Zeitschrift: Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen = Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie

Band: 38 (1958)

Heft: 1

Artikel: Endomorphe Änderungen in den granodioritischen Hochplutonen Serbiens am Kontakt zu den Kalksteinen

Autor: Karamata, Stevan

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-29603

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Siehe Rechtliche Hinweise.

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. Voir Informations légales.

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. See Legal notice.

Download PDF: 26.04.2025

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

Endomorphe Änderungen in den granodioritischen Hochplutonen Serbiens am Kontakt zu den Kalksteinen

Von *Stevan Karamata* (Beograd)

Im Laufe der letzten Jahre wurden in der Boranja und im Kopaonik die granodioritischen Massive und die ihnen verwandten kleineren Massen eingehend untersucht. Es zeigte sich, dass in beiden Gebieten chemisch-endomorph kontaktveränderte Gesteine desselben Charakters auftreten.

Petrologische Charakteristik der granodioritischen Intrusivgesteine der Boranja und des Kopaoniks

Die granodioritischen und ihnen verwandten Intrusivgesteine des Kopaoniks und der Boranja sind tertiären Alters (Ćirić, 1956; Karamata, 1955). Unter diesen Gesteinen sind typische Granodiorite am verbreitetsten, Quarzmonzonite sind etwas seltener, Quarzdiorite und Diorite sind sehr selten (Wilson, 1933; Ilić, 1938; Talić in Bearbeitung; Karamata, 1955).

Alle diese Gesteine zeigen hypidiomorph körnige Struktur, nur längs den Rändern der Intrusivmassen sind manchmal auch alle Übergänge zwischen körnigen und holokristallin porphyrischen Varietäten vertreten. Diese Gesteine haben folgenden Mineralbestand:

Andesin: immer zonar aufgebaut, enthält in den granodioritischen Gesteinen des Boranja-Massivs durchschnittlich 38,5% An, in den granodioritischen und verwandten tertiären Intrusivgesteinen von Kopaonik 45% An;

Orthoklas: Krypto- bis Mikroperthit;

Quarz: undulös auslöschend;

Biotit: mehr oder weniger durch

Hornblende verdrängt;

Magnetit, Apatit, Titanit, Zirkon und *Orthit:* als Nebengemengteile.

In den Quarzdioriten und Dioriten nehmen Orthoklas und Quarz mengenmässig ab.

Alle granodioritischen Intrusivmassen der Boranja und des Kopaoniks sind in einem sehr hohen Niveau erstarrt, wofür folgende Beobachtungen sprechen:

1. Wegen der raschen Erstarrung des Magmas sind kleinere Intrusivmassive oder Randteile der grösseren porphyrisch ausgebildet.

2. Aus demselben Grund blieben die Einschlüsse von umgebenden Gesteinen in den Randteilen der Intrusivkörper fast unresorbiert.

3. Die Nebengesteine (Kalke, Tonschiefer, Sandsteine usw.) wurden bei der Intrusion der Magmenmassen in Andalusit-, Pyroxen- und Cordierithornfelse umgewandelt.

4. Der hohe Gehalt der Ab-Komponente im Orthoklas (KARAMATA, 1957) und die Verdrängung des Biotits durch die Hornblende (KARAMATA, 1956) weisen auf einen niedrigen Wassergehalt im Magma während der Kristallisation am endgültigen Erstarrungsort hin, der nur die Folge eines sehr kleinen Aussendrucks gewesen sein kann.

5. Die sehr schnelle Entblössung der Intrusivmassen durch die Wirkung der Erosion (Intrusion am Ende des Paläogens, Freilegung schon am Ende des Miozäns).

Dass diese Magmenmassen als Hochplutone und nicht als subvulkanische Bildungen erstarrten, ist nur den grossen zugeführten Wärmemengen, beziehungsweise den grossen Magmenmassen zuzuschreiben.

Besonders interessant ist die porphyrisch erstarrte Randfazies der granodioritischen Massive. Diese Randpartien der granodioritischen und ihnen verwandten Intrusivmassen am Kopaonik sind ganz analog denjenigen des Boranja-Granodioritmassivs ausgebildet. Diese sind am besten untersucht und sollen im folgenden beschrieben werden.

Die porphyrische Randfazies des Granodioritmassivs von Boranja hat holokristallin porphyrische Struktur mit relativ grobkörniger Grundmasse. Als Einsprenglinge finden sich Andesin (mit ca. 38% An) und Biotit. Die Grundmasse besteht aus Orthoklas, Quarz, wenig Andesin (mit 31—36% An) und Biotit. Die Korngrösse dieser Einsprenglinge entspricht vollkommen der Korngrösse derselben Mineralien in der körnigen Hauptmasse des Plutons. Diese Gesteine sind durch sehr rasche Erstarrung des granodioritischen Magmas unmittelbar am Kontakt zum relativ kalten Nebengestein entstanden.

Die übereinstimmende Grösse des Biotits und Andesins als Einsprenglinge in der porphyrischen Randfazies und in den körnigen Granodioriten sowie der ungefähr gleiche Anorthitgehalt der Andesine in

beiden Gesteinen und das fast vollkommene Zurücktreten des Andesins und des Biotits in der Grundmasse beweisen, dass die Ausscheidung dieser beiden Mineralien schon in einem tieferen Magmenherd fast abgeschlossen war. Zur Zeit der Intrusion des Magmas schwammen also in einer Schmelze von quarz- und alkalifeldspatischer Zusammensetzung Biotit- und Andesin-Einsprenglinge. Diese Schmelze muss sehr arm an Ca gewesen sein.

Allgemeine Charakteristik der Nebengesteine

An der Boranja intrudierte das granodioritische Magma in die Tonschiefer, Sandsteine und Kalke des Permokarbons und der Diabas-Hornstein-Formation. Die permokarbonischen Kalke sind über weitere Strecken sehr rein und von einheitlicher chemischer Zusammensetzung. Die chemische Zusammensetzung eines marmorisierten Kalks ist in Tabelle 1 angeführt. Am Kontakt zu den Magmenmassen wurden die Kalke in verschiedenartige Skarne von 20—30 m Mächtigkeit umgewandelt (Pyroxen-Skarne, Granatite, Amphibol-Skarne). Die chemischen Analysen von zwei Pyroxen-Granat-Skarnen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Die granodioritischen und verwandten Gesteine des Kopaoniks finden sich in paläozoischen und oberkretazischen Sedimenten. Diese Sedimentserien sind reich an reinen und manchmal auch dolomitischen Kalken. Am Kontakt mit den magmatischen Gesteinen sind sie in Skarne umgewandelt.

Chemisch-endomorphe Kontaktveränderungen

Wie schon oben erwähnt wurde, treten am Kontakt zu den Kalken in den magmatischen Gesteinsmassen an der Boranja und am Kopaonik oft endomorph veränderte Gesteine auf. Diese wurden an mehreren Stellen an der Boranja (am Berg Čavčići, am Berg Šajnovac, im Bach Ramnaja usw.) beobachtet, während sie am Kopaonik bisher nur von Gvozdac bekannt sind.

Die Untersuchungsergebnisse der endomorph veränderten Gesteine von Gvozdac hat mir Herr Ing. Š. Talić zur Verfügung gestellt, wofür ich ihm bestens danke.

Diese chemisch-endomorph veränderten Gesteine finden sich in schmalen Zonen am Kontakt mit den Skarnen und gehen nach einigen Metern (die maximale Mächtigkeit dieser Zonen beträgt etwas über

10 m) in normale, unveränderte granodioritische Gesteine über. Sie unterscheiden sich leicht von den normalen tertiären Intrusivgesteinen durch das Auftreten eines grünen Pyroxens, der an Stelle der Hornblende und des Biotits tritt.

Sehr interessant ist das Auftreten endomorpher Augit-Granite im Ramnaja-Bach, wo diese Gesteine nicht wie am Čavčići-Berg, Gvozdaz usw. eine lange Zone längs des Kontakts bilden, sondern als dünne, 2—3 cm mächtige Zonen längs Rissen vorkommen, in welche später aplitische Schmelzen eingepresst wurden.

Die endomorphen Kontaktgesteine zeigen hypidiomorph körnige Struktur. Sie bestehen aus Quarz, Orthoklas, Andesin und Augit. Manchmal sind noch Hornblende- oder Biotitrelikte vorhanden. Die Nebengemengteile sind dieselben wie in den normalen, unveränderten granodioritischen Gesteinen.

Die Eigenschaften der einzelnen Gemengteile sind:

Quarz: undulös auslöschend oder granular;

Orthoklas: Mikroperthit, zeigt manchmal Übergänge zu Mikroklin; schliesst oft Andesin ein, der myrmekitisiert und verdrängt wird;

Andesin: ist identisch mit demjenigen in den normalen, unveränderten Gesteinen; in den endomorph veränderten Gesteinen des Čavčići-Berges enthalten die Andesine 37% An.;

Augit: dem Diopsid nahestehend, schliesst oft Hornblende- oder Biotitrelikte ein, die orientiert sind.

Zum Vergleich sind in der Tabelle 1 die chemischen und in der Tabelle 2 die modalen Zusammensetzungen der endomorph veränderten Gesteine und der danebenliegenden unveränderten Intrusivgesteine vom Čavčići-Berg, vom Gvozdac und aus dem Ramnaja-Bach angeführt.

Aus den modalen Zusammensetzungen ersieht man, dass die endomorph veränderten Gesteine am Čavčići-Berg aus Granodiorit, am Gvozdac aus Diorit und im Ramnaja-Bach aus Quarzmonzonit entstanden sind. Dabei kam es zu einer Anreicherung von Kali-Feldspat und zur Verminderung des Gehaltes an femischen Gemengteilen, so dass aus dem Granodiorit am Čavčići-Berg ein quarzmonzonitisches, aus dem Diorit am Gvozdac ein monzonitisches und aus dem Quarzmonzonit im Ramnaja-Bach ein granitisches Gestein entstand.

Die chemischen Analysen zeigen deutlich, dass es in den endomorphen Kontaktgesteinen, in bezug auf die danebenliegenden unveränderten Intrusivgesteinen, zu einer Anreicherung von Calcium, Kalium und gewöhnlich Silizium und zu einer Verminderung des Eisen-, Natrium-, Wasser- und gewöhnlich auch des Aluminium-Gehaltes kam. (Der höhere

Tabelle 1. *Die chemischen Zusammensetzungen*

	I %	II %	III %	IV %	V %	VI %	VII %	VIII %	IX %
SiO_2	0,12	46,73	39,94	69,45	65,52	55,31	51,98	61,52	62,01
TiO_2	—	0,32	0,44	0,22	0,30	0,56	0,88	0,39	0,36
Al_2O_3	0,44	10,81	18,55	13,75	16,69	17,92	19,01	17,56	16,21
Fe_2O_3	0,53	4,64	3,55	0,28	1,68	1,50	4,02	0,61	2,21
FeO	—	4,46	1,15	0,98	1,67	1,92	5,20	1,55	2,68
MnO	—	0,58	0,32	0,05	0,09	0,14	0,26	0,08	0,11
MgO	1,09	3,00	3,54	1,47	1,55	4,09	4,20	2,25	3,67
CaO	54,21	23,25	29,13	5,30	4,11	10,05	7,59	6,32	4,68
Na_2O	—	0,18	0,67	2,99	3,60	2,86	3,75	2,86	3,31
K_2O	—	0,32	0,66	4,44	3,86	4,26	1,68	6,37	4,63
P_2O_5	—	—	0,10	0,18	0,23	0,29	0,25	0,20	0,21
H_2O^+	0,20	0,14	0,10	0,63	0,52	0,76	1,24	0,24	0,29
H_2O^-	0,28	0,07	0,34	0,18	0,34	0,29	0,28	0,21	0,05
CO_2	43,60	5,90	1,46	—	—	—	—	—	—
	100,47	100,40	99,95	99,92	100,16	99,95	100,34	100,16	100,42

I. Marmor, Čavčići-Berg (Boranja), 30 m vom Kontakt entfernt. Anal. Ing. G. Šoptrajanova.
II. Pyroxen-Granat Skarn, Čavčići-Berg (Boranja), 10 m vom Kontakt entfernt. Anal. Ing. V. Kneežvić.
III. Pyroxen-Granat Skarn, Čavčići-Berg (Boranja), 10 m vom Kontakt entfernt. Anal. Ing. G. Šoptrajanova.
IV. Augit-Quarzmonzonit, Čavčići-Berg (Boranja), 2 m vom Kontakt entfernt. Anal. Ing. G. Šoptrajanova.
V. Biotit-Hornblende-Granodiorit, Čavčići-Berg, östlicher Abhang (Boranja), 50 m vom Kontakt entfernt. Anal. Ing. S. Davidović.
VI. Augit-Monzonit, Gvozdac (Kopaonik), Anal. Ing. R. Talić.
VII. Hornblende-Biotit-Diorit, Gvozdac (Kopaonik), Anal. Ing. R. Talić.
VIII. Augit-Granit, Ramnaja-Bach (Boranja). Anal. Ing. V. Knežević.
IX. Hornblende-Biotit-Quarzmonzonit, Ramnaja-Bach (Boranja), 5 cm entfernt von der Probennahme VIII. Anal. Ing. V. Knežević.

Wassergehalt im Augit-Quarzmonzonit vom Čavčići-Berg in bezug auf den unveränderten Granodiorit vom Čavčići-Berg ist die Folge eines etwas grösseren Gehalts an sekundären Mineralien im Kontaktgestein.) Der Magnesium-Gehalt zeigt keine grösseren Schwankungen.

Tabelle 2. *Die modalen Zusammensetzungen*

	IV %	V %	VI %	VII %	VIII %	IX %
Quarz	9,2	13,2	0,7	2,8	8,0	14,5
Orthoklas	36,6	20,8	24,0	2,9	48,0	30,0
Andesin	36,2	48,2	47,4	59,9	24,0	30,5
Augit	16,5	—	20,3	—	19,0	—
Biotit	sp.	15,0	2,7	9,1	sp.	4,0
Hornblende	—	2,0	0,7	20,6	—	20,0
Nebengemengteile	1,5	0,8	4,2	4,7	1,0	1,0

Bezeichnungen wie in Tabelle 1.

Die Genese der chemisch-endomorph veränderten Kontaktgesteine

Da die granodioritischen und ihnen verwandten tertiären Intrusivmassen von Boranja und Kopaonik typische Hochplutone sind, muss man zur Deutung der Entstehung der chemisch-endomorphen Kontaktgesteine die Bedingungen, unter welchen sie entstanden sind, ins Auge fassen. Von grösster Bedeutung sind dabei folgende Charakteristiken des Hochpluton-Niveaus:

1. Kleiner Aussendruck, folglich
   a) rasches Entweichen des Wassers aus der magmatischen Schmelze nach der Intrusion und ein kleiner Wassergehalt im Magma nach Erreichung des Gleichgewichtes. Zwecks Erhaltung dieses Gleichgewichtes wird das Wasser auch später während der Kristallisation ständig abgegeben. Diese Wasserabgabe wird besonders intensiv an den Kontakten zu porösen Gesteinen (z. B. Kalken und Sandsteinen) sein. Der kleine Wassergehalt im Magma bedingt
      aa) grosse Viskosität der Schmelze und
      ab) ungünstige Bedingungen für eine Homogenisierung der Schmelze wegen der erschwerten Diffusion.

2. Niedrige Temperatur der Nebengesteine, folglich
   a) steiler Temperaturgradient normal zum Kontakt;
   b) relativ schnelles Abwechseln der hoch-, mittel- und niedrigtemperierten exogenen Kontaktgesteine, so dass die Skarne sehr schnell in Marmore, deren Chemismus bei der Kontaktmetamorphose kaum geändert wurde, übergehen;
   c) relativ schnelle Erstarrung der magmatischen Masse.
3. Das Gesamtsystem ist wegen geringer Tiefe (ausser in spezifischen Fällen) offen, so dass die gasförmigen Komponenten leicht zu den Gebieten kleinen Druckes (d. h. zur Erdoberfläche) entweichen können. CO_2, das unter der thermischen Einwirkung des Magmas bei der Zersetzung des Calcits frei wurde, konnte leicht in die Gebiete kleineren Druckes abwandern.

Bei der Erstarrung der Hochplutone stellt sich also eine ständige Strömung der leichtflüchtigen Bestandteile und der von diesen mitgeschleppten Komponenten von der Magmamasse zu den Nebengesteinen ein.

Die Entstehung chemisch-endomorph veränderter Kontaktgesteine der granitischen Massive erklärt man seit den klassischen Arbeiten von Michel-Levy, Lacroix und anderer Forscher durch Assimilation von Nebengesteinen, wobei die Diffusion, aus irgendwelchen Gründen, nicht in der Lage war, die Schmelze zu homogenisieren. Die Entstehung der chemisch-endomorph veränderten Gesteine von Kopaonik und Boranja kann nicht auf diese Weise gedeutet werden.

Die magmatischen Schmelzen, welche die granodioritischen Gesteine von Boranja und Kopaonik lieferten, intrudierten erst nach der Kristallisation der calciumhaltigen Silikate. Demnach war ihre Fähigkeit für eine Assimilation oder Aufschmelzung von Ca-Mineralien aus dem Nebengestein und Aufnahme der Ca-Komponente in die Schmelze minimal.

Die Entstehung dieser Kontaktgesteine am Boranja und Kopaonik kann auch nicht durch die Wirkung von spätmagmatischen Porenlösungen (im Sinne von Koržinski, 1955) oder einer wasserreichen Partialschmelze (im Sinne von Walker und Poldervaart, 1949), die gegenseitige Reaktionen zwischen magmatischem Gestein und Nebengestein ermöglicht, erklärt werden.

Eine ständige Strömung leichtflüchtiger Komponenten aus der magmatischen Masse erschwerte, ja verhinderte sogar eine Diffusion in gegenseitiger Richtung. Dies ist besonders deutlich bei der Bildung von

Augit-Graniten im Ramnaja-Bach, wo das Entweichen des Wassers entlang Rissen, die als Abzugskanäle dienten, stattfand. Ausserdem konnte es bei „bimetasomatischen" oder „reziproken" Wirkungen in den endomorphen Kontaktgesteinen nicht zu einer Anreicherung des Kaliums und Siliziums und zur Bildung von saureren Plagioklasen als in den normalen Granodioriten (wie am Čavčići-Berg) kommen.

Die Entstehung der endomorph veränderten Kontaktgesteine von Boranja und Kopaonik unter den oben angeführten Bedingungen kann nur durch Entweichen einiger Komponenten gedeutet werden. Dabei kam es zur Anreicherung der zurückgebliebenen und weniger migrationsfähigen Komponenten.

Beim Entweichen aus der magmatischen Masse schleppte das Wasser jedenfalls auch einen Teil der Restschmelze mit sich. Der zurückgebliebene Anteil der Restschmelze entsprach demnach einer fast trockenen Schmelze, die mit den vorher ausgeschiedenen (OH)-haltigen, dunklen Gemengteilen — Hornblende und Biotit — nicht mehr im Gleichgewicht war. Deshalb wurden diese Mineralien in Augit umgewandelt oder durch denselben verdrängt (KARAMATA, 1955, 1956). Dabei musste das Wasser, ein grösserer Teil des Eisens und ein Teil des Magnesiums aus dem Biotit und der Hornblende frei werden. Diese Komponenten wurden zusammen mit einem Teil der Restschmelze vom Wasser aus der Intrusivmasse mitgenommen und wanderten in die angrenzenden Kalke, wobei es zur Bildung von Skarnen kam.

Diese Prozesse der Materialabgabe mussten unter hohen Temperaturen stattfinden, da es danach zur Kristallisation von Ab-haltigem Orthoklas kam, was nach BOWEN und TUTTLE (1950) praktisch nur oberhalb 600° C möglich ist.

Um einen Einblick über die Intensität der Abwanderung verschiedener Komponenten zu bekommen, wird die annähernde Zusammensetzung des weggeführten Materials berechnet. Dabei wird angenommen, dass Calcium weder ein- noch abwanderte. Diese Annahme ist aus mehreren Gründen berechtigt. Die Mobilität des Calciums ist nach RAMBERG (zit. nach RANKAMA und SAHAMA, 1952) gewöhnlich klein; nach LAPADU-HARGUES (1945) ist Calcium nur migrationsfähiger als Kalium und Barium; BACKLUND (1936) nimmt an, dass die Migrationsfähigkeit eine Funktion der Ionenradien ist ($Ca^{\cdot\cdot}$ ist ein relativ grosses Ion), und KORŽINSKI (1955) ist der Ansicht, dass Calcium eine mittlere Migrationsfähigkeit besitzt, die jedoch bei einer Steigerung der Temperatur und Verminderung des Druckes stark abnimmt. Der Migration des Calciums aus der Magmamasse wirkte der Konzentrationsgradient dieser Kom-

ponente in den Porenlösungen entgegen. Im Falle, dass eine Calciumzufuhr stattfand, müssten die Andesine der endomorphen Kontaktgesteine basischer sein als diejenigen der unveränderten Granodiorite, oder sie müssten basischere Aussenzonen besitzen, was nicht beobachtet werden konnte. Ausserdem müssten in diesem Falle die Ca-Ionen gegen die Strömung migrieren, was kaum möglich wäre. Und schliesslich ist der Anreicherungsfaktor dieser Komponente, ohne Rücksicht auf den primären Calciumgehalt im magmatischen Gestein, fast konstant. Der reziproke Wert des Anreicherungsfaktors beträgt:

Bei den Gesteinen vom Čavčići-Berg: CaO-Gehalt im Granodiorit / CaO-Gehalt im endomorphen Quarzmonzonit 0,776
Bei den Gesteinen vom Gvozdac: CaO-Gehalt im Diorit / CaO-Gehalt im endomorphen Monzonit 0,755
Bei den Gesteinen aus dem Ramnaja-Bach: CaO-Gehalt im Quarzmonzonit / CaO-Gehalt im endomorphen Granit 0,740

Eine solche Beständigkeit der Verhältnisse besteht bei keiner anderen Komponente als beim Calcium; da der CaO-Gehalt in den nächstliegenden unveränderten Gesteinen stark variiert (von 4,11 bis 7,59), darf angenommen werden, dass keine wesentliche Zu- oder Abfuhr von Calcium bei der Bildung der endomorphen Kontaktgesteine stattfand, da sonst eine solche Beständigkeit nicht möglich wäre.

Die Berechnungen der Zusammensetzung der Stoffe, die bei der Entstehung der endomorphen Kontaktgesteine entwichen sind, wurden in den Tabellen 3 und 4 zusammengestellt; es wurde dabei angenommen, dass die Zusammensetzungen der Magmenmassen analog denjenigen der danebenliegenden unveränderten Intrusivgesteine waren. In der Tabelle 3 sind diese Berechnungen in Prozentgehalten und in Tabelle 4 in den relativen Ionenmengen angegeben. Die Resultate stimmen in beiden Fällen gut überein; die kleinen Unterschiede sind nur durch grobe Abrundung bei der Berechnung entstanden. In beiden Tabellen wurden folgende Zusammensetzungen berechnet:

a) Stoffe die bei der Entstehung des Augit-Quarzmonzonits aus dem Biotit-Hornblende-Granodiorit am Čavčići-Berg abgewandert sind;
b) Stoffe, die bei der Entstehung des Augit-Monzonits aus dem Hornblende-Biotit-Diorit am Gvozdac abgewandert sind, und
c) Stoffe, die bei der Entstehung des Augit-Granits aus dem Hornlende-Biotit-Quarzmonzonit im Ramnajabach abgewandert sind.

In Tabelle 3 und 4 sind zuerst die chemischen Zusammensetzungen, bzw. die relativen Ionenmengen für die endomorph veränderten Gesteine

Tabelle 3

	Ia %	IIa %	IIIa	IVa	Va %	VIa %
SiO_2	69,45	65,52	53,89	11,83	18	52,36
TiO_2	0,22	0,30	0,17	0,13	43	0,57
Al_2O_3	13,75	16,69	10,67	6,02	35	26,64
Fe_2O_3	0,28	1,68	0,22	1,46	87	6,47
FeO	0,98	1,67	0,76	0,91	55	4,03
MnO	0,05	0,09	0,04	0,05	55	0,22
MgO	1,47	1,55	1,14	0,41	26	1,82
CaO	5,30	4,11	4,11	—	—	—
Na_2O	2,99	3,60	2,32	1,28	35	5,67
K_2O	4,44	3,86	3,45	0,41	11	1,82
P_2O_5	0,18	0,23	0,14	0,09	39	0,40
	4,11/5,30 = 0,776			22,59		100,00
	Ib %	IIb %	IIIb	IVb	Vb %	VIb %
SiO_2	55,31	51,98	41,76	10,22	20	39,82
TiO_2	0,56	0,88	0,42	0,46	52	1,78
Al_2O_3	17,92	19,01	13,53	5,48	28	21,34
Fe_2O_3	1,50	4,02	1,13	2,89	71	11,25
FeO	1,92	5,20	1,45	3,75	73	14,60
MnO	0,14	0,26	0,11	0,15	57	0,58
MgO	4,09	4,20	3,09	1,11	26	4,32
CaO	10,05	7,59	7,59	—	—	—
Na_2O	2,86	3,75	2,16	1,59	42	6,19
K_2O	4,26	1,68	3,22	−1,54	—	(−)
P_2O_5	0,29	0,25	0,22	0,03	15	0,12
	7,59/10,05 = 0,755			25,68		100,00
	Ic %	IIc %	IIIc	IVc	Vc %	VIc %
SiO_2	61,52	62,01	45,52	16,49	26	62,49
TiO_2	0,39	0,36	0,29	0,07	19	0,26
Al_2O_3	17,56	16,21	12,99	3,22	20	12,20
Fe_2O_3	0,61	2,21	0,45	1,76	79	6,66
FeO	1,55	2,68	1,15	1,53	57	5,80
MnO	0,08	0,11	0,05	0,06	54,5	0,19
MgO	2,25	3,67	1,66	2,01	55	7,62
CaO	6,32	4,68	4,68	—	—	—
Na_2O	2,86	3,31	2,11	1,20	36	4,55
K_2O	6,37	4,63	4,71	−0,08	—	—
P_2O_5	0,20	0,21	0,15	0,06	30	0,23
	4,68/6,32 = 0,740			26,40		100,00

Angaben unter a beziehen sich auf das Material vom Čavčići-Berg
Angaben unter b beziehen sich auf das Material von Gvozdac
Angaben unter c beziehen sich auf das Material aus dem Ramnaja-Bach

Tabelle 4

	Ia	IIa	IIIa	IVa	Va %
Si	1156	1090	898	192	17,5
Ti	3	4	2,3	1,7	42,5
Al	270	327	210	117	36
Fe···	3,5	21	2,7	18,3	87
Fe··	14	23	10,8	12,1	53
Mn	1	1,5	0,7	0,8	53,5
Mg	36	38	28	10	26,5
Ca	94	73	73	0	0
Na	97	116	75	41	35,5
K	94	82	73	9	11
P	2,5	3	1,9	1,1	37
	Ib	**IIb**	**IIIb**	**IVb**	**Vb %**
Si	921	866	700	166	19,5
Ti	7	11	5,3	5,7	52
Al	351	373	268	104	28
Fe···	19	50	14,5	35,5	71
Fe··	26	72	19,8	52,2	73
Mn	2	3,5	1,5	2	57
Mg	102	104	71	27	26
Ca	179	136	136	0	0
Na	92	121	70	51	42
K	90	36	68,3	—32,3	—89,7
P	4	3,5	3	0,5	14,5
	Ic	**IIc**	**IIIc**	**IVc**	**Vc %**
Si	1025	1033	762	271	26
Ti	5	4,5	3,7	0,8	18
Al	345	318	258	60	19
Fe···	8	28	6	22	79
Fe··	21	37,5	15,8	21,7	58
Mn	1	1,5	0,7	0,8	53,5
Mg	56	92	41,5	50,5	55
Ca	113	84	84	0	0
Na	92	106	68	38	36
K	136	98	101	—3	—3
P	3	3	2	1	33

Angaben unter a beziehen sich auf das Material vom Čavčići-Berg
Angaben unter b beziehen sich auf das Material vom Gvozdac
Angaben unter c beziehen sich auf das Material aus dem Ramnaja-Bach

(Ia, Ib, Ic) und die gleichen Werte für die danebenliegenden, unveränderten Intrusivgesteine (IIa, IIb, IIc) angegeben. Dann wurden (IIIa, IIIb, IIIc) die Werte für die endomorphen Kontaktgesteine auf den gleichen Wert für Calcium wie bei den danebenliegenden unveränderten Gesteinen reduziert (z. B. für die Gesteine vom Čavčići-Berg bei den Prozentzahlen auf die Basis CaO = 4,11 und bei den relativen Ionenmengen auf CaO = 73). Dann wurden die Differenzen zwischen den Werten aus den Kolonnen II und III angegeben (IVa, IVb, IVc). Diese Werte zeigen die relativen Zusammensetzungen des abgewanderten Materials. In den Kolonnen Va, Vb und Vc sind die Prozentzahlen der abgewanderten Bestandteile für jede einzelne Komponente angegeben. Um die relativen Zusammensetzungen der abgeführten Stoffe deutlicher darzustellen, wurden am Schlusse die Werte aus den Kolonnen IV auf die Summe 100% umgerechnet (VIa, VIb, VIc).

Beim Vergleich der berechneten Zusammensetzungen der abgeführten Stoffe (Kolonnen VI in Tabelle 3) ergeben sich deutliche Unterschiede. So waren zum Beispiel die Stoffe, die bei der Bildung des Augit-Quarzmonzonits am Čavčići-Berg und des Augit-Granits im Ramnaja-Bach weggeführt wurden, kieselsäurereich bei mittlerem Eisengehalt. Demgegenüber waren die Stoffe, die bei der Bildung des Augit-Monzonits am Gvozdac abgeführt wurden, reich an Eisen und arm an Kieselsäure. Bei näherer Betrachtung sieht man aber, dass diese Unterschiede durch die Zusammensetzung des primären Materials bedingt sind. So ist der unveränderte Diorit von Gvozdac kieselsäurearm und reich an Eisen, die unveränderten Quarzmonzonite aus dem Ramnaja-Bach und die Granodiorite vom Čavčići-Berg sind dagegen eisenarm und kieselsäurereich.

Schliesslich wäre es für die Deutung der Genese dieser endomorph veränderten Gesteine interessant, die Zusammensetzung der Stoffe, die bei ihrer Bildung abgeführt wurden, mit der Zusammensetzung des Materials, das den Kalken zur Bildung von Skarnen zugeführt wurde, zu vergleichen. In Tabelle 5 ist diese Berechnung zusammengestellt. Dabei wurde angenommen, dass keine wesentliche Zu- oder Abfuhr von Calcium bei diesem Prozess stattfand. In Tabelle 5 sind zuerst die chemischen Zusammensetzungen zweier Skarne (Ia, Ib) und eines Marmors (IIa, IIb) vom Čavčići-Berg angegeben. Dann wurden (IIIa, IIIb) die Werte für die Skarne auf den gleichen Gehalt für Calcium wie beim Marmor (54,21) reduziert. Danach wurden die Differenzen zwischen den Werten aus den Kolonnen II und III angegeben (IVa, IVb) und diese Zahlen auf die Summe 100% berechnet (Va, Vb). Diese Prozent-

Tabelle 5

	Ia %	IIa %	IIIa	IVa	Va %	Ib %	IIb %	IIIb	IVb	Vb %
SiO_2	46,73	0,12	108,88	108,76	66,62	39,94	0,12	74,29	74,17	58,91
TiO_2	0,32	—	0,74	0,74	0,45	0,44	—	0,82	0,82	0,65
Al_2O_3	10,81	0,44	25,19	24,75	15,16	18,55	0,44	34,50	34,06	27,05
Fe_2O_3	4,64	0,53	10,81	10,28	6,29	3,55	3,53	6,60	6,07	4,81
FeO	4,46	—	10,39	10,39	6,36	1,15	—	2,14	2,14	1,69
MnO	0,58	—	1,35	1,35	0,82	0,32	—	0,59	0,59	0,46
MgO	3,00	1,09	6,99	5,90	3,60	3,54	1,09	6,58	5,49	4,35
CaO	23,25	54,21	54,21	—	—	29,13	54,21	54,21	—	—
Na_2O	0,18	—	0,42	0,42	0,25	0,67	—	1,24	1,24	0,98
K_2O	0,32	—	0,74	0,74	0,45	0,66	—	1,22	1,22	0,96
P_2O_5	—	—	—	—	—	0,10	—	0,18	0,18	0,14
CO_2	5,90	43,60	13,75	−29,85	—	1,46	43,60	2,71	−40,89	—
					100,00					100,00

zahlen geben die annähernde Zusammensetzung des den Marmoren zur Bildung von Skarnen zugeführten Materials an.

Beim Vergleich der berechneten Zusammensetzungen der den magmatischen Gesteinen abgeführten und den Marmoren zugeführten Stoffe sieht man, dass diese gut übereinstimmen. Grössere Unterschiede bemerkt man nur bei den Alkalien, was sicher die Folge ihrer Transportfähigkeit in Lösungen ist.

Betrachtung über die Migrationsfähigkeit einzelner Komponenten am Kontakt der Hochplutone zu den Kalken

Beim Vergleich der Prozentzahlen des abgeführten Materials für jede einzelne Komponente ergibt sich eine grosse Beständigkeit (Kolonne V in den Tabellen 3 und 4).

Diese Prozentzahlen kann man also als relativen Masstab für die Migrationsfähigkeit annehmen, und die schwerflüchtigen Komponenten können demnach wie folgt in Reihen angeordnet werden:

Migrationsfähigkeit

grösste ←——————————————————————→ kleinste

1. Bei der Bildung des endomorphen Augit-Quarzmonzonits aus dem Granodiorit am Čavčići-Berg:

$$Fe''' > Fe'', (Mn) > (Ti) > (P) > Na, Al > Mg > Si > K > Ca$$

2. Bei der Bildung des endomorphen Augit-Monzonits aus dem Diorit am Gvozdac:

$$Fe'' \geqslant Fe''' > (Mn) > (Ti) > Na > Al > Mg > Si > (P) > Ca \quad K\ (?)$$

3. Bei der Bildung des endomorphen Augit-Granits aus dem Quarzmonzonit im Ramnaja-Bach:

$$Fe''' > Fe'' \geqslant Mg > (Mn) > Na > (P) > Si > Al, (Ti) > Ca \quad K\ (?)$$

P, Ti und Mn wurden in Klammern gesetzt, weil sie nur in kleinen Mengen vertreten sind und ihre Einordnung in die Reihen deshalb unsicher ist.

Wenn nur die wichtigsten Komponenten in Betracht gezogen werden, erhält man die folgenden Reihen:

1. Fe > Na, Al > Mg > Si > K > Ca ist inert
2. Fe > Na > Al > Mg > Si > Ca ist inert K (?)
3. Fe > Mg > Na > Si > Al > Ca ist inert K (?)

Aus den obigen Angaben ergibt sich, dass am Kontakt der granodioritischen und ihnen verwandten Hochplutone zu den Kalken die am leichtesten migrierende Komponente (ausser Wasser und CO_2) das Eisen ist. Dabei ist die Migrationsfähigkeit des dreiwertigen Eisens grösser oder ungefähr gleich derjenigen des zweiwertigen. Ähnlich verhält sich auch Mangan. Der abgeführte Anteil dieser Komponenten beträgt immer über 53%.

Nach der Migrationsfähigkeit geordnet folgt als zweite Gruppe Magnesium, Natrium und Aluminium und von den weniger vertretenen Komponenten Titan und Phosphor. Der abgeführte Anteil dieser Elemente schwankt zwischen 20 und 55%. Die Migrationsfähigkeit dieser Komponenten ändert sich von Fall zu Fall und hängt von der chemischen Zusammensetzung des Nebengesteins und der magmatischen Masse ab.

Die Migrationsfähigkeit der Kieselsäure ist noch kleiner. Der abgeführte Anteil dieser Komponente variiert zwischen 18 und 26%.

Calcium ist mehr oder weniger inert.

Die Migrationsfähigkeit des Kaliums kann nicht genauer bestimmt werden, da diese Komponente auch in der magmatischen Masse selbst stark migrierte.

Eine allgemeine Reihe der Hauptelemente des Magmas nach ihrer Migrationsfähigkeit wäre also:

$$Fe^{\cdots} > Fe^{\cdot\cdot} > Mg, Na, Al > Si > K\ (?) > Ca$$

die grösste ←——————————————→ die kleinste

Migrationsfähigkeit

Diese Reihe ist fast identisch mit derjenigen, in welcher die Elemente nach ihrer Ionengrösse geordnet sind, besonders wenn man annimmt, dass Aluminium teilweise und Silizium grösstenteils schon im Magma in Komplexe mit $O^{\cdot\cdot}$-Ionen gebunden sind. Deswegen muss man für die Ionengrösse dieser Komponenten einen mittleren Wert annehmen.

Die Migrationsfähigkeit ist aber keinenfalls nur die Folge der Grösse des Ionenradius, sondern ist von einer Reihe verschiedener Faktoren abhängig, besonders vom Konzentrationsgradient.

Solche Migrationen der Elemente finden nicht nur am Kontakt zu Kalken, sondern auch zu anderen Gesteinen statt; in diesen Fällen ist aber die Diffusionsmöglichkeit für Wasser als Hauptträger für die anderen Komponenten zu klein, so dass die Gesamtmenge des migrierten Materials klein und deswegen schwer zu untersuchen ist.

Die Untersuchungen der Migrationsphänomene bei den Hochplutonen, wie zum Beispiel bei denjenigen von Kopaonik und Boranja, sind

besonders interessant und wichtig, da in einem so hohen Niveau alle Komponenten in einer Richtung migrieren und folglich die besten Resultate zu erhalten sind. Bei den tieferen Plutonen erfolgt der Stoffaustausch gegenseitig, was die Untersuchungen der Migrationsfähigkeiten erschwert.

Zusammenfassung

In den Granodioritmassiven von Boranja und Kopaonik sind am Kontakt zu den Kalken sehr typische chemisch-endomorph veränderte Gesteine vertreten. Da es sich bei diesen Massiven um Hochplutone handelt, die in kalkreiche Sedimentserien oder metamorphe Gesteinsserien intrudiert sind, erschienen sie sehr geeignet für Untersuchungen von endomorphen Kontaktveränderungen.

Bei den Granodioriten und den ihnen verwandten Intrusivgesteinen von Boranja und Kopaonik sind oft am Kontakt zu den Kalken folgende Gesteinsfolgen entwickelt:

	Granodiorit (Quarzmonzonit ⟷ oder Diorit)	Endomorph verändert Granodiorit (Quarz- ⟷ monzonit od. Diorit)	Skarn	⟷ Marmor
Mineralzusammensetzung	Andesin, Orthoklas, Quarz, Biotit, Hornblende	Orthoklas, Andesin (etwas saurer), Quarz, Pyroxen	Granat, Pyroxen, Quarz, Amphibol (Plagioklas)	Calcit
Mächtigkeit		um 10 m	20 bis 30 m	

Im Vergleich mit den normalen, unveränderten Intrusivgesteinen sind die endomorph-kontaktveränderten Gesteine reicher an CaO, K_2O und SiO_2 und ärmer an Al_2O_3, Fe_2O_3, FeO, Na_2O und H_2O. In den Skarnen dagegen, in bezug auf die Kalke, sind SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, FeO und MgO stark und die Alkalien schwach angereichert.

Da die Anreicherung des K und Si in endomorph veränderten Kontaktgesteinen keinenfalls durch Assimilation von Kalken oder gegenseitige Reaktionen und Stoffaustausch zwischen Magma und Kalken erklärt werden kann, muss man annehmen, dass die Anreicherung dieser Komponenten nur relativ ist und durch Entweichen anderer Komponenten entstanden ist.

Dafür spricht auch folgendes:

1. Die berechnete Zusammensetzung der Stoffe, die bei der Bildung von endomorph veränderten Gesteinen abgewandert sind (unter der Annahme, dass es keine Zufuhren gab), zeigen eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Zusammensetzungen der Stoffe, die den Marmoren bei der Bildung von Skarnen zugeführt wurden.

2. Die gleiche Zusammensetzung der Plagioklase in den normalen und in den kontaktveränderten Intrusivgesteinen (die kontaktveränderten Gesteine enthalten manchmal sogar saurere Plagioklase als die danebenliegenden unveränderten Granodiorite).

3. Das Magma bestand bei der Intrusion aus ausgeschiedenen Ca-Mg-Fe-Silikaten und Ca-Alumosilikaten und einer Restschmelze von der Zusammensetzung Quarz-Alkalifeldspat. Deswegen konnte die Aufnahme von Ca nur sehr beschränkt erfolgen.

4. Wegen des Entweichens von Wasser aus dem Magma, als Folge des hohen Niveaus, war die Möglichkeit für Gegenströmungen sehr klein, besonders in den Fällen, in denen die Abwanderung des Wassers längs Rissen stattfand.

5. Der Faktor für die Anreicherung von Ca ist, obwohl der CaO-Gehalt in den unveränderten Intrusivgesteinen zwischen 4 und 8% schwankt, immer gleich.

Auf Grund der oben angeführten Angaben kann man die Entstehung der endomorph veränderten Kontaktgesteine in den granodioritischen und ihnen verwandten Hochplutonen von Boranja und Kopaonik am Kontakt zu den Kalken nur als Folge einer Exomigration, d. h. Entweichung verschiedener Komponenten aus dem Magma erklären.

Es folgt aus den Berechnungen, dass sich die Elemente nach ihrer Migrationsfähigkeit unter solchen Bedingungen in die folgende Reihe einordnen lassen:

Migrationsfähigkeit

grösste ←——————————————————————→ kleinste

$Fe^{\cdots} < Fe^{\cdot\cdot} > Mg, Na, Al > Si > K\ (?) > Ca$

Literatur

Backlund, H. G. (1936): Der „Magmaaufstieg" in Faltengebirgen. C. R. Soc. géol. Finlande. No. IX, p. 293—347. Helsinki.

Barth, T. W. (1952): Theoretical Petrology. New York.

Bowen, N. L. (1956): The Evolution of the Igneous Rocks. New York.

Bowen, N. L. and Tuttle, O. F. (1950): The Sistem $NaAlSi_3O_8$-$KAlSi_3O_8$-H_2O. J. of Geol. Vol. 58, p. 489—511.

Ćirić, B. (1956): Beitrag zur Geologie des Kopaonik-Gebirges. Bull. géol. Soc. géol. du Crna Gora (Montenegro). Livre I, p. 73—90. Cetinje.

Damen, W. H. (1951): Variations in chemical composition across igneous contacts. Bull. Geol. Soc. of America. Vol. 62, No. 6, p. 547—557.

Ilić, M. (1938): Die Eruptivgesteine der Umgebung von Raška. Bull. du Serv. géol. du R. de Yougoslavie. T. VII, p. 217—287. Beograd.

Karamata, S. (1955): Petrologische Studie der magmatischen und kontaktmetamorphen Gesteine der Boranja (West-Serbien). Bull. de Museum d'hist. nat. de pays Serbe. Ser. A, livre 6/1. Beograd.

— (1956): Die Reaktions-Gefüge des Biotits in tertiären Granodioritmassiven Serbiens. Neues Jb. f. Min. etc. Mh, p. 73—82.

— (1957): Augit-Granite im Granodioritmassiv der Boranja (West-Serbien). Schweiz. Min. Petr. Mitt., Bd. 37, H. 1, p. 51—63.

Koržinski, D. S. (1955): Očerk metasomatičeskih procesov. Osnovnie problemi v učenii o magmatogenih rudnih mestoroždenijah. Ak. Nauk SSSR. Moskva.

Lapadu-Hargues, P. (1945): Sur l'existence et la nature de l'apport chimique dans certaines séries crystallophylliennes. Bull. Soc. géol. France 5, sér. 15, p. 255—307.

Raguin, E. (1946): Géologie du granite. Paris.

— (1948/49): Aspects de la formation du granite. Jaarboek der Mijnbouwkundige Vereeniging. Delft.

Ramberg, H. (1952): The origin of metamorphic and metasomatic rocks. Chicago.

Rankama, K. and Sahama Th. G. (1952): Geochemistry. Sec. Impr. Chicago.

Read, H. H. (1953): Granites and granites. Origin of granite. Geol. Soc. of America, Memoir 28, p. 1—19.

Termier, H. and Termier, G. (1956): L'évolution de la litosphère. I. Pétrogénèse. Paris.

Turner, F. J. and Verhoogen, J. (1951): Igneous and metamorphic petrology. New York.

Walker, F. and Polderwaart, A. (1949): Karoo dolerites of the Union of South Africa. Bull. Geol. Soc. of America. Vol. 60, No. 4, p. 591—706.

Whitten, E. T. H. (1953): Modal and chemical analysis in regional studies. Geol. Mag. Vol. XC, No. 5, p. 337—344.

Wilson, G. (1933): The geology, petrology and structure of the Brzeće area, Kopaonik mts. Jugoslavia, with a contribution to the problem of alpine tectonics. Ann. géol. de la Péninsule Balkanique. Tome XI, parte 2, p. 1—53. Beograd.

Eingegangen: 23. Oktober 1957.