}Si_{7,56}O_{22}(OH)_2$	265 ^c
Kianiet (K)	$Al_2^{VI}SiO_5$	44,1 ^a
Kwarts (Q)	SiO_2	22,7 ^a
Water (W)	H_2O	19,42 ^d

a Robie en Waldbaum (1968)

b Robinson en Jaffe (1969, Tabel 7)

c Greenwood (1963, p. 330)

d Waarde vir H₂O by 750°C en 0 Kb (Ernst, 1976, aanhangsel 5)

X Volumes is vir suiwer Mg-endlede

Chemografies kan twee verskillende tipes sisteme onderskei word, naamlik 'n niet-degeneratiewe sisteem waarin alle een-veranderlike reaksies deur die n-komponente in die sisteem beskryf word, en 'n degeneratiewe sisteem waarin een of meer van die een-veranderlike reaksies deur minder as n-komponent beskryf kan word. Laasgenoemde sisteem is in ooreenstemming met die gevalle waar twee of meer fases dieselfde samestelling in die betrokke sisteem besit, en die kolineariteit of koplanariteit van fases in die sisteem. Bo en behalwe die moontlikheid van degenerasie in 'n sisteem is die volgende twee tipes een-veranderlike reaksies ook moontlik: 'n Nie-termale reaksie vind plaas wanneer 'n gegewe verbindingslyn tussen twee fases metastabiel word ten opsigte

van 'n meer stabiele verbindingslyn. Al die fases is egter steeds stabiel in die sisteem. 'n Termale reaksie gee weer aanleiding tot die verdwyning of verskyning van 'n fase.

Met verwysing na figuur 79 is dit duidelik dat gedriet kolinieër is ten opsigte van kianiet en hipersteen. Die sisteem is dus degeneratief en betrek verder ook geen termale reaksies nie. Die gebalanseerde reaksies wat in ooreenstemming met die chemografiese verwantskappe in figuur 79 is word in tabel 56 gegee. Die ooreenstemmende hellings vir die reaksies (in bar/ $^{\circ}$ C) is bereken vir 'n temperatuur van 800° C en 'n druk van 8 Kb. Let daarop dat elke reaksie, in ooreenstemming met algemene gebruik (Zen, 1966), geïdentifiseer word deur middel van die fase, of fases, wat nie by die reaksie betrek is nie.

Tabel 56 Gebalanseerde reaksies en ooreenstemmende hellings in bar/ $^{\circ}$ C bereken vir 'n temperatuur van 800° C en 'n druk van 8 Kb.

Reaksies		$P_{H_2O} = P_s$	$P_{H_2O} < P_s$
[K]	$12,9 G + 12,4 A + 10,1 Q \rightarrow 10 C + 140,8 H + 25,3 W$	+ 48,10	$\approx \infty$
[A,C]	$1,75 G + 1,25 Q \rightarrow 10 H + 2,54 K + 1,75 W$	- 25,57	- 14,73
[G]	$1,85 A + 2,8 K + 0,35 Q \rightarrow 1,5 C + 10 H + 1,85 W$	+ 19,12	+ 27,3
[H]	$1,29 A + 3,67 K \rightarrow 1,24 G + 1 C + 0,72 Q + 0,05 W$	+ 6,45	+ 6,51

(Afkortings is in tabel 55 gegee.)

3.1.3 Konstruksie van een-veranderlike lyne

Die hellings van die een-veranderlike reaksies in tabel 56 is bereken deur gebruik te maak van die metode soos voorgestel deur Albee (1965b, p. 515-517). 'n Temperatuur van 800° C en 'n druk van 8 Kb is vir die doeleindes van hierdie berekening aanvaar. Die volgende aannames is gemaak:

- (i) Die volgende verwantskap is gebruik om die hellings van die reaksies te bereken:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta S}{\Delta V}$$

- (ii) Die entropieverandering (ΔS) vir die reaksie is uit twee dele saamgestel:

Die entropie van dehidrasie (ΔS_{H_2O}) = 570 dJ/mol graad. Hierdie waarde is ge-ekstrapoleer uit Fig. 33 (Fyfe, Turner en Verhoogen, 1958).

Die entropieverandering as gevolg van 'n verandering in die koördinasiegetal van Al is as 80 dJ/graad per atoom Al geneem wat van viervoudige na sesvoudige (of van sesvoudige na viervoudige) koördinasie verander.

- (iii) Die volumeverandering vir die reaksie (ΔV) is gebaseer op die verskil in molare volume van die soliede fases (Tabel 55), plus 'n volume van 19,42 cc per mol H_2O wat dehidreer (Tabel 55). Albee (1965b, p. 517) onderskei in hierdie opsig twee moontlike verwantskappe tussen P_{H_2O} en P_s (totale druk), naamlik $P_{H_2O} = P_s$ en $P_{H_2O} < P_s$. Die vergelykings wat gebruik is om die hellings vir die reaksielyste in tabel 56 te bereken kan as volg vir beide gevalle geskryf word:

Geval 1 ($P_{H_2O} = P_s$):

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta S}{\Delta V} = 570 \text{ dJ/graad} + \frac{\Delta S \left(Al^{VI} - Al^{IV} \right)}{\left(nH_2O \right)}$$

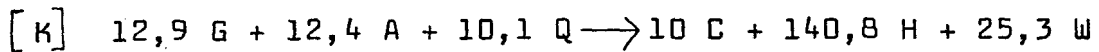
$$\frac{\Delta V \text{ solied}}{nH_2O} + 19,42$$

Geval 2 ($P_{H_2O} < P_s$):

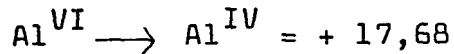
$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta S}{\Delta V} = 570 \text{ dJ/graad} + \frac{\Delta S \left(Al^{VI} - Al^{IV} \right)}{nH_2O}$$

$$\frac{\Delta V \text{ solied}}{nH_2O} + 6,7$$

Die volgende twee reaksies uit tabel 56 kan gebruik word om die berekeningsmetodes te illustreer:



$$\Delta V \text{ solied} = -162,12 \text{ cc}$$

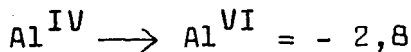


$$\therefore \Delta s = 570 + \frac{80 (17,68)}{25,3} \text{ dJ/graad}$$

$$dP/dT \text{ (Geval 1)} = +48,10 \text{ bar}^\circ\text{C}.$$



$$\Delta V \text{ solied} = -64,24 \text{ cc}$$

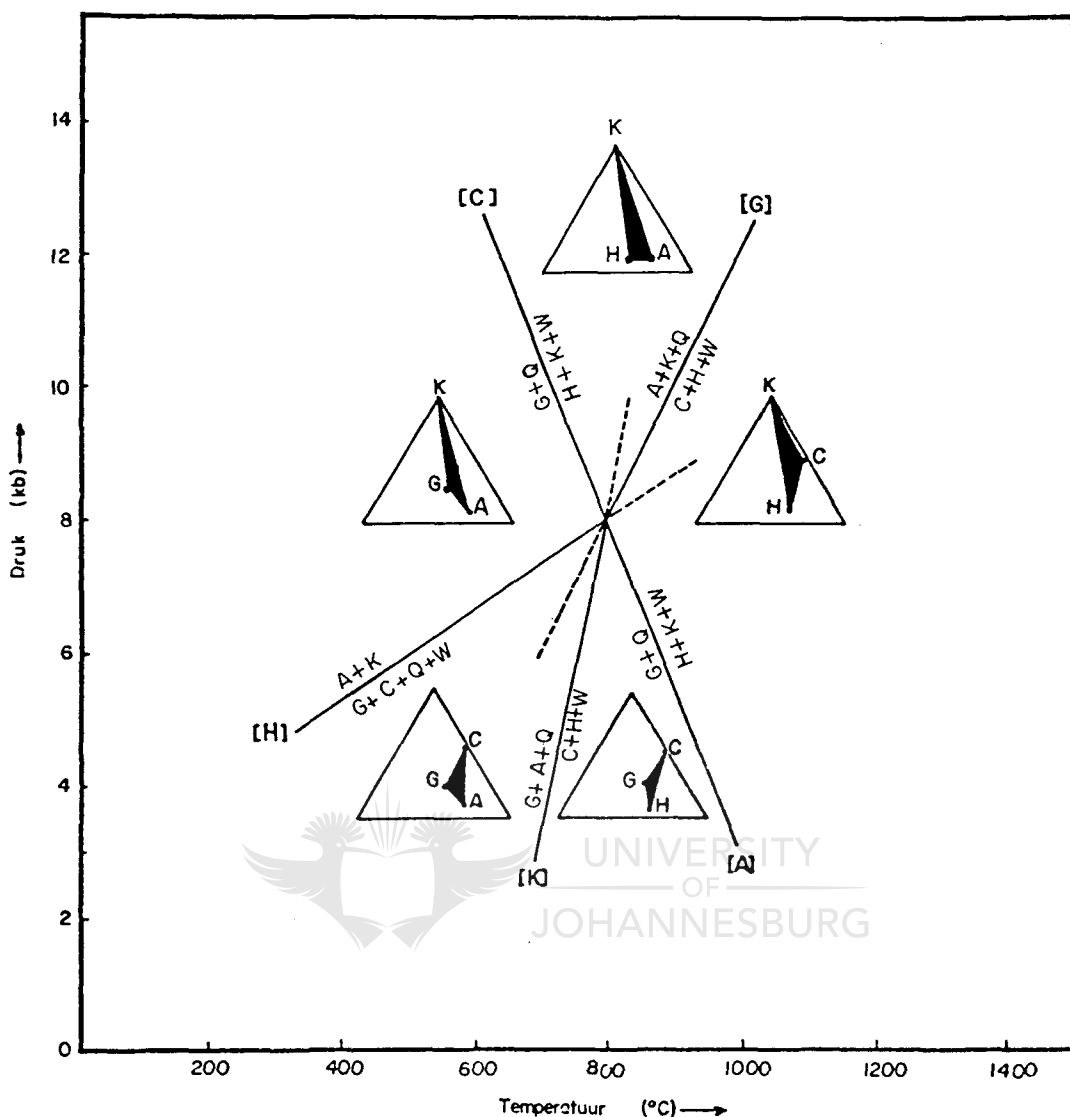


$$\therefore \Delta s = 570 + \frac{80 (-2,8)}{1,75} \text{ dJ/graad}$$

$$dP/dT \text{ (Geval 1)} = -25,57 \text{ bar}^\circ\text{C}$$

3.1.4 Konstruksie van die PT-diagram

Die reaksies in tabel 56 is almal as dehidrasiereaksies geskryf en die PT-diagram van figuur 80 is gekonstrueer met die aanname dat die reaksieversameling met die kleinste volume by hoër druk stabiel is, terwyl die versamelings met vry water by hoër temperatuur stabiel is. Die rangskikking van die een-veranderlike lyne om die geen-veranderlike punt is in ooreenstemming met Schreinemakers se reëls (Zen, 1966).



Figuur 80 : Schreinemaker's konstruksie vir die topologie van 'n gedeelte van die sisteem $\text{MgO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ wat die berekende hellings van die een-veranderlikelyne in tabel 56 illustreer. Die diagram is akkuraat ten opsigte van beide die temperatuur- en drukas geïntenteer. Afkortingswoord in tabel 55 gegee.

Let daarop dat die posisie van reaksies [A] en [C] aan weerskante van die geen-veranderlike punt in figuur 80 'n direkte gevolg is van die chemografiese verwantskappe in figuur 79 (kyk Zen, 1966, p. 35 en Fig. 18). Die een-veranderlike lyne in figuur 80 is korrek geïntenteer ten opsigte van beide die temperatuur en drukas, en die geen-veranderlike punt is by 'n temperatuur van 800°C en 'n druk van 8 Kb geplaas.

Die PT-diagram van figuur 80 is gekonstrueer met die aanname dat $P_{H_2O} = P_s$. Hierdie aanname is waarskynlik nie in ooreenstemming met natuurlike toestande in hoë-gradse metamorfe terreine waar daar gewoonlik aanvaar word dat $P_{H_2O} < P_s$ (Winkler, 1974). Die berekening van dP/dT vir laasgenoemde geval (Tabel 56) het egter nie 'n baie groot invloed op die helling van die meeste reaksielyste in figuur 80 nie. Die mees opvallende verskil is in die geval van lyn [K] waar die helling verander vanaf sterk positief na 'n helling van byna glad nie drukafhanklik is nie. Die aanname dat gedriet in figuur 79 kolinieër is ten opsigte van hipersteen en kianiet mag moontlik ook verkeerd wees. Hierdie aanname is gebaseer op die gemiddelde samestellings van gedriet en hipersteen in twee verskillende gesteentes langs die Ortopirokseenisograad (DR 157 en DV 3). Indien individuele analyses egter byvoorbeeld vir elk van bogenoemde monsters gebruik sou word stip gedriet net regs van die verbindingslyn tussen kianiet en hipersteen en die sisteem verander van degeneratief na nie-degeneratief. Hierdie moontlikheid het egter geen noemenswaardige invloed op die rangskikking en hellings van die een-veranderlike kurwes in die PT-diagram van figuur 80 nie. Die enigste verskil is dat reaksies [A] en [C] beide na termale reaksies verander met die helling van lyn [A] effens groter as dié van [C].

Die PT-diagram (Figuur 80) verskil van 'n soortgelyke diagram wat deur Vernon (1972, Fig. 7) gekonstrueer is om faseverwantskappe in gesteentes met identiese hidrasiereaksies te ondersoek. Die belangrikste verskille lê daarin dat Vernon 'n meer eenvoudige sisteem (die sisteem $MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$) gebruik het en slegs een ortoamfibool (gedriet) by die analise betrek het. Die voordeel van laasgenoemde benaderings is dat dit Vernon in staat gestel het om 'n eenvoudige reaksie vir die hidrasie van kordieriet te skryf. Hierdie reaksie (5 Kord+2 water \rightarrow 2 Gedr+6 Kian+7 kwarts) is volgens Vernon (1972, p. 131) in ooreenstemming met die teksturele en chemiese inligting vir die natuurlike gesteentes.

Daar is egter reeds in afdeling IX-3.1 gewys dat Vernon in werklikheid nie in staat was om 'n chemiese analise vir gedriet in die hidrasieprodukte van bogenoemde reaksie te verkry nie, en dat hierdie reaksie in 'n meer komplekse vorm geskryf moet word. Die aanvanklike hidrasiereaksie wat in die huidige ondersoek voorgestel word (10 Kord + 140,8 Hip + 25,3 Water \rightarrow 12,9 Ged + 12,4 Ant + 10,1 Kwarts) is moontlik ook nie baie realisties nie. Die voordeel van die huidige benadering is egter dat dit moontlik is om die stabiliteitsverwantskappe van antofilliet, gedriet en kianiet in dieselfde gesteente te ondersoek.

3.2 BESPREKING VAN DIE METAMORFE TOESTANDE TYDENS DIE OORGANG VAN M_2 NA M_3 MET VERWYSING NA DIE TEORETIESE PT-DIAGRAM VAN FIGUUR 80

Vir die doeleindes van hierdie bespreking word daar aanvaar dat die konstruksie van die PT-diagram (Fig. 80) nie baie afwyk van die werklike faseverwantskappe langs die Ortopirokseenreaksie-isograad nie, en dat hierdie diagram dus as 'n raamwerk gebruik kan word om die ooreenstemmende metamorfe toestande te ondersoek.

Die minimum temperatuurtoestande voordat hidrasie langs die isograad 'n aanvang geneem het word deur lyn [k] in figuur 80 gedefinieer. Die aanvanklike hidrasiereaksie, [k] $10\text{ C} + 140,8\text{ H} + 25,3\text{ W} \rightarrow 12,9\text{ G} + 12,4\text{ A} + 10,1\text{ Qz}$, kon dus plaasgevind het as gevolg van 'n daling in temperatuur of 'n styging in druk indien water beskikbaar was. Die steil positiewe helling van lyn [k] is egter 'n aanduiding dat temperatuur op hierdie stadium 'n groter rol gespeel het, en dat hidrasie aanvanklik plaasgevind het as gevolg van 'n daling in temperatuur by min of meer konstante druk. Dit beteken natuurlik dat die oorgang van die tweede na die derde periode van metamorfose as 'n ware retrograadproses beskou moet word.

Die daling in temperatuur het grotendeels na die M_2 -granulietgraad van metamorfose plaasgevind en gevolglik was die PT-toestande langs die M_3 -Ortopirokseenreaksie-isograad hoofsaaklik beperk tot die twee-veranderlike veld tussen lyn [H] en [K] in figuur 80. Die totale verdwyning van kordiëriet en hipersteen met oorgang na die Ortoamfibool-sone kon egter nie slegs te wyte gewees het aan 'n daling in temperatuur nie. Die vlak positiewe helling van lyn [H] is in hierdie opsig 'n aanduiding dat hierdie oorgang ook deur 'n styging in druk beheer is. Hierdie voorgestelde styging in druk is egter nie gekoppel aan 'n toename in totale druk (P_g) nie maar wel aan 'n styging in waterdruk (P_{H_2O}).

Bogenoemde rekonstruksie van die metamorfe toestande tydens die oorgang van die Ortopirokseensone na die Ortoamfibool-sone is uitsluitlik gebaseer op 'n teoretiese analise van faseverwantskappe langs die Ortopirokseenreaksie-isograad. Die vraag is egter of hierdie voorgestelde metamorfe ontwikkeling enigsins verband hou met die beskikbare veld- en chemiese inligting, asook gepubliseerde inligting vir die stabiliteit van kordiëriet+granaat+hipersteen (Hensen en Green, 1972, 1973), antofilliet (Greenwood, 1963) kordiëriet+ortoamfibool+kianiet+kwarts en ortoamfibool+kianiet+kwarts (Green en Vernon, 1974).

3.2.1 Veld- en chemiese inligting

Die beskikbare petrografiese en chemiese inligting is 'n positiewe bewys dat die oorgang van die Ortopirokseensone na die Ortoamfibool-sone gekenmerk word deur reaksies waarin kordiëriet en hipersteen hidreer om ortoamfibool en kianiet te vorm. In die voorafgaande bespreking is daar voorgestel dat hierdie hidrasiereaksies hoofsaaklik deur variasies in T en μ_{H_2O} beheer is, terwyl druk 'n ondergeskikte of geen rol gespeel het nie. Hierdie model kan vervolgens aan die

hand van bogenoemde fisiese veranderlikes ondersoek word:

Die voorstel dat druk nie 'n belangrike rol gespeel het nie word eerstens ondersteun deur die stabiliteit van kordiëriet, granaat en hipersteen in die Ortopirokseensone. Die detail ondersoek van die faseverwantskappe van bogenoemde minerale, en die waargenome sistematiese verplasing van die ooreenstemmende 3-fasevelde in AFM-diagramme in die rigting van Fe-verryking (Fig. 66b) is reeds volledig in Afdeling VIII-2.3.4 bespreek. Hierdie inligting is 'n goeie aanduiding dat die reaksie granaat+kwarts \rightleftharpoons kordiëriet+hipersteen hoofsaaklik deur 'n afname in druk beheer is. Indien daar dus aanvaar sou word dat druk ook 'n belangrike rol in die hidrasiereaksies langs die Ortopirokseenisograad gespeel het beteken dit dat die druk weer op 'n latere stadium toegeneem het (Fig. 80). So 'n voorstel is sekerlik nie realisties nie en is buitendien ook nie in ooreenstemming met die waarneming dat samebestaande antofilliet en gedriet meer Fe-ryk word met oorgang van die Ortopirokseenisograad na die Ortoamfiboolzone (Fig. 77).

Die voorgestelde rol van temperatuur en μ_{H_2O} hou egter direk verband met die goed gedefinieerde en regionale karakter van die M_3 -Ortopirokseenisograad. Vernon (1972) het byvoorbeeld na aanleiding van 'n petrografiese en chemiese ondersoek van soortgelyke gesteentes met identiese hidrasiereaksies voorgestel dat die reaksies plaasgevind het as gevolg van 'n styging in die fugasiteit van water by konstante temperatuur en druk. In die geval van die huidige ondersoek sou dit egter beteken dat P_{H_2O} skielik en sistematies langs 'n goed gedefinieerde vlak² in die aardkors gestyg het. Dit is meer realisties om te aanvaar dat die oorgang van die tweede na die derde periode van metamorfose deur 'n kombinasie van dalende temperatuur en toenemende waterdruk beheer is.

Die algemene gevolgtrekking is dus dat die voorgestelde PT-diagram van figuur 80 wel met 'n groot mate van sukses as

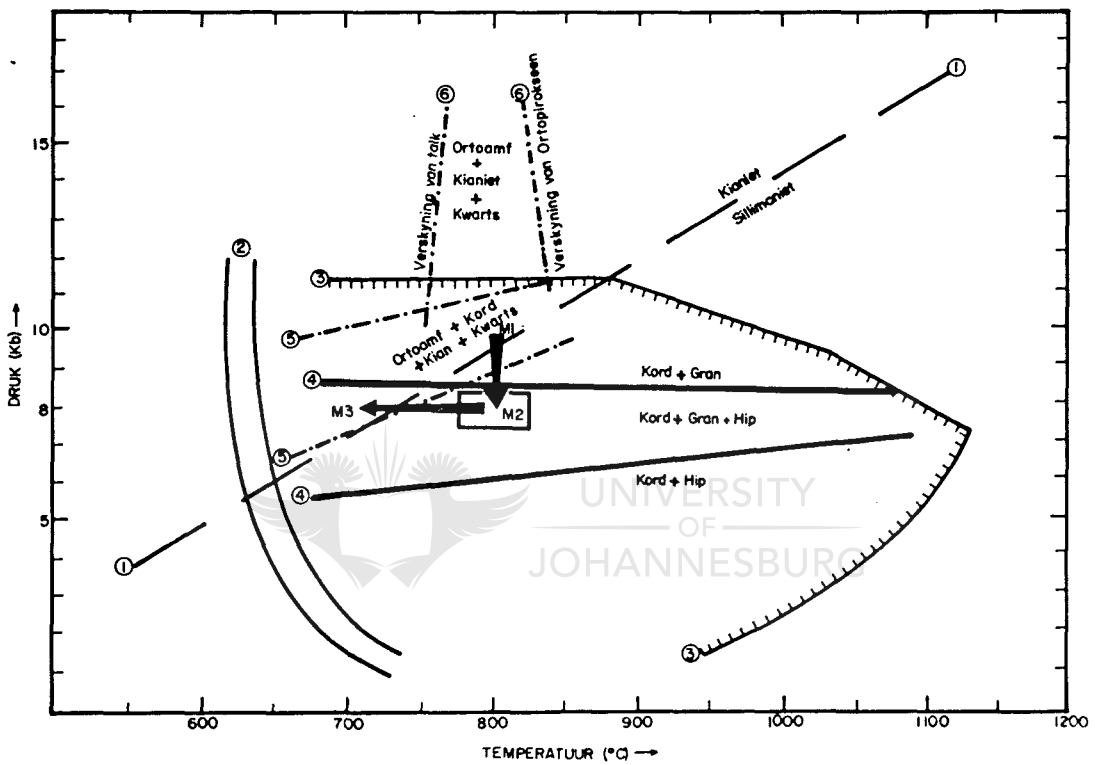
'n raamwerk gebruik kan word om die metamorfe toestande tydens die oorgang van die M_2 -Ortopirokseensone na die M_3 -Ortoamfiboolsone te ondersoek.

3.2.2 Eksperimentele inligting

Die berekende temperatuur en druk vir die stabiliteit van kordiëriet+granaat+hipersteen in die granaatgranoliet, en ortopirokseen+klinopirokseen in die hipersteen-ougiet-granoliet. is 'n aanduiding dat die versameling kordiëriet+hipersteen+ortoamfibool+kianiet langs die Ortopirokseen-isograad stabiel is by 'n maksimum druk van 8-9 Kb en 'n temperatuur in die omgewing van 800°C indien water beskikbaar is (Tabel 54). Die stabiliteit van bogenoemde mineraalversameling kan egter ook aan die hand van onafhanklike eksperimentele inligting ondersoek word.

Die hidrasiereaksie $5 \text{ kordiëriet} + 2 \text{ water} \rightarrow 6 \text{ kianiet} + 7 \text{ kwarts} + 2 \text{ ortoamfibool}$ is eksperimenteel deur Green en Vernon (1974) ondersoek. Natuurlike mineraalversamelings is in hierdie ondersoek gebruik. Die eksperimentele resultate word in die PT-diagram van figuur 81 gegee en kan kortliks as volg opgesom word:

- (i) Gemiddelde samestellings van XMg 93 en XMg 80 is onderskeidelik vir kordiëriet en ortoamfibool gebruik. Die gemiddelde samestelling van die gesteente (kordiëriet+ortoamfibool+kianiet+kwarts) is ongeveer XMg 87.
- (ii) Kordiëriet+ortoamfibool+kianiet+kwarts is stabiel binne 'n beperkte PT-veld. Hierdie twee-veranderlike veld besit 'n maksimum wydte van 2,7 Kb by 740°C en 1,9 Kb by 860°C .
- (iii) Die vlak positiewe helling van die twee-veranderlike veld (ongeveer $+ 12 \text{ bar}/^{\circ}\text{C}$), en die beperkte wydte



Figuur 81: PT-diagram met toepaslike eksperimentele inligting en voorgestelde verandering in PT-toestande met oorgang vanaf die M_2 -Ortopirokseensone na die M_3 -Ortoamfiboolsone. Lyne 1, 2, 3 en 4 is dieselfde as in Figuur 78. Lyn 5: Stabiliteitsveld vir ortoamfibool + kordieriet + kianiet + kwarts in pelitiese gesteentes met $MgO/MgO+FeO = \pm 0,87$ (Green en Vernon, 1974). Lyn 6: Stabiliteitsveld vir ortoamfibool + kianiet + kwarts in pelitiese gesteentes met $MgO/MgO+FeO = \pm 0,87$ (Green en Vernon, 1974). Die PT-veld vir die M_2 -Ortopirokseensone is uit Figuur 78 oorgedra. Die pyle dui die voorgestelde rigting van veranderende PT-toestande vanaf M_1 tot M_3 aan (Afd. XI).

van hierdie veld, is 'n aanduiding dat die versameling kordiëriet+ortoamfibool+kianiet+kwarts as 'n goeie geobarometer gebruik kan word.

- (iv) Die laer temperatuurgrens van die twee-veranderlike veld by 740°C word deur die verskyning van talk gedefinieer, terwyl die verskyning van hipersteen die hoër temperatuurgrens by 860°C definieer.
- (v) Die versameling ortoamfibool+kianiet+kwarts is beperk tot 'n wigvormige PT-veld met 'n minimum druk van ongeveer 10,5 Kb by 740°C en 11,3 Kb by 850°C .

Green en Vernon (1974) het op grond van bogenoemde resultate, en gepubliseerde inligting vir die stabiliteit van antofilliet (Greenwood, 1963) en kordiëriet+hipersteen (Hensen en Green, 1973), tot die gevolgtrekking gekom dat die hidrasie van kordiëriet in die hoë-gradse metamorfe gesteentes van die Arunta kompleks in Australië plaasgevind het as gevolg van 'n styging in die fugasiteit van water by 'n minimum druk van 8-9,5 Kb en 'n temperatuur van $750-820^{\circ}\text{C}$. Lee en Holdaway (1976) het 'n termodinamiese benadering gebruik om te wys dat die eksperimenteelbepaalde minimum druk van 8-9,5 Kb waarskynlik 1 Kb te laag is en dat die PT-interval waarin kordiëriet+ortoamfibool+kianiet+kwarts in figuur 81 stabiel is 'n maksimum wydte van slegs 0,65 Kb by 750°C en 0,7 Kb by 850°C het.

Die hidrasie van hipersteen na antofilliet in die kordiëriet-vrye granaatgranoliete langs die Ortopirokseenisograad kan as verdere inligting vir die maksimum temperatuur van metamorfose gebruik word. Die eksperimentele ondersoek van die stabiliteit van suiwer Mg-antofilliet (Greenwood, 1963) is 'n aanduiding dat enstatiet, kwarts en water by temperatuur minder as 820°C , en tot by 'n druk van 12 Kb, kan reageer om antofilliet te vorm. Die natuurlike minerale (antofilliet en hipersteen) in die huidige ondersoek bevat egter aluminium en yster (monster DV 38, Tabela 18c en 25a). Die teenwoordigheid van hierdie bykomstige elemente

in die sisteem sal die eksperimentele resultate van Greenwood beïnvloed en die hidrasiekurve vir hipersteen na laer temperature verplaas.

Die invloed van Fe^{+2} op die stabiliteit van antofilliet kan by benadering geëvalueer word deur gebruik te maak van gepubliseerde eksperimentele resultate vir die stabiliteit van Fe-Mg amfibole by 'n waterdruk van 2 Kb (Popp, e.a., 1977). Chemiese analises vir hipersteen en antofilliet in monster DV 38 (Fig. 14b, Tabela 18c en 25a) gee die volgende waardes vir XMg : antofilliet = 68,8; hipersteen = 66,5. Indien hierdie waardes en figuur 6 van Popp, e.a., (1977) gebruik word is dit 'n aanduiding dat antofilliet in monster DV 38 stabiel is by 'n minimum temperatuur van ongeveer 730°C.

Die beskikbare eksperimentele inligting van Green en Vernon (1974), Greenwood (1963) en Popp, e.a. (1977) is dus 'n aanduiding dat kordiëriet+hipersteen+antofilliet+kianiet+kwarts stabiel is by 'n temperatuur en druk van 730-820°C en 8-9,5 Kb. Hierdie temperatuur- en drukinterval stem redelik goed ooreen met die waardes van 780-820°C en 7,6-8,5 Kb wat in hierdie ondersoek voorgestel is vir die stabiliteit van kordiëriet+granaat+hipersteen en ortopirokseen+klinopirokseen+plagioklaas in die Ortopirokseensone (Tabel 54). Die eksperimentele inligting van Green en Vernon (1974) vir die stabiliteit van ortoamfibool+kianiet+kwarts is egter glad nie in ooreenstemming met die beskikbare inligting uit hierdie ondersoek nie. Laasgenoemde versameling verteenwoordig die hoofewig in die M_3 -Ortoamfiboolsone, en indien die eksperimentele inligting aanvaar word beteken dit dat ortoamfibool+kianiet+kwarts stabiel is by 'n minimum druk en temperatuur van 10,5 Kb en 740°C (Fig. 81). 'n Minimum druk van 10,5 Kb kan egter nie 'n realistiese waarde wees nie want dit plaas bogenoemde versameling geheel en al in die stabiliteitsveld van kianiet (Fig. 81) en verhoed dus die stabiele assosiasie van sillimaniet met ortoamfibool. Laasgenoemde versameling (sonder

kordiëriet) word egter algemeen in die literatuur beskryf (Rabbit, 1948, Tabel 13; Lal en Moorhouse, 1969, Tabel 1; Robinson en Jaffe, 1969b, Tabel 1). Daar moet egter ook in gedagte gehou word dat die eksperimentele inligting van Green en Vernon (1974) slegs van toepassing is op Mg-ryke minerale en gesteentes, en dat die eksperimenteelbepaalde druk waarskynlik heelwat laer sal wees vir meer Fe-ryke versamelings. XMg vir die twee betrokke monsters in hierdie ondersoek wissel byvoorbeeld tussen 60 en 64 (DR 157 en DV 3, Tabel 7d), teenoor 'n waarde van 87 in die geval van die eksperimentele samestelling.

3.3 SAMEVATTING VAN DIE STABILITEITSVERWANTSKAPPE VAN KRITIESE MINERAALVERSAMELINGS TYDENS DIE DERDE PERIODE VAN METAMORFOSE

3.3.1 Die versameling kordiëriet+hipersteen+antofilliet+gedriet+kianiet+kwarts

Die stabiliteitsverwantskappe van bogenoemde mineraalversameling langs die Ortopirokseenisograad kan met verwysing na figure 80 en 81 bespreek word.

Die berekende PT-toestande vir die stabiliteit van kordiëriet +granaat+hipersteen, en ortopirokseen+klinopirokseen+plagioklaas in die Ortopirokseensone word met behulp van die omlýnde veld in figuur 81 aangedui. Hierdie inligting kan as 'n basis gebruik word vir die bespreking van die PT-toestande wat aanleiding gegee het tot die hidrasie van kordiëriet en hipersteen langs die Ortopirokseenisograad. Die volgende beperkings moet hier in gedagte gehou word:

- (i) Kordiëriet en hipersteen vorm 'n stabiele assosiasie in die Ortopirokseensone binne 'n temperatuur- en drukinterval van 780-820°C en 7,6-8,5 Kb.

- (ii) Hierdie PT-toestande plaas die metamorfose in die Ortopirokseensone binne die stabiliteitsveld van sillimaniet. Die teenwoordigheid van sillimaniet in die Leukokratiese graniet in die groef by Bandelierkop ondersteun hierdie voorstel.
- (iii) Die hidrasie van kordiëriet het egter in die stabiliteitsveld van kianiet plaasgevind, en kianiet is ook 'n kenmerkende bestanddeel van die ortoamfiboolgneisse in die Ortoamfiboolsone.
- (iv) Die hidrasie van hipersteen, en die samestelling van antofilliet in die kordiërietvrye granaatgranoliete is 'n aanduiding dat antofilliet by 'n minimum temperatuur van ongeveer 730°C langs die Ortopirokseenisograad ontwikkel het.

Met verwysing na lyn [K] in figuur 80 is dit duidelik dat die hidrasie van kordiëriet deur stygende druk of dalende temperatuur beheer is. 'n Voorgestelde toename in druk met oorgang van die Ortopirokseensone na die Ortoamfiboolsone is egter nie in ooreenstemming met die beskikbare inligting nie, en gevolglik word daar aanvaar dat die hidrasie van kordiëriet langs die M_3 -Ortopirokseenisograad hoofsaaklik beheer is deur 'n daling in temperatuur wat gepaard gegaan het met toenemende waterdruk ($P_{\text{H}_2\text{O}}$) by konstante totale druk (P_s).

Die grootte orde van hierdie voorgestelde afname in temperatuur is afhanklik van die waardes wat vir temperatuur en druk aanvaar word voordat hidrasie 'n aanvang geneem het. Indien 'n temperatuur van 800°C en 'n druk van 8 Kb vir die PT-toestande in die Ortopirokseensone aanvaar word beteken dit met verwysing na figuur 81 dat die hidrasiereaksies langs die isograad by 'n minimum temperatuur van 730°C plaasgevind het. Hierdie voorgestelde temperatuur is slegs geldig indien Richardson e.a. (1969) se eksperimentele inligting vir die inversie van sillimaniet na kianiet gebruik word. Dit is egter interessant om daarop te let dat 'n temperatuur

van 730°C by 8 Kb druk presies in ooreenstemming is met die berekende temperatuur vir die ontwikkeling van antofilliet (XMg = 68,8) as gevolg van die hidrasie van hipersteen (XMg = 66,5) langs die Ortopirokseenisograad (Afd. X-3.2.2).

Die beskikbare eksperimentele en veldinligting is dus 'n aanduiding dat die hidrasie van kordiëriet en hipersteen in die granaatgranoliet langs die Ortopirokseenisograad by 'n minimum temperatuur en druk van ongeveer 730°C en 8 Kb plaasgevind het. Hierdie waardes stem redelik goed ooreen met die eksperimentele resultate van Green en Vernon (1974) vir die hidrasie van kordiëriet in soortgelyke gesteentes van die Arunta kompleks in Australië. Dit is ook interessant om daarop te let dat die assosiasie kordiëriet+hipersteen+ortoamfibool+kianiet+kwarts in hierdie ondersoek beperk is tot die onmiddellike omgewing van die Ortopirokseenreaksie-isograad. Hierdie mineraalversameling besit dus 'n baie beperkte stabiliteitsveld in hoë-gradse pelitiese metamorfe gesteente en behoort nie 'n algemene verskynsel in die natuur te wees nie. Hierdie voorstel is in goeie ooreenstemming met die termodinamiese inligting van Lee en Holdaway (1976) wat 'n aanduiding is dat kordiëriet+hipersteen+ortoamfibool+kianiet 'n meer beperkte stabiliteitsveld in figuur 81 besit as wat deur die eksperimentele resultate van Green en Vernon (1974) aangedui word.

Die beskikbare eksperimentele en veldinligting vir die stabiliteit van kordiëriet+hipersteen+ortoamfibool+kianiet+kwarts in pelitiese metamorfe gesteentes stem dus goed ooreen met die geometriese analise van faseverwantskappe in die granaatgranoliet langs die Ortopirokseenisograad (Fig. 80). Hierdie inligting is dus 'n verdere aanduiding dat die keuse van komponente en fases wat vir hierdie konstruksie gebruik is goed ooreenstem met die natuurlike mineraalversamelings en ooreenstemmende fisiese toestande langs hierdie isograad. Die waargenome sistematiese variasie in die samestelling van granaat (Fig. 24) en biotiet (Fig. 33) met oorgang van M_2 na M_3 is laastens ook

in ooreenstemming met die voorstel dat die goed gedefinieerde regionale karakter van die Ortopirokeenreaksie-isograad nie slegs deur 'n toename in P_{H_2O} beheer is nie maar dat temperatuur ook 'n bepaalde rol gespeel het.

3.3.2 Die versameling antofilliet+gedriet+kianiet+kwarts

Die voorgestelde minimum temperatuur van 730°C en 8 Kb druk langs die Ortopirokeenisog~~ra~~ad plaas 'n beperking op die maksimum PT-toestande waarby ortoamfibool en kianiet in die Ortoamfiboolsones stabiel is. Hierdie PT-toestande is heelwat laer as die eksperimentele resultate van Green en Vernon (1974) vir die stabiliteit van bogenoemde mineraalversameling. Dit lyk dus nie asof Green en Vernon se eksperimentele werk direk van toepassing is op die natuurlike mineraalversamelings in die huidige ondersoek nie. Die teenwoordigheid van sillimaniet in monster DV 45 van die Ortoamfiboolsones is in hierdie opsig ook 'n aanduiding dat die ooreenstemmende fisiese toestande van metamorfose nie ver verwyder kan wees van die inversiekurwe vir sillimaniet na kianiet in die PT-diagram van figuur 81 nie.

Die stabiliteitsverwantskappe van antofilliet en gedriet in hierdie ondersoek is dus 'n aanduiding dat samebestaande ortoamfibole 'n algemene verskynsel in hoë-graadse metamorfe terreine in gesteentes met 'n geskikte chemiese samestelling behoort te wees. Dit is so omdat die ontmengingsveld in die antofilliet-gedrietreeks (Fig. 38) blykbaar binne die hele PT-interval bestaan waarby antofilliet (en gedriet) stabiel is. Die gebrek aan gepubliseerde inligting vir samebestaande ortoamfibole in metamorfe gesteentes is waarskynlik ten dele te wyte aan die feit dat antofilliet en gedriet nie maklik in slypplaatjies onderskei kan word nie.

AFDELING X1

SAMEVATTENDE MODEL

VIR DIE

TEKTONO-METAMORFE

GESKIEDENIS VAN DIE

LIMPOPO-METAMORFEKOMPLEKS

SUID VAN DIE

SOUTPANSBERGE



Die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfekompleks beslaan 'n blootgestelde oppervlakte van nagenoeg 10,000 Km² (Fig. 1 en 2) suid van die Soutpansberge en bestaan onder andere uit hoë-gradse metamorfe gesteentes van die Bandelierkop-Formasie wat onderhewig was aan 'n komplekse tektono-metamorfe geskiedenis wat ongeveer 2 600 m.j. gelede ten einde geloop het.

Hierdie gebied was voor die aanvang van die huidige ondersoek gekenmerk deur 'n byna algehele gebrek aan detail geologiese waarnemings ten opsigte van die verspreiding van die verskillende litologiese eenhede, strukture en metamorfose. In die voorafgaande afdelings is die Pelitiese en Mafiese gneisse van die Bandelierkop-Formasie as 'n basis geneem om die verskillende aspekte van die metamorfe geskiedenis van hierdie gebied uit 'n sistematiese petrochemiese oogpunt te beskryf.

Die doel van hierdie afdeling is om die meer belangrike petrografiese en chemiese aspekte van hierdie voorgestelde metamorfe ontwikkeling saam te vat en om hierdie inligting in verband te bring met die tektoniese geskiedenis van die gebied soos voorgestel deur Du Toit (in voorbereiding). Die afdeling word afgesluit met 'n kort bespreking van die definisie en karakter van die oorgang vanaf die metamorfekompleks na die graniet-groensteenterrein van die Kaapvaal-kraton.

2. ASPEKTE VAN DIE METAMORFE ONTWIKKELING VAN DIE LIMPOPO-METAMORFEKOMPLEKS SUID VAN DIE SOUTPANSBERGE

2.1 REGIONALE VERSPREIDING VAN METAMORFE SONES

Die regionale verspreiding van metamorfe sones word baie akkuraat deur sistematiese variasies in die mineralogie

van veral die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie gedefinieer (Fig. 2). Die toename in die graad van metamorfose vanaf die suide na die noorde word in hierdie gesteentes weerspieël deur die verdwyning van ortoamfibool wat gepaard gaan met die verskyning van kordiëriet en hipersteen langs die Ortopirokseenreaksie-isograad. Hierdie isograad verteenwoordig die mees opvallende metamorfe verskynsel in die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfekompleks en onderverdeel hierdie gebied in 'n Ortoamfiboolsone in die suide en 'n Ortopirokseensone in die noorde. Die isograad sny oor die strekking en struktuurgrein van die verskillende litologiese eenhede van die Bandelierkop-Formasie en kan vir 'n afstand van meer as 145 km van die weste na die noordooste gevolg word (Fig. 2). Die Ortoamfiboolsone vernou van die ooste na die weste (Fig. 2) wat 'n aanduiding is dat die helling van die Ortopirokseenisograad ook steiler word in dieselfde rigting. Die suidelike grens van die Ortoamfiboolsone word gedefinieer deur 'n isograad waarlangs ortoamfibool vir die eerste keer in die Pelitiese gneis verskyn. Die posisie van hierdie isograad in figuur 2 is egter tentatief en kon nie akkuraat bepaal word nie as gevolg van die byna algehele gebrek aan dagsome.

2.2 OPEENVOLGENDE PERIODES VAN METAMORFOSE

Die komplekse metamorfe geskiedenis van die Limpopo-metamorfekompleks suid van die Soutpansberge word duidelik deur die teenwoordigheid van goed gedefinieerde metamorfe reaksies in die Pelitiese gneis van die Bandelierkop-Formasie geïllustreer. Die detail petrochemiese ondersoek van hierdie gesteentes het bewyse gelewer vir die teenwoordigheid van drie periodes van isochemiese metamorfose wat volledig in terme van een prograad (M_1) en twee retrograadepisodes (M_2 en M_3) beskryf kan word. Effekte van die eerste (M_1) en tweede (M_2) periodes van hoë-gradse metamorfose word op die huidige slegs in die Ortopirokseensone waargeneem,

terwyl die effekte van die derde (M_3) periode van laergraadse metamorfose weer hoofsaaklik beperk is tot die huidige Ortoamfiboolzone.

Die belangrikste petrografiese en chemiese aspekte van hierdie voorgestelde metamorfe ontwikkeling kan kortliks as volg saamgevat word:

2.2.1 Metamorfe reaksies in die Ortopirokseensone

Die mees opvallende en wydverspreide reaksie in die Ortopirokseensone word verteenwoordig deur die ontwikkeling van koronateksture in die kordiëriet-granaatgranoliete waarin granaat deur 'n simplektitiese vergroeiing van kordiëriet en hipersteen vervang word (Afd. IV-1.2.1.1, Fig. 11a-c). Die groot verskil in korrelgrootte tussen hipersteen van die koronateksture en hipersteen in die matriks van die gesteentes is 'n aanduiding van die teenwoordigheid van meer as een generasie van hierdie mineraal. Hierdie voorstel word ondersteun deur die teenwoordigheid van die chemies verskillende kordiërietvrye granaatgranoliete ($X_{Mg} = < 0,59$) wat gekenmerk word deur die stabiele assosiasie van granaat en hipersteen.

Die koronateksture is opvallend meer fynkorrelrig as die res van die gesteentes (wat uit hipersteen, biotiet, kwarts en veldspaat bestaan) en vertoon ook geen verwantskap met die maaksel van die gesteentes nie. Laasgenoemde maaksel word gekenmerk deur 'n onreëlmatige gneisseuse tekstuur wat veroorsaak word deur wurmagtige hipersteen wat radiaal vanaf granaat in alle rigtings met kordiëriet vergroei is (Afd. IV-1.2.1.1, Fig. 11b). Hierdie kruisgewyse teksture is dus 'n aanduiding dat die ontwikkeling van die koronateksture of moontlik na-tektonies is, of verband hou met 'n stadium tussen twee opeenvolgende periodes van vervorming.

Die daaropvolgende aanvanklike hidrasie van kordiëriet in

hierdie koronateksture (Afd. IV-1.2.1.5, Fig. 13b en c) is 'n aanduiding van geleidelike veranderende fisiese toestande in die Ortopirokseensone.

Die Ortopirokseensone vertoon dus duidelike tekens van ten minste twee onafhanklike periodes van granuliet-graad van metamorfose. Die eerste (M_1) periode was gekenmerk deur die stabiele asosiasie van granaat+hipersteen (wat huidig deur die teenwoordigheid van die kordiërietvrye granaat-granoliete weerspieël word) wat opgevolg is deur 'n tweede (M_2) periode van metamorfose waartydens granaat vervang is deur kordiëriet en 'n tweede generasie van hipersteen. M_2 was nie 'n lokale verskynsel nie maar het aanleiding gegee tot die stabiele assosiasie van kordiëriet+granaat+hipersteen oor 'n gebied van ten minste 4 500 km² binne die huidige Ortopirokseensone (Afd. VI-Fig. 22).

2.2.1.1 Ewewigsaspekte en ooreenstemmende PT-toestande tydens M_2

Die reaksie granaat+kwarts \rightleftharpoons kordiëriet+hipersteen word deur 'n gly-ewewig gekenmerk en gee dus aanleiding tot die twee-veranderlike stabiliteitsverwantskappe van kordiëriet+granaat+hipersteen binne 'n beperkte PT-interval. Die wydte van hierdie PT-interval is 'n funksie van die MgO/MgO+FeO (mol)-verhouding van die gesteentes (Afd. VIII-Fig. 68). Die algemene neiging tot wydverspreide chemiese ewewig onder konstante temperatuurtoestande gedurende die ontwikkeling van die koronateksture in die Ortopirokseensone as gevolg van hierdie reaksie word duidelik geïllustreer deur die reëlmatige verdeling van MgO en FeO tussen die geassosieerde ferro-magnesiese minerale (Afd. VII, Fig. 49, 50 en 52). Die detail ondersoek van die faseverwantskappe van kordiëriet+granaat+hipersteen in hierdie koronateksture aan die hand van 'n AFM-topologie (Afd. VIII-Fig. 66a-c), en die sistematiese verplasing van die kordiëriet-granaat-hipersteen 3-

fasevelde in die rigting van F in hierdie figure, is 'n aanduiding dat elke individuele mineraalversameling (en dus gesteente) 'n toestand van chemiese ewewig onder verskillende eksterne druktoestande bereik het. Die moontlike verspreiding van drukgradiënte gedurende M_2 in die Ortopirokseensone word in figuur 72 (Afd. VIII) geïllustreer.

Hierdie reaksie is egter nie slegs 'n funksie van veranderende druktoestande in die Ortopirokseensone nie maar word ook deur die $MgO/MgO+FeO$ (mol)-verhouding van die verskillende tipes granaatgranoliete beheer (Afd. VIII-Fig. 63). Die afwesigheid van kordiëriet (en dus van die reaksie) in die kordiërietvrye granaatgranoliete met XMg -waarde kleiner as 0,59 is dus uitsluitlik 'n funksie van die chemiese samestelling van hierdie gesteentes. Kordiëriet+granaat vorm 'n stabiele assosiasie in die kordiëriet-granaatgranoliete met XMg -waardes tussen 0,59 en 0,70 terwyl die granaatvrye kordiërietgranoliete, met XMg -waardes groter as 0,70, weer deur die afwesigheid van granaat gekenmerk word. Die totale verdwyning van granaat (en dus die volledige verloop van die gly-reaksie) in laasgenoemde gesteentes word dus deur beide die chemiese samestelling en die fisiese toestande van metamorfose beheer. Met verwysing na die relatiewe posisie van die PT-interval waarin kordiëriet+granaat+hipersteen 'n stabiele assosiasie in gesteentes met verskillende XMg -waardes vorm (Afd. VIII-Fig. 68) is dit duidelik dat die gly-reaksie vroeër (en by 'n hoër druk) in die granaatvrye gesteentes 'n aanvang geneem het en reeds volledig verloop het op 'n stadium toe kordiëriet+granaat steeds 'n stabiele assosiasie in die kordiëriet-granaatgranoliete by 'n laer druk gevorm het.

Die ontwikkeling van kordiëriet+hipersteen tydens M_2 kan dus beskou word as 'n retrograadproses wat plaasgevind het as gevolg van 'n afname in druk en wat gekoppel is aan 'n ware deurlopende reaksie. Die berekening van die ooreenstemmende PT-toestande aan die hand van Currie (1971) se termodinamiese model vir samebestaande kordiëriet+granaat is 'n aanduiding dat die reaksie granaat+kwarts \rightleftharpoons kordiëriet+hipersteen

plaasgevind het binne 'n PT-interval van 7,6 tot 8,5 Kb en 780-820°C. Hierdie berekende PT-toestande word ondersteun deur onafhanklike veld- en eksperimentele inligting asook deur die teenwoordigheid van samebestaande hipersteen+ougiet+plagioklaas in die hipersteen-ougietgranoliete. Die tweede periode van granuliet-graad van metamorfose het dus by 'n diepte van nagenoeg 27 Km plaasgevind wat 'n aanduiding is van 'n geotermale gradiënt in die orde van 30°C/Km.

2.2.2 Metamorfe reaksies langs die Ortopirokseensone-reaksie-isograad

Hierdie isograad word deur hidrasiereaksies gedefinieer waarin beide kordiëriet en hipersteen hidreer om antofilliet, gedriet en kianiet te vorm (Afd. IV, Fig. 14). Hipersteen en antofilliet vorm 'n stabiele assosiasie binne 'n baie beperkte PT-interval langs die isograad en hierdie isograad kan dus as 'n klassieke reaksie-isograad beskou word. Die hidrasie van hipersteen na antofilliet is in beide die kordiërietryke en kordiërietryke granoliete waargeneem, terwyl die hidrasie van kordiëriet na gedriet+kianiet natuurlik beperk is tot die kordiërietryke granoliete. Laasgenoemde hidrasiereaksie is egter nie beperk tot die isograad nie maar kan ook in 'n aanvanklike stadium in die Ortopirokseensone waargeneem word. Die proses is in beide gevalle identies maar die hidrasieprodukte (gedriet+kianiet) is baie meer grofkorrelrig langs die isograad (Fig. 13 en 14).

Die volledige verloop van beide hidrasiereaksies gee aanleiding tot die verdwyning van kordiëriet+hipersteen as 'n stabiele assosiasie en die verskyning van samebestaande antofilliet+gedriet+kianiet in die Ortoamfiboolzone.

2.2.2.1 Metamorfe karakter van die Ortopirokseenreaksie-isograad en die stabiliteitsverwantskappe van antofilliet+gedriet+kianiet in die Ortoamfiboolsone

Die Pelitiese gneis van die Ortoamfiboolsone word deur die teenwoordigheid van samebestaande antofilliet+gedriet+kianiet gekenmerk. Die assosiasie antofilliet+gedriet is egter 'n raar verskynsel in metamorfe terreine en die eerste (en enigste?) beskrywing van samebestaande primêre ortoamfibole word waarskynlik deur Stout (1971 en 1972) gegee vir mineraalversamelings van Telemark in Noorweë. Robinson e.a. (1971) het die teenwoordigheid van 'n ontmengingsveld in die antofilliet-gedrietreeks voorgestel wat 'n aanduiding is dat hierdie twee minerale wel onder geskikte toestande 'n ewewigsversameling kan vorm. Die inligting uit die huidige ondersoek is in ooreenstemming met bogenoemde voorstel soos duidelik deur ontmengingslamelle in ortoamfibool (Fig. 37) en deur die teenwoordigheid van kontakversamelings van antofilliet en gedriet in dieselfde gesteentes geïllustreer word (Afd. VI-Fig. 39). Hierdie voorstel word verder ondersteun deur die reëlmatige verdeling van MgO en FeO tussen samebestaande antofilliet en gedriet in die Ortoamfiboolsone (Afd. VII-Fig. 57).

Geen eksperimentele inligting is egter beskikbaar vir die stabiliteitsverwantskappe van antofilliet en gedriet (+kianiet) nie en gevolglik is 'n teoretiese PT-diagram (Afd. VIII-Fig. 80) vir die sisteem $MgO-FeO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ gebaseer op die metode van Schreinemakers gekonstrueer. Die doel hiervan was om 'n twee-veranderlike veld te definieer waarin antofilliet+gedriet+kianiet teoreties 'n stabiele assosiasie in K_2O - en CaO -arme pelitiese gesteentes kan vorm, en om die interaksie van P, T en μH_2O te ondersoek wat aanleiding gegee het tot die ontwikkeling van bogenoemde assosiasie met oorgang van die Ortopirokseen- na die Ortoamfiboolsones. Hierdie ondersoek het gewys dat die aanvanklike

ontwikkeling van antofilliet+gedriet langs die isograad gekoppel is aan 'n hidrasiereaksie waarby beide kordiëriet en hipersteen betrek is en wat hoofsaaklik deur 'n daling in temperatuur by min of meer konstante totale druk beheer is. Die totale verdwyning van kordiëriet en hipersteen met oorgang na die Ortoamfiboolsonne is egter nie slegs 'n funksie van dalende temperatuur nie maar is ook gekoppel aan 'n toename in P_{H_2O} en kan dus as 'n klassieke retrograadproses beskou word.

Die voorstel dat die hidrasiereaksies (en die posisie van die Ortopirokseenisograad) deur die interaksie van dalende temperatuur en stygende P_{H_2O} beheer is, is in ooreenstemming met die goed-gedefinieerde karakter van hierdie isograad wat nie slegs aan mineralogiese veranderings gekoppel is nie maar wat ook baie akkuraat deur die sistematiese variasie in die samestelling van granaat en biotiet gedefinieer word (Afd. VI-Fig. 24 en 33).

Die berekende minimum temperatuur van $730^{\circ}C$ en 'n druk van ongeveer 8 kb vir samebestaande antofilliet+hipersteen+gedriet+kordiëriet+kianiet langs die Ortopirokseenreaksie-isograad (Afd. X) is in ooreenstemming met eksperimentele inligting vir die stabiliteit van kordiëriet+gedriet+kianiet (Green en Vernon, 1974) en vir die stabiliteit van antofilliet in die kordiërietvrye gesteentes (Pop e.a., 1977). Hierdie fisiese toestande plaas 'n beperking op die maksimum PT-toestande waarby antofilliet+gedriet+kianiet 'n stabiele assosiasie in die Ortoamfiboolsonne kan vorm.

Die teenwoordigheid van samebestaande antofilliet+gedriet in die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfe kompleks is dus 'n funksie van beide die metamorfe ontwikkeling van hierdie gebied en die chemiese samestelling van die K_2O - en CaO -arme pelitiese gesteentes. Antofilliet en gedriet is beperk tot die laer-graadse ekwiwalente van die kordiëriet-granaatgranoliete en die granaatvrye kordiërietgranoliete terwyl gedriet afwesig is in gesteentes wat oorspronklik

(d.w.s. in die Ortopirokseensone) geen kordiëriet bevat het nie. Daar kan ook genoem word dat granaat nie stabiel is in assosiasie met antofilliet en gedriet in gesteentes wat ook biotiet bevat nie.

2.3 TYDSVERWANTSKAPPE VAN OPEENVOLGENDE PERIODES VAN METAMORFOSE

Die opeenvolging van metamorfe gebeurtenisse wat aanleiding gegee het tot die relatiewe verspreiding van metamorfe sones in die huidige posisie, kan direk uit die tydsverwantskappe van die verskillende metamorfe reaksies afgelei word.

Die teenwoordigheid van ten minste twee periodes van granuliet-graad van metamorfose (M_1 en M_2) word duidelik deur die mineralogie van die Pelitiese gneis in die Ortopirokseensone weerspieël. Die M_1 periode is waarskynlik beheer deur 'n kombinasie van hoë temperatuur en druk en het aanleiding gegee tot die stabiele assosiasie van granaat+hipersteen in die Ortopirokseensone. Die daaropvolgende vervanging van granaat deur kordiëriet en 'n tweede generasie van hipersteen tydens M_2 is gekoppel aan 'n periode van opheffing wat gepaard gegaan het met 'n verlaging in druk by min of meer konstante temperatuur. Die huidige posisie van die Ortopirokseenisograad hou egter nie verband met M_2 nie maar is gekoppel aan nog latere periode van laer-graadse metamorfe (M_3) wat weerspieël word deur die hidrasie van kordiëriet en hipersteen. Die mees aanvaarbare bewyse vir die relatiewe tydsverwantskappe van hierdie hidrasiereaksies langs die isograad word gegee deur die waarneming dat kordiëriet+hipersteen gelyktydig deur ortoamfibool en kianiet in koronateksture vervang word wat identies is aan dié wat in die Ortopirokseensone beskryf is (Afd. IV, Fig. 11b en 14). Die PT-toestande tydens M_3 was van so 'n aard dat die granuliete in die Ortopirokseensone slegs geringe veranderings ondergaan het soos byvoorbeeld geïllustreer word deur die

aanvanklike hidrasie van kordiëriet. Die gesteentes suid van die Ortopirokseenisograad het egter terselfdertyd geheel en al geherkristalliseer na mineraalversamelings wat kenmerkend is van die hoë-amfiboliet graad van metamorfose.

Dit is dus duidelik dat die gebied onderhewig was aan ten minste drie periodes van intense regionale metamorfose. Die vraag is egter of die huidige verspreiding van die Ortopirokseense- en Ortoamfiboolsones die gevolg is van 'n deurlopende opeenvolging van metamorfe gebeurtenisse, en of die metamorfe geskiedenis van die gebied in terme van drie heeltemal onafhanklike periodes van metamorfose beskryf moet word.

'n Deurlopende metamorfe geskiedenis word hier verkies omdat daar geen bewyse bestaan vir die teenwoordigheid van 'n periode (of periodes) van afkoeling, opheffing en erosie tussen die vroeëre en latere periodes van metamorfose nie. Indien hierdie voorstel korrek is sal dit dus moeilik, indien nie onmoontlik, wees om die posisie van die Ortopirokseenisograad voor die M_3 episode te rekonstrueer. Die rede hiervoor is dat die Ortopirokseenseone vroeër 'n wyer verspreiding besit het as wat huidig die geval is. Dit is so omdat die huidige posisie van die Ortopirokseenisograad deur die verdwyning (en nie die verskyning) van hipersteen in die granaatgranoliete gedefinieer word. Hierdie voorstel word ondersteun deur die teenwoordigheid van relikte van kordiëriet, en in enkele gevalle ook van hipersteen, in die ortoamfiboolgneisse van die Ortoamfiboolsone. Die beskikbare inligting is dus 'n aanduiding van 'n progressiewe vernouing van die verskillende metamorfe sones met betrekking tot opeenvolgende periodes van metamorfose.

Die voorgestelde veranderende PT-toestande vanaf M_1 na M_3 word deur middel van pyle in die PT-diagram van figuur 81 aangedui.

3. VERWANTSKAP TUSSEN METAMORFOSE EN DIE TEKTONIESE GESKIEDENIS VAN DIE SUIDELIKE GRENSSONE VAN DIE LIMPOPO-METAMORFEKOMPLEKS

3.1 VERSKILLENDE PERIODES VAN VERVORMING

Du Toit (in voorbereiding) onderskei ten minste drie vervormingsperiodes in die gebied onder bespreking, naamlik F_1 , F_2 en F_3 . Die eerste periode van vervorming (F_1) word waargeneem as naastenby oos-wes strekkende isoklinale plooi wat opgevolg is deur 'n periode van ko-aksiale vervorming (F_2) wat aanleiding gegee het tot die ontwikkeling van haakplooi wat op alle skale waargeneem kan word. Die laaste plooiperiode (F_3) sny in 'n noord-westelike rigting skuins oor die F_1/F_2 strukture en word verteenwoordig deur regop oop-plooi wat veral goed ontwikkel is in die gebied noord van die Matok-granietplutoon (Fig. 2).

Bewyse vir hierdie komplekse vervormingsgeskiedenis is selde opvallend in slypplaatjies. Die tydsverwantskappe van metamorfose en vervorming word verder ook bemoeilik deurdat strukture gekoppel aan F_1 en F_2 moeilik in dagsome onderskei kan word, terwyl F_3 weer selde deurdringend is.

Al die beskikbare inligting is egter 'n aanduiding dat M_2 voor F_3 plaasgevind het en F_2 oorleef het. Dit word eerstens deur die isotrope maaksel van die koronateksture in die M_2 -Ortopirokseensone weerspieël wat 'n aanduiding is dat hierdie teksture of na-tektonies is of tussen twee opeenvolgende periodes van vervorming ontwikkel het. Die stabiliteit van kordiëriet+hipersteen voor F_3 word egter geïllustreer deur die teenwoordigheid van 'n goed ontwikkelde F_3 -maaksel in die groef by Bandelierkopstasie wat deur afwisselende bande van kordiëriet+granaat+hipersteen (en biotiet) en kwarts+plagioklaas bestaan. Die laaste periode van metamorfose het F_3 waarskynlik oorleef soos eerstens deur die gebrek aan 'n

voorkeur-oriëntasie van die hidrasieprodukte van kordiëriet aangedui word (Fig. 13c) en tweedens deur die waarneming dat die M_3 -Ortopirokseenisograad deur die assevlakke van F_3 -plooie sny.

Die korrelasie tussen opeenvolgende periodes van metamorfose en die verskillende vervormingsperiodes kan egter nie so duidelik in die Ortoamfiboolsone geïllustreer word nie. Die ontwikkeling van gedriet (en kianiet) as gevolg van die hidrasie van kordiëriet tydens M_3 is egter 'n aanduiding dat hierdie mineraal nie stabiel was voor M_3 en F_2 nie. Op soortgelyke wyse is die waargenome rotasie van antofilliet deur beide F_3 en F_2 (Du Toit, in voorbereiding) weer 'n aanduiding dat hierdie mineraal reeds tydens M_1 stabiel was in die vroeëre Ortoamfiboolsone. Ortoamfibool is nie positiesief in bogenoemde kleinskaalse strukture geïdentifiseer nie maar die tentatiewe identifikasie van die mineraal as antofilliet volg logies uit die waarneming dat gedriet eers tydens M_3 (en dus na F_2) ontwikkel het. Die eerste verskyning van hipersteen in die suidelike grensone van die Limpopo-metamorfekompleks (en dus die posisie van die M_1 -Ortopirokseenisograad) is dus waarskynlik gekoppel aan 'n dehidrasiereaksie waarby antofilliet onder andere betrek is.

Detail waarnemings in die Bandelierkopgroef (Afd. II) is laastens 'n aanduiding dat die wydverspreide teenwoordigheid van leukokratiese materiaal (die Leukokratiese graniet) in dagsome van die Pelitiese gneis in beide die Ortopirokseen- en Ortoamfiboolsones gekoppel is aan die gedeeltelike smelting van laasgenoemde gesteentes onder toestande van hoë temperatuur en druk, en dat hierdie proses oor 'n baie groot tydinterval plaasgevind het.

3.2 SKUIFSKEURSONES

Skuifskeurvervorming het geen rol gespeel in die regionale

verspreiding van metamorfe sones in die suidelike grenssone van die Limpopo-metamorfe kompleks nie. Die skuifskursones sny deur, en verplaas, oer strukture in beide die Ortopirokseen- en Ortoamfiboolsones en is duidelik later as die metamorfose. Skuifskursones word dan gewoonlik ook in die veld geïdentifiseer deur die waarneming dat hierdie strukture verantwoordelik is vir die retrogressie van die hoë-gradse metamorfe mineraalversamelings.

Die belangrikste aspekte van die voorgestelde tektono-metamorfe geskiedenis van die gebied onder bespreking word in Tabel 57 opgesom.

4. KARAKTER VAN DIE DOORGANG VANAF DIE LIMPOPO-METAMORFE-KOMPLEKS NA DIE GRANIET-GROENSTEENTERREIN VAN DIE KAAPVAALKRATON



UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG

Die suidelike grens van die Limpopo-metamorfe kompleks hou geen verband met regionale oos-noordoos strekkende skuifskursones soos voorgestel is deur Mason nie (1973, p. 473 en Fig. 1b, huidige ondersoek) maar kan duidelik aan die hand van goed-gedefinieerde metamorfe oorgange geïllustreer word (Fig. 2). Hierdie voorgestelde verwantskap tussen die Limpopo-metamorfe kompleks en die graniet-groensteenterrein van die Kaapvaalkraton word duidelik deur die dagsome in die Houtrivier geïllustreer (Afd. V-3) waar relatief onveranderde groensteentipe materiaal progressiewe strukturele en metamorfe veranderings noordwaarts in die rigting van die metamorfe kompleks ondergaan. Hierdie verskillende gesteentetipes (amfiboliete en ortoamfiboolgneisse) is chemies identies aan die Mafiese- en Pelitiese gneisse van die Bandelierkop-Formasie. Die geochemie van laasgenoemde gesteentes stem verder ook goed ooreen met dié van die basaltiese en peridotitiese komateiite van beide die Barber-ton- en Sutherlandgordels (Afd. V-3) en gevolglik is dit duidelik dat die Bandelierkop-Formasie hoogs gemetamorfo-

Tabel 57 Die korrelasie van tektono-metamorfe gebeurtenisse in die Limpopo-metamorfekompleks suid van die Soutpansberge

	TEKTONIEK	METAMORFOSE	ANATEKSE	KORSREAKSIE
I	F₁ Teenwoordigheid afgelei van die voorkoms van ko-aksiale heak-plooiingspatrone. Geen bewyse dat F ₁ -vervorming onder toestande van granuliet-graad van metamorfose plaasgevind het.	lae-gradese metamorfose - tipies van graniet-groensteenterreine?	_____	Groensteengordels reeds ontwikkel
III	F₂ Isoklinale oos-wes plooië ko-aksiaal aan F ₁ . F ₂ -maaksel is baie sterk ontwikkel en die vervorming het waarskynlik geskied a.g.v. hitte wat gedurende M ₁ tot die kors toegevoeg is.	II M₁ Granuliet-grad van metamorfose. Word gedefinieer deur die stabiele assosiasie van granaat+hipersteen+biotiet in al die chemies verskillende tipes granaatgranuliete in M ₁ -Ortopirokseensone (P \pm > 8,5 kb; T = \pm 800°C). Antofilliet stabiel in M ₁ -Ortoamfiboolsone.	A₁ 1. Oudste are loodreg op foliasie is intens afgeplat. Wit segregasies in foliasie. 2. Groot duarsnydende leukokratiese liggame waarop F ₂ afgedruk is.	1. Graniet-groensteenterrein onderhevig aan hoë-gradese metamorfose by hoë temperatuur en 'n diepte van meer as ongeveer 27 km. Ontwikkeling van M ₁ -Ortopirokseenisgraad. 2. Inplasing van Onlustgneis met 'n swak ontwikkelde F ₂ -foliasie wat deur F ₃ geroteer is.
V	F₃ Regop noord-wes plooië wat nie oral deurdringend is nie en selde herfoliasie veroorsaak. M ₃ -Ortopirokseenisgraad slyp oor F ₃ -assevlakke.	IV M₂ Periode van retrograad metamorfose wat gekenmerk word deur die stabiele assosiasie van granaat+kordieriet+hipersteen oor 'n gebied van 4 500 km ² in die M ₂ -Ortopirokseensone. Antofilliet steeds stabiel in die Ortoamfibool sone - leer P (7,6-8,5 kb); T = 780-820°C.	A₂ Word moontlik verteenwoordig deur ongefolieerde leukokratiese liggame wat duersdeur die gebied versprei is. Swak dagsome verneof positiewe identifikasie.	Periode van opheffing wat gepaard gegaan het met 'n vermindering in druk met die gevolglike vernouing van die M ₂ -Ortopirokseensone.
VII	Koedoesrivier Lineament (KO) en Ntabalala skuifreksiesone (ONO)	VI M₃ Word gekenmerk deur die hidrasie van kordieriet+hipersteen en die ontwikkeling van antof-gedriet+klasiet in die Ortoamfiboolsone. Hierdie hidrasiereaksies definieer die M ₃ -Ortopirokseenisgraad en is beheer deur 'n kombinasie van dalende temperatuur (min. T = 730°C) en stygende P _{H₂O} by 'n totale druk van \pm 8 kb.	A₃ Inplasing van anatektiese are in F ₃ -assevlakke.	Metamorfe sones ondergaan verdere vernouing met betrekking tot die laaste periode van metamorfose. M ₃ -Ortopirokseenisgraad is verantwoordelik vir huidige verspreiding van die Ortopirokseensone en Ortoamfiboolsone. Inplasing van Matok-granietplatoon by \pm 2 645 m.j. langs M ₃ -Ortopirokseenisgraad. Vertoon redelik goed ontwikkelde F ₃ -foliasie.
VIII	_____	_____	_____	Inplasing van ongefolieerde Palmietfontein-graniet by \pm 2 500 m.j.
IX	_____	Laaste termiese gebeurtenis gekoppel aan verhoogde hittevloei.	_____	Word weerspieël in Ab-Sr-verhoudings van minerale soos biotiet. 2 000 m.j.

seerde en getransformeerde groensteenmateriaal voorstel.

5. VOORGESTELDE DEFINISIE VIR DIE SUIDELIKE GRENSSONE VAN DIE "LIMPOPO-MOBIELEGORDEL"

Die inligting uit die huidige ondersoek, asook die paralelle studie van Du Toit (in voorbereiding), is 'n aanduiding dat die huidige gebruik van die term Limpopo-mobielegordel (Mason, 1973, Robertson, 1973) in heroorweging geneem behoort te word. Hierdie voorstel is definitief geldig vir die gebied suid van die Soutpansberge en mag ook van toepassing wees op die res van die sogenaamde mobielegordel (Du Toit en Van Reenen, 1978).

Enige definisie van die suidelike grenssone van hierdie gebied behoort gebaseer te wees op geologiese elemente wat beslissend is in die onderskeid tussen die graniet-groensteen-terrein van die Kaapvaalkraton en die sogenaamde mobielegordel. Vier geologiese nie-genetiese parameters is hier ter sprake, naamlik litologie, metamorfose, struktuur en tyd.

5.1 LITOLOGIE

Die gesteentes van die Ortopirokseen- en Ortoamfiboolsones verteenwoordig herwerkte graniet-groensteenmateriaal wat tot en met 2 600 m.j. gelede onderworpe was aan intense metamorfose en vervorming. Daar bestaan verder geen bewyse vir sedimentasie wat verwant is aan die orogenese van die sogenaamde Limpopo-mobielegordel voor 2 600 m.j. nie en dit is in skerp teenstelling met die ontwikkeling van 'n tipiese hedendaagse orogenetiese gordel. Die Messina-Formasie in die sentrale sone (Fig. 1b) skep egter hier 'n probleem as gevolg van opvallende verskille in litologie in vergelyking met dié van die Bandelierkop-Formasie (Bahneman, 1972).

5.2 ASPEKTE VAN METAMORFOSE

Die regionale verspreiding van metamorfe sones in figuur 2 is bepaal op grond van 'n detail petrochemiese ondersoek van die Pelitiese en Mafiese gneisse van die Bandelierkop-Formasie. Die posisie van die metamorfe isograde hou geen verband met die suidelike grens wat deur Mason (1973) voorgestel is nie.

5.3 SKUIFSKEURVERVORMING

Skuifskeurvervorming het geen rol gespeel in die proses van metamorfose of in die regionale verspreiding van metamorfe sones in die gebied onder bespreking nie. Dit is in sterk teenstelling met die rol van skuifskeurvervorming in die ontwikkeling van die suidelike grenssone soos voorgestel is deur Mason (1973, p. 475 en 480).

5.4 STRUKTUUR EN TYD

Coward en James (1974 - in Du Toit, in voorbereiding) is van mening dat Limpopo-strukture tot noord van Bulawayo in Rhodesië gevolg kan word terwyl Graham (1974) weer voorgestel het dat soortgelyke strukture in die suide tot so ver suid as die Murchisongordel in Suid-Afrika geïdentifiseer kon word. Du Toit (in voorbereiding) is egter van mening dat die rheologiese eienskappe van die hoë-graadse metamorfe gesteentes van die "Limpopo-mobiele gordel" nie dieselfde kon gewees het as dié van die kouer (en dus strywer) gesteentes van die graniet-groensteenterreine nie. Aangesien die hoë-graadse metamorfe gesteentes plasties gereageer het ten opsigte van spannings, en dus 'n groot gedeelte van hierdie spannings geabsorbeer het, kan dit moeilik verklaar word hoe vervormings-

effekte van die Limpopo-gebeurtenis tot so ver weg op die Rhodesiese en Kaapvaalkratone gevolg kan word. Die morfologie, ruimtelike oriëntasie en intensiteit van vervorming moet aan metamorfose gekoppel word (soos in die geval van die huidige ondersoek) voordat struktuurelemente sinvol in die definisie van beide die suidelike en noordelike grenssones van die "Limpopo-mobielegordel" gebruik kan word.

Die aspek van tyd moet egter ook nie uit die oog verloor word nie nieteenstaande die feit dat tyd alleen natuurlik geen grense kan definieer nie. Die laaste (M_3) periode van metamorfose in die gebied onder bespreking het egter teen 2 600 m.j. gelede ten einde geloop (Barton en Ryan, 1977) en indien die goeie korrelasie tussen metamorfose en vervorming in aanmerking geneem word wil dit lyk asof die term Limpopo-metamorfekompleks meer toepaslik is as die term Limpopo-mobielegordel.



6. OPSOMMING

UNIVERSITY
OF
JOHANNESBURG

In die lig van die voorafgaande bespreking is dit duidelik dat die suidelike grenssone van die "Limpopo-mobielegordel" geen verband hou met die ontwikkeling van 'n tipiese hedendaagse orogenetiese gordel nie. Die oorgang van die sogenaamde mobiele gordel na die Kaapvaalkraton kan egter duidelik aan die hand van goed-gedefinieerde en vinnige metamorfe oorgange gekoppel word. Verder is die "oorweldigende rol van oos-noordoos strekkende skuifskuurvervorming (Mason) ook definitief later as die laaste periode van vervorming (ongeveer 2 600 m.j. - Barton en Ryan, 1978).

Die tektoniese onderverdeling van die sogenaamde Limpopo-mobielegordel (Afd. I, Fig. 1b) is gebaseer op bogenoemde oos-noordoos strekkende regionale skuifskuursones wat dan ook oorspronklik aanleiding gegee het tot die gebruik van die term Limpopo-mobielegordel. Metamorfose het egter 'n

baie meer prominente rol in die ontwikkeling van hierdie gedeelte van die aardkors tot en met ongeveer 2 600 m.j. gelede gespeel en behoort dus ook 'n meer prominente rol in die definisie van hierdie gebied te speel. Dit is dus die skrywer en Du Toit (in voorbereiding) se mening dat die nie-genetiese term Limpopo-metamorfe kompleks ernstig as 'n alternatiewe benaming oorweeg moet word. Die suidelike grens van hierdie metamorfe kompleks word dan geneem as die suidelike grens van die Ortoamfiboolsone en nie as die "granuliet-subsones" soos voorgestel is deur Mason (1973) nie.

Die belangrikste elemente van die Limpopo-metamorfe kompleks kon dus kortliks in terme van die volgende begrippe saamgevat word:

- (i) 'n metamorfe kompleks wat die noordelike, suidelike en sentrale sones van die "Limpopo-mobielegordel" insluit en waarin tektono-metamorfe prosesse teen ongeveer 2 600 m.j. gelede ten einde geloop het, en
- (ii) latere periodes van korsvervorming (2 000 m.j.) in die vorm van paralelle oos-noordoos strekkende skuifskeurgordels wat die sentrale sone (Messina-Formasie) begrens (Fig. 1b) en wat aanleiding gegee het tot die vroeëre definisie van die Limpopo-mobielegordel in terme van hierdie rigtings van skuifskeuring.

Die voorgestelde term Limpopo-metamorfe kompleks is dus 'n alles insluitende term wat 'n baie groter gebied betrek, naamlik beide die noordelike en suidelike kratoniese grens-sones.

LITERATUURVERWYSINGS

- Albee, A.L. (1965a). Distribution of Fe, Mg, and Mn between garnet and biotite in natural mineral assemblages. J. Geol., 73, 155-164.
- Albee, A.L. (1965b). A petrogenetic grid for the Fe-Mg silicates of pelitic schists. Am. J. Sc., 263, 512-536.
- Arndt, N.T., Naldrett, A.J., en Pyke, D.R. (1977). Komatiitic and iron-rich tholeiitic lavas of Munro Township, Northeast Ontario. J. Petrology, 18, 319-369.
- Ashworth, J.R., en Chinner, G.A. (1978). Coexisting garnet and cordierite in migmatites from the Scottish Caledonites. Contr. Miner. Petrol., 65, 379-394.
- Atherton, M.P., en Edmunds, W.M. (1966). An electron microprobe study of some zoned garnets from metamorphic rocks. Earth Planet. Sc. Lett., 1, 185-193.
- Bahneman, K.P. (1972). A review of the structure, stratigraphy and the metamorphism of the basement rocks in the Messina district, Northern Transvaal. Ongepubl. D.Sc proefskrif, Univ. Pretoria, 156 p.
- _____ (1975). Garnets as possible indicators of metamorphic grade in the Limpopo Folded Belt near Messina in the Northern Transvaal. Trans. geol. Soc. S. Afr., 78, 251-256.
- Bard, J.P. (1970). Composition of hornblendes formed during the Hercynian progressive metamorphism of the Aracena metamorphic Belt (SW Spain). Contr. Miner. Petrol., 28, 117-134.
- Barker, F. (1962). Cordierite-garnet gneiss and associated microcline-rich pegmatite at Sturbridge, Massachusetts and Union, Connecticut. Am. Miner., 47, 907-918.
- Barton, J.M. en Ryan, B. (1977). A review of the geochronologic framework of the Limpopo Mobile Belt. In: Ermanovics, I.F., Key, R.M. en McEwen, G. (Ed). The proceedings of a seminar pertaining to the Limpopo Mobile Belt. Bull. Geol. Surv. Botswana, 12, 183-200.
- Berg, J.H. (1977). Regional geobarometry in the contact aureoles of the anorthositic Nain Complex, Labrador. J. Petrology, 18, 399-430.
- Bhattacharyya, C., Choudhury, S., en Nandi, K. (1970). Metamorphic status of garnet with a note on the garnet from granulitic rocks of the Eastern Ghats, Srikakulam district, Andhra Pradesh, India. Neues Jahrb. Mineral. Monatsch., 83-92.
- Blümel, P. en Schreyer, W. (1977). Phase relations in pelitic and psammitic gneisses of the sillimanite-potash feldspar and cordierite-potash feldspar zones in the Moldanubicum of the Lam-Bodenmais area, Bavaria. J. Petrology, 18, 431-459.
- Binns, R.A. (1962). Metamorphic pyroxenes from the Broken Hill district, New South Wales. Mineralog. Mag., 33, 320-338.
- _____ (1965). The mineralogy of metamorphosed basic rocks in the Wilyama Complex, Broken Hill District, New South Wales. Part I. Hornblendes. Mineralog. Mag., 35, 306-326.
- _____ (1969a). Ferromagnesian minerals in high-grade metamorphic rocks. Geol. Soc. Aust. Spec. Publ. No. 2 (D.A. Brown, ed)., 323-332.
- _____ (1969b). Hydrothermal investigations of the amphibole-granulite facies boundary. Geol. Soc. Aust. Spec. Publ. No. 2. (D.A. Brown, ed)., 341-344.
- Boyd, F.R. (1969). Electron-probe study of diopside inclusions from Kimberlite. Amer. J. Sci., 267A, 50-69.
- Brandt, J.W. (1939). On younger granite and norite south of Bandelierkop. Ongepubl. verslag, Geol. Opn., Pretoria.
- _____ (1946). Corundum indicator basic rocks and associated pegmatites in the Northern Transvaal. Trans. geol. Soc. S. Afr., 49, 51-102.
- Brown, G.C., en Fyfe, W.S. (1970). The production of granitic melts during ultra-metamorphism. Contr. Mineral. Petrol, 28, 310-318.

- Butler, B.C.M. (1967). Chemical study of minerals from the Moine Schists of the Ardnamuchan area, Argyllshire, Scotland. J. Petrology, 8, 233-267.
- Carmichael, D. (1969). On the mechanism of prograde metamorphic reactions in quartz-bearing pelitic rocks. Contr. Mineral. Petrol., 20, 244-267.
- Chinner, G.A. (1959). Garnet-cordierite parageneses. Carnegie Instn. Wash. Year Book, 58, 112-114.
- _____ (1961). The origin of sillimanite in Glen Clova, Angus. J. Petrology, 2, 312-323.
- _____ (1965). The kyanite isograd in Glen Clova, Angus, Scotland. Mineralog. Mag., 34, 132-143.
- _____, en Fox, J.S. (1974). The origin of cordierite-anthophyllite rocks in the Land's End aureole. Geol. Mag., 5, 397-408.
- Collerson, K.D. (1974). Descriptive microstructural terminology for high-grade metamorphic tectonites. Geol. Mag., 3, 313-318.
- Currie, K.L. (1971). The reaction $3 \text{ Cd} = 2 \text{ Ga} + 4 \text{ Si} + 5 \text{ Qz}$ as a geological thermometer in the Opinicon Lake Region, Ontario. Contr. Mineral. Petrol., 33, 215-226.
- _____ (1974). A note on the calibration of the garnet-cordierite geothermometer and geobarometer. Contr. Mineral. Petrol., 44, 35-44.
- Dallmeyer, R.D. (1974a). The role of crystal structure in controlling the partitioning of Mg and Fe between coexisting garnet and biotite. Am. Miner., 59, 201-203.
- _____ (1974b). Metamorphic history of the northeastern Reading Prong, New York and northern New Jersey. J. Petrology., 15, 325-359.
- _____, en Dodd, R.T. (1971). Distribution and significance of cordierite in parageneses of the Hudson Highlands, southeastern New York. Contr. Mineral. Petrol., 33, 289-308.
- Davidson, L.R. (1968). Variation in ferrous iron-magnesium distribution coefficients of metamorphic pyroxenes from Quairading, Western Australia. Contr. Mineral. Petrol., 19, 239-259.
- _____ (1971). Metamorphic hornblendes from basic granulites of the Quairading district, Western Australia. N. Jb. Miner. Monatsch. 8, 344-359.
- _____, en Mathison, C.I. (1973). Manganiferous orthopyroxenes and garnets from metamorphosed iron formations of the Quairading district, Western Australia. N. Jb. Miner. Monatsch. 2, 47-57.
- _____ (1974). Aluminous orthopyroxenes and associated cordierites, garnets and biotites from granulites of the Quairading district, Western Australia. N. Jb. Miner. Monatsch. 6, 272-287.
- Davis, B.T.C., en Boyd, F.R. (1966). The join $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6\text{-Ca Mg Si}_2\text{O}_6$ at 30 kilobars pressure and its application to pyroxenes from Kimberlites. J. Geophys. Res., 71, 3567-3576.
- Deer, W.A., Howie, R.A., en Zussman, I. (1963). Rock-forming minerals. Vol. 2. London, Longmans, 379 p.
- De Waard, D. (1965). A proposed subdivision of the granulite facies. Am. J. Sc., 263, 455-461.
- _____ (1966). The biotite-cordierite-almandite subfacies of the hornblende granulite facies. Can. Mineralogist, 8, 481-492.
- Dougan, T.W. (1974). Cordierite gneisses and associated lithologies of the Guri area, northwest Guayana Shield, Venezuela. Contr. Mineral. Petrol., 46, 169-188.
- Du Toit, M.C. (in voorbereiding). Die geologie en struktuur van die gebiede Levubu en Bandelierkop, Noord-Transvaal. Ongepubl. PhD-proefskrif, Randse Afrikaanse Universiteit.
- Du Toit, M.C., en Van Reenen, D.D. (1978). The southern margin of the Limpopo mobile Belt, Northern Transvaal, with special reference to metamorphism and structure. In: Ermanovics, I.F., Key, R.M. en McEwen, G. (Ed). The proceedings of a seminar pertaining to the Limpopo Mobile Belt. Bull. Geol. Surv. Botswana, 12, 83-85.

- Engel, A.E.J., en Engel, C.G. (1960). Progressive metamorphism and granitization of the major paragneiss, northwest Adirondack Mountains, New York, Pt. 2, Mineralogy. Bull. geol. Soc. Am., 71, 1-58.
- Ernst, W.G. (1968). Amphiboles. Springer Verlag. New York. 125 p.
- _____ (1976). Petrologic phase equilibria. W.H. Freeman and Company, San Francisco. 333 p.
- Evans, B.W., en Guidotti, C.V. (1966). The sillimanite-potash feldspar isograd in Western Maine, U.S.A. Contr. Mineral. Petrol., 12, 25-62.
- Fleet, M.E. (1974). Partition of Mg and Fe⁺² in coexisting pyroxenes. Contr. Mineral. Petrol., 44, 251-257.
- Foster, M.D. (1960). Interpretation of the composition of trioctahedral micas. Prof. Pap. U.S. geol. Surv. 354-B.
- Frensch, B.M. (1966). Some geologic implications of equilibrium between graphite and a C-H-O gas at high temperature and pressure. Rev. Geophys., 4, 223-253.
- Fyfe, W.S. (1970). Some thoughts on granitic magmas. In Newall, G. en Rast, N., Mechanism of Igneous Intrusion. Geol. J. Spec. Issue 2, Gallery Press, Liverpool, 201-216.
- _____, Turner, F.J. en Verhoogen, J. (1958). Metamorphic reactions and metamorphic facies. Mem. geol. Soc. Am., 73, 259 p.
- Gable, D.J. en Sims, P.K. (1969). Geology and regional metamorphism of some high-grade cordierite gneisses, Front Range, Colorado. Spec. Pap. geol. Soc. Am., 128, 87 p.
- Graham, R.H. (1973). The southern margin of the Limpopo Mobile Belt, Transvaal, South Africa. 17th ann. Rep. res. Inst. Afr. Geol., Univ. Leeds, 7-9.
- _____ (1974). A structural investigation of the southern part of the Limpopo Belt and the adjacent Kaapvaal Craton, S.A. 18th ann. Rep. res. Inst. Afr. Geol., Univ. Leeds, 63-69.
- Grant, J.A. en Weiblen, P.W. (1971). Retrograde zoning in garnet near the second sillimanite isograd. Am. J. Sc., 270, 281-296.
- Grapes, R.H., Hashimoto, S. en Miyashita, S. (1977). Amphiboles of a metagabbro-amphibolite sequence, Hidaka Metamorphic Belt, Hokkaido. J. Petrology, 18, 285-318.
- Green, D.H. en Ringwood, A.E. (1967). An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications. Geochim. Cosmochim. Acta. 31, 367-833.
- Green, T.H. (1976). Experimental generation of cordierite- or garnet-bearing granitic liquids from a pelitic composition. Geology, 4, 85-88.
- Green, T.H. en Vernon, R.H. (1974). Cordierite breakdown under high-pressure, hydrous conditions. Contr. Mineral. Petrol., 46, 215-226.
- Greenwood, H.J. (1961). The system Na AlSi₃O₈-H₂O-Argon: total pressure and water pressure in metamorphism. J. geophys. Res., 66, 3923-46.
- _____ (1963). The synthesis and stability of anthophyllite. J. Petrology, 4, 317-351.
- Guidotti, C.V. (1970). The mineralogy and petrology of the transition from the lower to upper sillimanite zone in the Oquossoc area, Maine. J. Petrology, 11, 277-336.
- _____, Cheney, J.T. en Conatore, P.D. (1975). Interrelationship between Mg/Fe ratio and octahedral Al content in Biotite. Am. Miner., 60, 849-853.
- _____ en Guggenheim, S. (1977). Distribution of titanium between coexisting muscovite and biotite in pelitic schists from northwestern Maine. Am. Miner., 62, 438-448.
- Hall, A.L. (1920). Corundum in the Northern and Eastern Transvaal. Mem. geol. Surv. Un. S. Afr., 15.

- Hall, A.L. (1925). Report on the working of the South African Phosphate Exploration Syndicate Limited, near Bandelierkop, Zoutpansberg, district. Ongepubl. verslag, Geol. Opn., Pretoria.
- Harris, B.W. (1976). The significance of garnet and cordierite from the Sioux Lookout region of the English River Gneiss Belt, Northern Ontario, Contr. Mineral. Petrol., 55, 91-104.
- Harte, B. en Johnson, M.R.W. (1969). Metamorphic history of Dalradian rocks in Glen Cova, Esk and Lethnot, Angus, Scotland. Scott. J. Geol., 5, 54-80.
- Henry, J. (1974). Garnet-cordierite gneisses near the Egersund-Ogna anorthositic intrusion, southwestern Norway. Lithos, 7, 207-216.
- Hensen, B.J. (1971). Theoretical phase relations involving cordierite and garnet in the system $MgO-FeO-Al_2O_3-SiO_2$. Contr. Mineral. Petrol., 33, 191-215.
- _____ (1972). Cordierite-garnet equilibrium as a function of pressure, temperature, and iron-magnesium ratio. Carnegie Instn. Wash. Year Book, 72, 418-42.
- _____ (1977). Cordierite-garnet bearing assemblages as geothermometers and geobarometers in granulite facies terranes. Tectonophysics, 43, 78-88.
- _____, en Green, D.H. (1970). Experimental data on coexisting cordierite and garnet under high-grade metamorphic conditions. Phys. Earth Planet. Interiors, 3, 431-440.
- _____ (1971). Experimental study of the stability of cordierite and garnet in pelitic compositions with excess aluminosilicate. Contr. Mineral. Petrol., 33, 309-330.
- _____ (1972). Experimental study of the stability of cordierite and garnet in pelitic compositions at high pressure and temperature. II. Compositions without excess aluminosilicate. Contr. Mineral. Petrol., 35, 331-354.
- _____ (1973). Experimental study of the stability of cordierite and garnet in pelitic compositions at high pressure and temperature. III. Synthesis of experimental data and geological applications. Contr. Mineral. Petrol., 38, 151-166.
- Hess, P.C. (1971). Prograde and retrograde equilibrium in garnet-cordierite gneisses in south-central Massachusetts. Contr. Mineral. Petrol., 30, 177-195.
- Hewins, R.H. (1975). Pyroxene geothermometry of some granulite facies rocks. Contr. Mineral. Petrol., 50, 205-209.
- Hietanen, A. (1959). Kyanite-garnet gedritite near Orofino, Idaho. Am. Miner., 44, 539-564.
- Holdaway, M.J. (1976). Mutual compatibility relations of the Fe^{+2} -Mg-Al silicates at 800°C and 3 Kb. Am. J. Sc., 276, 285-308.
- _____, en Lee, S.M. (1977). Fe-Mg cordierite stability in high-grade pelitic rocks based on experimental, theoretical, and natural observations. Contr. Mineral. Petrol., 63, 175-198.
- Hollister, L.S. (1966). Garnet zoning: an interpretation based on the Rayleigh fractionation model. Science, 154, 1647-1651.
- _____ (1977). The reaction forming cordierite from garnet, the Khtada Lake Metamorphic Complex, British Columbia. Can. Miner., 15, 271-299.
- Hsu, L.C. en Burnham, C.W. (1969). Phase relationships in the system $Fe_3Al_2Si_3O_{12}-Mg_3Al_2Si_3O_{12}-H_2O$ at 2,0 kilobars. Bull. Geol. Soc. Am., 80, 2393-2408.
- Jackson, M.P.A. (1976). High-grade metamorphism and migmatization of the Namaqua Metamorphic Complex around Aus in the Southern Namib Desert, South West Africa. Precambrian Res. Unit, Univ. Cape Town, Bull. 18, 299 p.
- Jaffe, H.W., Robinson, P. en Tracy, R.J. (1975). Orientation of pigeonite exsolution lamellae in metamorphic augite: Correlation with composition and calculated optimal phase boundaries. Am. Miner., 60, 9-28.

- Janisch, E.P. (1927). The occurrence of phosphates in pegmatite bodies in the Zoutpansberg district of the Northern Transvaal. Ongepubl. PhD-proefschrift, Univ. Witwatersrand, Johannesburg.
- Katz, M. (1968). The fabric of the granulites of Mont Tremblant Park, Quebec. Can. J. Earth Sci., 5, 801-812.
- Kays, M.A., en Medaris, L.G. (1976). Petrology of the Hara Lake Paragneisses, north-eastern Saskatchewan, Canada. Contr. Mineral. Petrol., 59, 141-159.
- Korzhinskii, D.S. (1959). Physicochemical basis of the analyses of the paragenesis of minerals. Consultant's Bureau, Inc., New York, 142 p.
- Kretz, R. (1959). Chemical study of garnet, biotite and hornblende from gneisses of southwestern Quebec, with special emphasis on distribution of elements in coexisting minerals. J. Geol., 67, 371-402.
- _____ (1961). Some applications of thermodynamics to coexisting minerals of variable composition. Examples: orthopyroxene-clinopyroxene and orthopyroxene-garnet. J. Geol., 69, 361-387.
- _____ (1963). Distribution of Mg and Fe between orthopyroxenes and calcic pyroxenes in natural mineral assemblages. J. Geol., 71, 773-785.
- Kushiro, I. en Yoder, H.S. (1966). Anorthite-forsterite and anorthite-enstatite reactions and their bearings on the basalt-eclogite transformation. J. Petrology, 5, 195-218.
- Kwak, T.A.P. (1968). Ti in biotite and muscovite as an indication of metamorphic grade in almandine amphibolite facies rocks from Sudbury, Ontario. Geochim. cosmochim. Acta., 32, 1222-1229.
- _____ (1974). Natural staurolite breakdown reactions at moderate to high pressure. Contr. Mineral. Petrol., 44, 57-80.
- Lal, R.K. en Moorhouse, W.W. (1969). Cordierite-gedrite rocks and associated gneisses of Fishtail Lake, Harcourt Township, Ontario. Can. J. Earth Sci., 6, 145-165.
- Leake, B.E. (1960). Compilation of chemical analyses and physical constants of natural cordierites. Am. Miner., 45, 282-298.
- _____ (1965). The relationship between tetrahedral aluminium and the maximum possible octahedral aluminium in natural calciferous and sub-calciferous amphibole. Am. Miner., 50, 843-851.
- _____ (1968). A catalog of analysed calciferous and subcalciferous amphiboles together with their nomenclature and associated minerals. Geol. Soc. Am. Spec. Paper, 98, 210 p.
- _____ (1971). An aluminous and edenitic hornblendes. Mineralog. Mag., 38, 389-407.
- Lee, S.M. en Holdaway, M.J. (1976). Cordierite breakdown under high-pressure conditions. A comment. Contr. Mineral. Petrol., 56, 289-295.
- Lepezin, G.G. en Melenevski, V.N. (1977). On the problem of water diffusion in the cordierites. Lithos, 10, 49-57.
- Loomis, T.P. (1975). Reactions zoning of garnet. Contr. Mineral. Petrol., 52, 285-305.
- _____ (1976). Irreversible reactions in high-grade metapelitic rocks. J. Petrology, 17, 559-588.
- Lopez Ruiz, J., Aparicio, A. en Garcia Cacho, L. (1978). Chemical variations in biotites during prograde metamorphism, Sierra de Guadarrama, Sistema Central Spain. Chem. Geol., 21, 113-129.
- Lyon, J.B. en Morse, S.A. (1970). MgO/FeO partitioning in garnet and biotite from some granitic, pelitic and calcic rocks. Am. Miner., 55, 231-246.
- Mason, R. (1970). The geology of the country between Francistown and Madinara - Northern Botswana. Ongepubl. PhD-proefschrift, Univ. Witwatersrand, Johannesburg, 186 p.
- _____ (1973). The Limpopo mobile belt - Southern Africa. Phil. Trans. R. Soc. Lond. (A), 273, 463-485.

- Miyashiro, A. (1953). Calcium-poor garnet in relation to metamorphism. Geochim. cosmochim. Acta., 4, 179-208.
- _____ (1973). Metamorphism and metamorphic belts. George Allen and Unwin LTD. London, 492 p.
- _____, en Shido, F. (1973). Progressive compositional change of garnet in metapelite. Lithos, 6, 13-20.
- Misch, P. en Onyeagocha, A.C. (1976). Symplectite breakdown of Ca-rich almandines in upper-amphibolite-facies Skagit Gneiss, North Cascades, Washington. Contr. Mineral. Petrol., 54, 189-224.
- Moore, A. (1970). Descriptive terminology for the textures of rocks in granulite facies terrains. Lithos, 3, 123-127.
- Mueller, R.F. (1960). Compositional characteristics and equilibrium relations in mineral assemblages of a metamorphosed iron formation. Am. J. Sc., 258, 449-497.
- _____ (1961). Analysis of relations among Mg, Fe and Mn in certain metamorphic minerals. Geochim. Cosmochim. Acta., 25, 267-296.
- Mukherjee, A. en Rege, S.M. (1972). Facies transition and the growth of hypersthene in some high-grade metamorphic rocks from the eastern Ghats, India. N. Jb. Miner. Monatsh. 3, 116-132.
- Nandi, K. (1967). Garnet as indices of progressive regional metamorphism. Mineralog. Mag., 36, 89-93.
- Newton, R.C. (1972). An experimental determination of the high-pressure stability limits of magnesium cordierite under wet and dry conditions. J. Geol., 80, 398-420.
- Osberg, P.H. (1971). An equilibrium model for Buchan-type metamorphic rocks, South-Central Main. Am. Miner., 56, 570-586.
- Papike, J.J. en Ross, M. (1970). Gedrites. Crystal structures and intracrystalline cation distribution. Am. Miner., 55, 1945-1972.
- Pitcher, W.S. en Read, H.H. (1963). Contact metamorphism in relation to manner of emplacement of the granites of Donegal, Ireland. J. Geol., 71, 261-296.
- Popp, R.K., Gilbert, M.C. en Craig, J.R. (1977). Stability of Fe-Mg amphiboles with respect to oxygen fugacity. Am. Miner., 62, 1-12.
- Prinsloo, M.C. (1977). Die geologie van 'n gebied in die omgewing van Giyani, noordoos Transvaal, met verwysing na moontlike ekonomiese mineraalafsetting. Ongepubl. MSc-verhandeling, R.A.U., 144 p.
- Raase, P. (1974). Al and Ti contents of hornblende, indicators of pressure and temperature of regional metamorphism. Contr. Mineral. Petrol., 45, 231-236.
- Rabbit, J.C. (1948). A new study of the anthophyllite series. Am. Miner., 33, 263-323.
- Rabkin, M.I. (1968). On depth conditions of regional metamorphism of the Anabar Shield. Intern. Geol. Congr. 23, Czechoslovakia, 4, 215-223.
- Ramsey, C.R. en Kamineni, D.C. (1977). Petrology and evolution of an archean metamorphic aureole in the Slave Kraton, Canada. J. Petrology, 18, 460-486.
- Ray, S. (1972). Significance of hornblende compositions from basic granulites of the type charnockite area near Madras. Neues Jahrb. Mineral. Monatsch., 456-466.
- Reinhardt, E.W. (1968). Phase relations in cordierite-bearing gneisses from the Gananoque area, Ontario. Can. J. Earth Sci., 5, 455-482.
- Richardson, S.W., Bell, P.M. en Gilbert, M.C. (1969). Experimental determination of kyanite-andalusite and andalusite-sillimanite equilibria; the aluminium silicate tripple point. Am. J. Sc., 267, 259-272.
- Robertson, I.D.M. (1973). Metamorphism and intrusion in part of the southern edge of the Rhodesian Craton and the north margin of the Limpopo Mobile Belt. Ongepubl. Phd-proefskrif. Univ. London.
- Robie, R.A. en Waldbaum, D.R. (1968). Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298,15^oK (15,0^oC) and one atmosphere (1,013 bars) pressure and at high temperatures. U.S. Geol. Surv. Bull. No. 1259, 248 p.

- Robinson, P. en Jaffe, H.W. (1969a). Aluminous enclaves in gedrite-cordierite gneiss from southwestern New Hampshire. Am. J. Sc., 267, 389-421.
- _____, (1969b). Chemographic exploration of amphibole assemblages from central Massachusetts and southwestern New Hampshire. Mineral. Soc. Amer. Spec. Pap. 2, 251-274.
- _____, Klein, C. en Ross, M. (1969c). Equilibrium coexistence of three amphiboles. Contr. Mineral. Petrol., 22, 248-258.
- _____, Ross, M. en Jaffe, H.W. (1971). Composition of the anthophyllite-gedrite series, comparison of gedrite and hornblende, and the anthophyllite-gedrite solvus. Am. Miner., 56, 1005-1041.
- Ross, M., Papike, J.J. en Shaw, K.W. (1969). Exsolution textures in amphiboles as indicators of subsolidus thermal histories. Mineral. Soc. Amer. Spec. Pap., 2, 275-299.
- Saxena, S.K. (1968a). Crystal-chemical aspects of distribution of elements among certain coexisting rock-forming silicates. Neues Jahrb. Mineral. Abhandl., 108, 292-323.
- _____, (1968b). Distribution of elements between coexisting minerals and the nature of solid solution in garnet. Am. Miner., 53, 994-1014.
- _____, (1969b). Silicate solid solution and geothermometry. 3. Distribution of Fe and Mg between coexisting garnet and biotite. Contr. Mineral. Petrol., 22, 259-267.
- _____, en Hollander, N.B. (1969). Distribution of iron and magnesium in coexisting biotite, garnet and cordierite. Am. J. Sc., 267, 210-216.
- Schmidt-Eisenlohr, W.F. (1969). Geological reconnaissance and nickel investigation in the Northern Transvaal. Ongepubl. verslag, Geol. Opn., Pretoria.
- Schmid, R., en Wood, B.J. (1976). Phase relationships in granulitic metapelites from the Ivrea-Verbano Zone (Northern Italy). Contr. Mineral. Petrol., 54, 255-279.
- Schreyer, W. en Schairer, J.F. (1961). Compositions and structural states of anhydrous Mg-cordierites: A reinvestigation of the central part of the system MgO-Al₂O₃-SiO₂. J. Petrology, 2, 324-406.
- _____, en Yoder, H.S. (1964). The system Mg-cordierite-H₂O and related rocks. Neues Jahrb. Mineral. Abhandl., 101, 271-342.
- Sen, S.K. (1970). Magnesium-iron compositional variance in hornblende-pyroxene granulite. Contr. Mineral. Petrol., 29, 76-88.
- _____, (1973). Compositional relations among hornblende and pyroxenes in basic granulites and an application to the origin of garnets. Contr. Mineral. Petrol., 38, 299-306.
- _____, en Chakraborty, K.R. (1968). Magnesium-iron exchange equilibrium in garnet-biotite and metamorphic grade. Neues Jahrb. Mineral. Abhandl., 108, 181-207.
- _____, en Ray, S. (1971). Breakdown reactions for natural hornblende in granulite facies. Neues Jahrb. Mineral. Abhandl., 114, 301-319.
- Stout, H.J. (1971). Four coexisting amphiboles from Telemark, Norway. Am. Miner., 56, 212-224.
- _____, (1972). Phase petrology and mineral chemistry of coexisting amphiboles from Telemark, Norway. J. Petrology, 13, 99-145.
- Sturt, B.A. (1962). The composition of garnet from pelitic schists in relation to the grade of metamorphism. J. Petrology, 3, 181-191.
- Terry, R.D. en Chilingar, G.V. (1955). Charts for estimating percentage composition of rocks and sediments. J. Sed. Petrol., 25, 229-234.
- Thompson, J.B. (1955). The thermodynamic basis for the mineral facies concept. Am. J. Sc., 253, 65-103.
- _____, (1957). The graphical analysis of mineral assemblages in pelitic schists. Am. Miner., 42, 842-858.

- Thompson, A.B. (1976). Mineral reactions in pelitic rocks: II. Calculation of some P-T-X (Fe-Mg) phase relations. Am. J. Sc., 276, 425-454.
- Turner, F.J. en Verhoogen, J. (1960). Igneous and Metamorphic Petrology. McGraw-Hill, New York. 694 p.
- Tuttle, O.F., en Bowen, N.L. (1958). Origin of granite in the light of experimental studies in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - KAlSi_3O_8 - SiO_2 - H_2O . Mem. geol. Soc. Am. 74.
- Van Reenen, D.D. en Du Toit, M.C. (in pers). The reaction garnet+quartz = cordierite+hypersthene in granulites of the Limpopo Metamorphic Complex in Northern Transvaal. Geol. Soc. S. Afr. Spec. Publ., 4.
- _____ (1978). Mineral reactions and the timing of metamorphic events in the Limpopo Metamorphic Complex south of the Soutpansberg. In: Ermanovics, I.F., Key, R.M. en McEwen, G. (Ed). The proceedings of a seminar pertaining to the Limpopo Mobile Belt. Bull. Geol. Surv. Botswana, 12, 107-127.
- Vernon, R.H. (1972). Reactions involving hydration of cordierite and hypersthene. Contr. Mineral. Petrol., 35, 125-137.
- _____ (1976). Metamorphic processes, reactions and microstructural development. George Allen and Unwin LTD. London, 247 p.
- _____, en Flood, R.H. (1977). Interpretation of metamorphic assemblages containing fibrolitic sillimanite. Contr. Mineral. Petrol., 59, 227-235.
- Viljoen, M.J. en Viljoen, R.P. (1969).
- An introduction to the geology of the Barberton Granite-Greenstone Terrain.
 - The geology and geochemistry of the Lower Ultramafic Unit of the Onverwacht Group and a proposed new class of igneous rocks.
 - The geological and geochemical significance of the Upper Formations of the Onverwacht Group.
- Upper Mantle Project, Geol. Soc. S. Afr. Spec. Publ. 2.
- Weisbrod, A. (1973). Cordierite-garnet equilibrium in the system Fe-Mn-Al-Si-O-H. Carnegie Instn. Wash. Year Book, 72, 515-523.
- Wilson, A.F. (1976). Aluminium in coexisting pyroxenes as a sensitive indicator of change in metamorphic grade within the mafic granulite terrain of the Fraser Range, Western Australia. Contr. Mineral. Petrol., 56, 255-277.
- Winkler, H.G.F. (1970). Abolition of metamorphic facies, introduction of the four divisions of metamorphic stage, and of a classification based on isograds in common rocks. Neues Jahrb. Mineral Monatsh. 5, 189-248.
- _____ (1974). Petrogenesis of metamorphic rocks, 3 rd. ed. Springer-Verlag, New York, 320 p.
- _____, en Sen, S.K. (1973). Nomenclature of granulites and other high-grade metamorphic rocks. Neues Jahrb. Mineral. Monatsh., 9, 393-402.
- Wood, B.J. (1973). Fe^{+2} - Mg^{+2} partitioning between coexisting cordierite and garnet. A discussion of the experimental data. Contr. Mineral. Petrol., 40, 253-258.
- _____ (1974). The solubility of alumina in orthopyroxene coexisting with garnet. Contr. Mineral. Petrol., 46, 1-15.
- _____, en Banno, S. (1973). Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems. Contr. Mineral. Petrol., 42, 109-124.
- Wood, B.J. en Fraser, D.G. (1976). Elementary thermodynamics for geologists. Oxford University Press, 303 p.
- Wyllie, P.J. (1977). Crustal anatexis: An experimental review. Tectonophysics, 43, 41-71.
- Wynne-Edwards, H.R. en Hay, P.W. (1963). Coexisting cordierite and garnet in regionally metamorphosed rocks from the Westport area, Ontario. Can. Mineral., 71, 453-478.
- Zen, E-an, (1963). Components, phases, and criteria of chemical equilibrium in rocks. Am. J. Sc., 261, 929-942.
- _____ (1966). Construction of pressure-temperature diagrams for multicomponent systems after the method of Schreinemakers - a geometric approach. US. Geol. Surv. Bull. No. 1225, 56 p.

VERWYSINGSBLAD VIR FIGURE EN TABELLE

FIGURE			TABELLE				
1a <u>en</u> b	p. 2	52	p. 261	1	p. 47	39	p. 256
2	p. 12	53a <u>en</u> b	p. 265	2	p. 51	40	p. 260
3a <u>en</u> b	p. 16	54a <u>en</u> b	p. 268	3	p. 64	41	p. 262
4	p. 19	55a <u>en</u> b	p. 272	4	p. 65	42a <u>en</u> b	p. 280
5a <u>en</u> b	p. 25	56a <u>en</u> b	p. 274	5	p. 101	43	p. 287
6	p. 30	57	p. 284	6	p. 116	44	p. 291
7	p. 36	58a <u>en</u> b	p. 285	7a	p. 121	45	p. 293
8a <u>en</u> b	p. 50	59	p. 288	7b <u>en</u> c	p. 122	46	p. 316
9a tot d	p. 54	60a <u>en</u> b	p. 290	7d <u>en</u> e	p. 123	47	p. 322
10a tot d	p. 66	61	p. 298	8	p. 124	48	p. 344
11a tot d	p. 76	62a <u>en</u> b	p. 300	9a	p. 130	49	p. 395
12a tot d	p. 82	63	p. 316	9b	p. 131	50	p. 411
13a tot c	p. 88	64	p. 320	10	p. 136	51	p. 412
14a tot d	p. 94	65	p. 329	11a	p. 143	52	p. 416
15a tot d	p. 102	66a	p. 331	11b	p. 144	53	p. 427
16	p. 111	66b <u>en</u> c	p. 332	12a	p. 145	54	p. 431
17	p. 120	66d	p. 334	12b	p. 147	55	p. 435
18a <u>en</u> b	p. 125	66e	p. 336	12c	p. 148	56	p. 436
18c	p. 126	66f	p. 337	13a	p. 151	57	p. 466
19	p. 132	67	p. 339	13b	p. 152		
20	p. 134	68	p. 346	13c	p. 153		
21	p. 139	69a <u>en</u> b	p. 347	14	p. 154		
22	p. 141	70	p. 360	15	p. 157		
23	p. 146	71	p. 361	16	p. 158		
24a <u>en</u> b	p. 150	72	p. 363	17	p. 161		
25	p. 163	73a	p. 371	18a	p. 168		
26	p. 166	73b	p. 372	18b	p. 169		
27a <u>en</u> b	p. 172	73c	p. 374	18c	p. 170		
28	p. 174	73d	p. 375	19	p. 171		
29	p. 180	74	p. 379	20a	p. 176		
30	p. 184	75a <u>en</u> b	p. 382	20b	p. 177		
31	p. 184	76a <u>en</u> b	p. 388	20c	p. 178		
32	p. 186	77	p. 389	20d	p. 179		
33	p. 188	78	p. 422	21	p. 181		
34	p. 193	79	p. 434	22	p. 183		
35	p. 197	80	p. 437	23	p. 185		
36	p. 200	81	p. 445	24	p. 189		
37	p. 203			25a	p. 195		
38	p. 205			25b	p. 196		
39	p. 208			26	p. 201		
40	p. 220			27	p. 207		
41	p. 223			28	p. 209		
42a <u>en</u> b	p. 226			29	p. 214		
43	p. 228			30	p. 216		
44a <u>en</u> b	p. 229			31a <u>en</u> b	p. 217		
45a <u>en</u> b	p. 231			32	p. 218		
46	p. 236			33	p. 221		
47a <u>en</u> b	p. 240			34	p. 235		
48	p. 241			35	p. 237		
49	p. 254			36	p. 241		
50	p. 258			37	p. 243		
51	p. 260			38	p. 255		