

# Hydrogeologische Untersuchungen auf der Insel Serifos (Griechenland) zur Beschaffenheit der granodioritischen Wässer

*Investigations to the Hydrochemical Composition of Granodioritic Waters in Serifos Island (Greece)*

N. J. LAMBRAKIS<sup>1)</sup>, L. TINIAKOS<sup>2)</sup>, K. VOUDOURIS & G. A. KALLERGIS<sup>1)</sup>

## Inhalt

	Seite
1. Einführung .....	95
2. Geographische und geomorphologische Daten .....	97
3. Geologische und tektonische Beschreibung .....	98
4. Hydrologie und Hydrogeologie .....	101
4.1. Klimatische Beschreibung .....	101
4.2. Hydrolithologie .....	101
4.3. Hydrogeologie des Serifos-Granodiorites .....	101
5. Grundwasserbeschaffenheit .....	102
5.1. Probenahme – Analyseverfahren .....	102
5.2. Darstellung der Ergebnisse aus den chemischen Analysen .....	103
5.3. Statistische Bearbeitung der hydrochemischen Daten (Faktorenanalyse)	106
5.3.1. R-Mode Faktorenanalyse .....	106
5.3.2. Ergebnisse und Interpretation .....	108
6. Schlußfolgerungen .....	108
Zusammenfassung .....	108
Literatur .....	109
Summary .....	110

## 1. Einführung

Die Insel Serifos liegt in der Südwest Ägäis und gehört zur Inselgruppe der Zykladen (Fig. 1). Der Granodiorit von Serifos wurde in der Vergangenheit vielfach unter-

<sup>1)</sup> Dr. Nikos J. LAMBRAKIS, Assistant Professor, Dr. Kostas VOUDOURIS, Geologist, Postdoctoral Research Fellow, Dr. George A. KALLERGIS, Professor, University of Patras, Section of Applied Geology and Geophysics, GR 261 10 Patras.

<sup>2)</sup> Dr. Leonard TINIAKOS, Geologist, Region of Western Greece, Dpt. of Water Management and Mineral Wealth, N.E.O Patron-Athinon 28, GR 261 10 Patras.



Fig. 1: Griechenland und die Ägäischen Inseln.  
Greece and the Aegean Islands, Serifos.

sucht – z. B. G. MARINOS (1951), K. ZACHOS (1951). Flächenmäßig nimmt er über 30 %, d. h. 25 km<sup>2</sup> der 78 km<sup>2</sup> großen Insel ein.

Obwohl auf der Insel kaum mehr als 900 Menschen leben, wird in den letzten Jahren ein rascher Aufschwung des Tourismus beobachtet: Während der Monate Juli und August besuchen mitunter mehr als 10 000 Touristen Serifos, die natürlich hohe Ansprüche an die Wasservorkommen der Insel und deren Qualität stellen. Die waldlose Insel mit mindestens sechs völlig regenfreien Monaten und einem Jahresniederschlag in der Größenordnung von 400–500 mm wird dadurch überlastet.

Granitische und granodioritische Gesteine gehören keineswegs zu den guten Grundwasserleitern. Allerdings bieten sie einen Vorteil, der sich für die ägäische Inselwelt als sehr wichtig erweist: Die Versickerung des Regenwassers von der Granodioritoberfläche durch die Verwitterungsschicht und die Klüfte sowie die relativ niedrige Transmissivität verzögern den unterirdischen Abfluß des Grundwassers, so daß es im Sommer aus Bohrungen bzw. Brunnen abgepumpt werden kann. Die übrigen geologischen Formationen der Insel sind entweder fast wasserundurchlässig oder haben wegen der Versalzung des Grundwassers (Marmore) keine nutzbaren Wasservorkommen.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden 23 Wasserproben aus Brunnen und Quellen gesammelt und bearbeitet. Die Beprobung fand im April 1995 statt.

## 2. Geographische und geomorphologische Daten

Serifos ist eine extrem felsige Insel mit meist schroffen Steilküsten. Sandige Küsten entwickeln sich ideal entlang der süd- und südöstlichen Küstenlinie der Insel, vor allem im Schutz kleiner Buchten. Die vorgeschichtlichen Wälder wurden für die Energieversorgung der Metallgewinnung aus den Eisenerzlagerstätten der Insel bis zur völligen Vernichtung abgeholzt. (T. EVANGELIDIS, 1909). Weite Flächen werden für die Landwirtschaft und Viehzucht genutzt. Der Abbau des natürlichen Ökosystems spiegelt sich in der Vorherrschaft der Phrygana-Vegetation wider; der fruchtbare Boden und die feinkörnigen Sedimente der Verwitterungszone wurden von Wind und Regen erodiert.



Fig. 2: Topographische Karte der Insel Serifos. 1 – Dorf oder Kleinstadt, 2 – Beprobungspunkt, 3 – Berggipfel (Höhe in m NN).  
Topographic map of Serifos Island. 1 – village or small town, 2 – sampling point, 3 – mountain top with altitude (m NN).

Der höchste Gipfel der Insel ist Troullos (572 m NN) und liegt auf der Wasserscheide, die von NE nach SW verläuft und für die hydrologische Situation der Becken auf der Insel von Bedeutung ist. Die höchste Erhebung im Granodioritgebiet liegt nordöstlich der Bucht von Koutalas und ist 509 m hoch. Gut ausgebildete Erosionsebenen erstrecken sich zwischen 500 und 570 m (Troullos), 400 und 440 m (zentrale Hochebene der Insel sowie nordwestlich des Dorfes Ramos) und in kleinerem Maße an verschiedenen Stellen zwischen 200 und 220 m (Fig. 2).

Das wichtigste Einzugsgebiet entwickelt sich im südöstlichen Teil der Insel und bildet die Ebene von Livadi, dessen wellengeschützte Bucht den einzigen Hafen von Serifos beherbergt. Hier mündet auch der größte Trockenfluß der Insel, der bis in den Juni hinein einen Abfluß aufweist. Vor der Regulierung des Flußbettes und der starken Bebauung existierte dort ein küstennahes Wasserökosystem mit reichhaltiger Schilfvegetation.

Die Berge der Insel sind zwar nicht sehr hoch, jedoch haben sich oft sehr steile Flanken, hauptsächlich im W und S der Hochebene zwischen den Buchten von Livadi und Koutalas, entwickelt.

Fast die ganze Insel wird durch alte Steinmauern vor Erosion geschützt – eine Maßnahme, die seit altersher für die ägäische Landwirtschaft von großer Bedeutung war. Der Verfall dieser „Xerolithies“ in unserer Zeit hängt mit der Zunahme der Erosion während der winterlichen Starkregen zusammen, aber auch mit dem Nachlassen der landwirtschaftlichen Tätigkeit.

### 3. Geologische und tektonische Beschreibung

Serifos wird geotektonisch der Attisch-Zykladischen Zone zugeordnet, wo die Metamorphite der Südzykladischen Einheit vorherrschen (vgl. K. KTENAS, 1913, D. MOUNTRAKIS, 1985 sowie Fig. 3). Zu dieser Einheit gehört ein Grundgebirge mit paläozoischen Gneisen, Amphiboliten und Schieferen, ein Schieferhorizont aus dem Permotrias, Marmore und Dolomite (Obere Trias – Obere Kreide) und metamorpher Flysch aus dem Tertiär.

In diesen Gesteinskomplex drangen im Miozän granitische Plutone ein. Der Granodiorit von Serifos ist ca. 10 Mio. Jahre alt. Seine Intrusion führte zu kontaktmetamorphen Veränderungen der umgebenden Gesteine, zu deren Aufwölbung sowie zur Bildung von eisenführenden Erzen. Es handelt sich hierbei um einen posttektonischen Granodiotit (G. MARINOS, 1951). Er besteht vorwiegend aus Orthoklas, Mikroklin, Plagioklasen, Biotit, Hornblende, Quartz, Magnetit und Titanit. Der granodioritische Charakter ergibt sich aus dem Verhältnis Orthoklas/Plagioklas  $< 0,6$ .

Die chemische Zusammensetzung des Serifos-Granodiorites zeigt Tab. 1 (übernommen von G. MARINOS, 1951).

Die Attisch-Zykladische Zone war drei getrennten metamorphen Phasen unterworfen, und zwar im Paläozoikum, Eozän und Miozän; letztere fällt mit der Intrusion von Plutoniten – darunter auch des Serifos-Granodiorites – zusammen. Vier Phasen tektonischer Verformung sind unterscheidbar. Die Klüftung des Serifos-Granodiorites (eine hydrogeologisch wichtige Eigenschaft) ist stark ausgeprägt. Überall sieht man die gut entwickelten Klüfte, die aber kaum größer als einige Millimeter sind. Viele Klüfte sind mit aplitischem Material verfüllt. Die Klüftrosendiagramme (Fig. 4) zeigen eine identische Verteilung der Klüftung des Granodiorites und der übrigen Gesteine der Insel.

Diese sind Gneise, Marmore, Hornfels und Glimmerschiefer. Die Erzminerale entwickelten sich in den Gneisen, in den Hornfelsen, in den Marmoren in der Form von Magnetit, Eisenoxiden und -hydroxiden, Sulfaterzen (Eisenkies, Galenit, Sphalerit) und Lievrit.

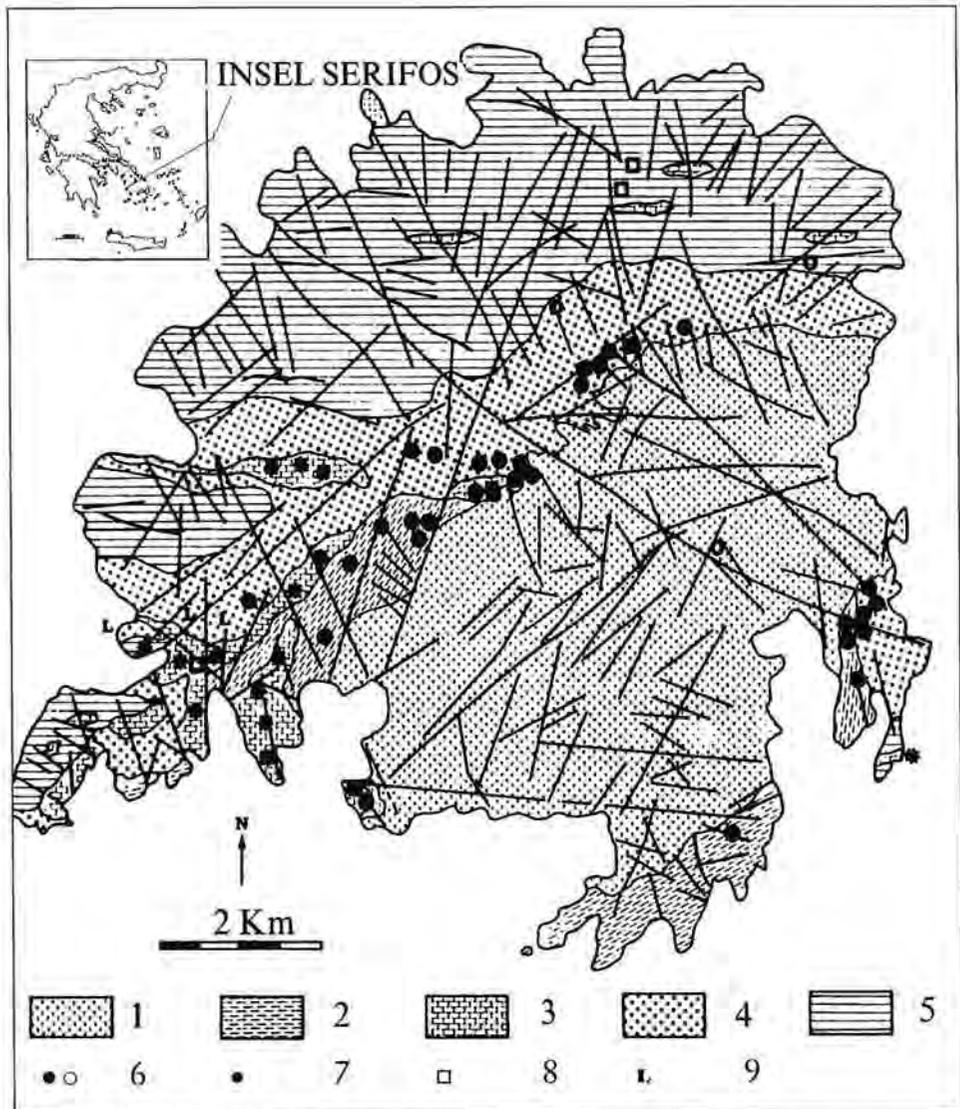


Fig. 3: Geologische Übersichtskarte (K. KTENAS, 1913, G. MARINOS, 1951) mit Ergänzung der Verwerfungen. 1 – Granodiorit, 2 – Gneis, 3 – Marmor, 4 – Hornfels, 5 – Glimmerschiefer, 6 – Magnetitkonzentrationen, 7 – Eisenoxid- und Hydroxidkonzentrationen, 8 – Schwefel- und Kupferkiesvorkommen, 9 – Lievritkonzentration.  
Generalized geological map (K. KTENAS, 1913, G. MARINOS, 1951), with faults. 1 – granodiorite, 2 – gneis, 3 – marble, 4 – hornfels, 5 – micaceous schist, 6 – magnetitic concentration, 7 – iron oxides and hydroxides, 8 – Pyrite and chalcopyrite, 9 – Lievrite concentration.

Tab. 1: Chemische Analyse des Serifos-Granodiorites (nach G. MARINOS, 1951). Angabe in Gewichtsprozent. A – Serifos-Granodiorit (Livadi Bucht), B – Serifos-Granodiorit (Halara), C – Granit (Granodiorit) aus Lavrion (Attika), D – Granit (Granodiorit) von der Insel Ikaria.  
 Chemical analysis of the Serifos Granodiorite (adopted from G. MARINOS, 1951). Data in weight percent. A – Serifos Granodiorite (Livadi Bay), B – Serifos Granodiorite (Halara), C – Granite (Granodiorite) from Lavrion (Attika), D – Granite (Granodiorite) from Ikaria Island.

	A	B	C	D
SiO <sub>2</sub>	71,02	68,22	69,72	70,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,19	16,08	13,75	15,65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,47	0,55	0,76	0,37
FeO	2,35	2,54	2,35	1,41
MnO	0,04	0,18	0,14	0,05
MgO	0,62	1,29	0,85	0,29
CaO	3,24	4,44	3,98	2,08
Na <sub>2</sub> O	3,14	3,47	3,45	4,51
K <sub>2</sub> O	3,59	2,42	3,26	4,03
TiO <sub>2</sub>	0,61	0,81	0,81	0,42
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12	0,12	0,09	0,12
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0,35	0,32	0,75	0,33
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0,16	0,09	0,26	0,10
Σ	99,90	100,53	100,23	100,20
Spez. Gew.	2,70	2,72	2,66	–

Die vertikale Bruchtektonik wird sichtbar durch die Vorherrschaft der schroffen Steilküsten von Serifos sowie durch die totale Abwesenheit von Neogenschichten aus der Umrahmung der Insel. (Fig. 3).

Rezente Sedimentation (Trockenflußablagerungen und denen sich anschließende strandnahe Fazies) findet praktisch nur in den Niederungen statt; die ganze Insel ist zu 95 % ein Deflations- und Erosionsgebiet. Die Korngrößenverteilung dieser Sedi-

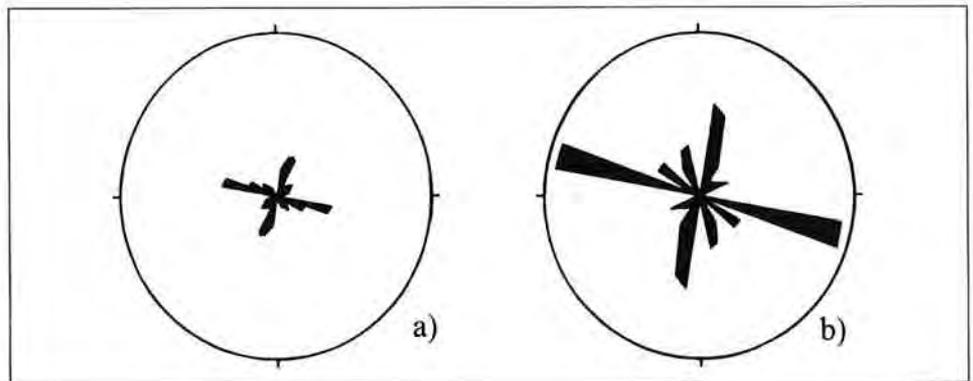


Fig. 4: Klufztrosendiagramme in Granodiorit (a) und in den übrigen Formationen (b) – übernommen von G. MARINOS (1951).  
 Joint-pattern diagrams in the granodiorite (a) and in the other formations (b) – adopted from G. MARINOS (1951).

mente entspricht bei fast fehlender Tonfraktion einem weiten Spektrum von Fraktionen (Blöcke, Gerölle, Sand). Schwermineralseifen entwickeln sich naturgemäß in allen sandigen Küstenbereichen, zumal das Angebot an Erzmineralien und sonstigen Schwermineralien sehr groß ist.

Der Granodiorit ist örtlich, insbesondere in Küstennähe, zu Granitgrus verwittert. Die Erzgerölle und der Erzsutt in der Nähe der alten Bergwerkbahnen und Transporthalden sind stark oxidiert. Die Verwitterung scheint rapide dort vorzuschreiten, wo sich kreuzende Klüfte dichter häufen.

## 4. Hydrologie und Hydrogeologie

### 4.1. Klimatische Beschreibung

Die Inseln des Westzykladischen Inselkomplexes zeichnen sich durch die allgemein niedrige Niederschlagsmenge im Vergleich zu den Ostzykladen aus. Das liegt daran, daß zum einen die warmfeuchten SW- und W-Winde ihre Niederschlagsmenge auf dem Peloponnes abregnen, zum anderen die kaltfeuchten N- und NE-Winde zuerst auf die Gebirge von Euböa, Andros und Tinos stoßen. Da auf Serifos keine meteorologische Station vorhanden ist, benutzen wir als Anhaltspunkt die naheliegenden Inseln Milos und Naxos (M. GLEZOS, 1994). Aufgrund der Daten dieser Inseln extrapolieren wir einen Jahresniederschlag in der Durchschnittshöhe des Granodioritgebietes von Serifos um die 530 mm. Der meiste Niederschlag fällt in Form von wenigen, aber sehr ergiebigen Regengüssen in der Zeit zwischen November und März. Schnee fällt im Januar und Februar; manchmal liegt sogar eine geschlossene Schneedecke bis zur Küste – so z. B. im Februar 1983.

### 4.2. Hydrolithologie

Mit Ausnahme der Marmore im SW-Teil der Insel sowie der quartären Ablagerungen der größeren Trockenflüsse, verhalten sich der Granodiorit, die Gneise und der Hornfels als halbdurchlässig bis undurchlässig. Die Versickerungsrate des Regenwassers im Granodiorit dürfte 7 % kaum überschreiten (die üblichen Werte für granitische Gesteine liegen bei 5–12 %; G. SOULIOS, 1979). Faktoren, welche die Versickerung negativ beeinflussen, sind das Fehlen von Vegetation und Boden sowie die starken Böschungen. Die Versickerung wird in der zentralen Hochebene der Insel und in allen Erosionsebenen begünstigt. In diesem Sinne sollten wir vor allem die Rolle der alten Steinmauern („Xerolithies“) der Bauern hervorheben, da sie wesentlich zur Erhöhung der Versickerungsrate entlang der Hügelhänge beitragen.

### 4.3. Hydrogeologie des Serifos-Granodiorites

Aus den Geländebeobachtungen im Granodioritgebiet und in den Niederungen der wichtigsten Trockenflüsse (Livadi, Koutalas) ergibt sich folgendes Bild: Es existieren zahlreiche kleine Quellen in allen Höhenlagen, hauptsächlich entlang jener Störungszonen, die mit Trockenflußtälern und kleineren Rinnen verbunden sind. Die Quellschüttung überschreitet nur selten 0,5 l/s – eine Menge, die aus vergleichbaren Gesteinen in Gebieten mit völlig unterschiedlichem Klimaregime anzutreffen ist (Schweden, Böhmen usw. – vgl. H. KARRENBERG, 1981).

In allen Granodioritquellen tritt das Wasser aus Klüften und nicht etwa am Kontakt zu einer liegenden wasserundurchlässigen Schicht hervor.

Quellen, die in Niederungen bzw. in niedrigen Lagen austreten, sind nicht ergiebiger als solche in höheren Lagen. Dies erklärt sich daraus, daß die Kluftöffnungen sehr eng sind – es ist anzunehmen, daß in einer relativ geringen Tiefe (40–50 m) praktisch keine Grundwasserbewegung stattfinden kann, was durch Bohrungen bestätigt worden ist.

Alle Wasserläufe, die aus mehreren Kleinquellen zu den alluvialen Niederungen von Koutalas und Livadi hin zusammenfließen, tragen dort zu einem vorübergehenden Grundwasserspiegelanstieg bei, der zu einem Überfließen des Aquifers bei Livadi, 300 m von der Küstenlinie entfernt, führt. Der lokale Wasserbedarf für Trinkwasserversorgung und Landwirtschaft wird durch flache Brunnen (4–6 m tief) in den Alluvialniederungen gedeckt; in den höheren Lagen (im Granodioritgebiet) werden 30–40 m tiefe Bohrungen benutzt. Pumpversuche in Brunnen und Bohrungen ergaben Transmissivitätswerte  $T$ , zwischen 15–22,5 m<sup>2</sup>/Tag (alluvialer Aquifer) und 1,2–2 m<sup>2</sup>/Tag (Granodiorit).

Das Speichervermögen  $S$  für den Granodiorit wurde mit 0,48 % berechnet.

## 5. Grundwasserbeschaffenheit

### 5.1. Probenahme – Analyseverfahren

Um die Grundwasserqualität und die chemischen Parameter des granodioritischen Aquifers zu bestimmen, wurden im April 1995 23 Wasserproben gezogen. Die Lage der Beprobungspunkte ersieht man aus Fig. 2.

Die Wasserproben wurden direkt am Quellaustritt bzw. aus dem Brunnen entnommen. Nach dem Filtrieren wurde jede Probe in zwei PET-Flaschen umgefüllt. In die erste (0,5 l) wurden 5 ml HCl zugegeben, um die Metalle bis zur Analyse in Lösung zu halten.

Vorort wurden die Temperatur, die elektrische Leitfähigkeit und der pH-Wert bestimmt: Der pH-Wert wurde mit einer Glaselektrode gemessen, die mit Hilfe von Pufferlösungen (pH 4 und 9) und bei Temperatur nahezu gleich der Wasserprobentemperatur ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) geeicht wurde. Die elektrische Leitfähigkeit (E.C.) wurde mit Hilfe eines Meßgerätes des Typs Y.S 1 Model 33 SCT ermittelt.

Die Analysen wurden im Labor für Hydrogeologie und Ingenieurgeologie der Universität Patras durchgeführt (HACH-Methode für  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{SiO}_2$ , total  $\text{Fe}^{2+/3+}$  und  $\text{Mn}^{2+}$ ). Die Erdalkalien wurden mit Hilfe der EDTA-Methode gemäß den Standardmethoden (S.M) analysiert. Gemäß den Standardmethoden erfolgte die Bestimmung der  $\text{HCO}_3^-$ -Ionen ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ -Titrierung),  $\text{Cl}^-$ -Ionen ( $\text{AgNO}_3$ -Titrierung), Sulfat-Ionen – UV-spectrophotometrische Methode (turbidimetrische Methode), Phosphat-Ionen – Aminosäure Methode,  $\text{SiO}_2$  – Silicomolybdat Methode. Mit Hilfe der Spektralphotometrie wurden die Nitrat-Ionen (Kadmium-Reduktion Methode), die Nitrit-Ionen (Diazotization Methode), total-Eisen (Ferrozine Methode) und Mangan (1-(2-Pyridylazo)-2-Naphtol (PAN) Methode) analysiert. Zur Feststellung der Natrium- und Kalium-Ionen wurde ein Flammenphotometer eingesetzt. Um die Genauigkeit der vorgenommenen Analysen zu kontrollieren, wurden einige Wasserproben im Labor für Analytische Chemie der Universität Patras untersucht: Die Abweichung der absoluten Werte betrug  $< \pm 5\%$ .

## 5.2. Darstellung der Ergebnisse aus den chemischen Analysen

Die aus den chemischen Analysen gewonnenen Daten sind in Fig. 5 und Tab. 2 eingearbeitet.

Wie aus Tab. 2 ersichtlich ist, schwankt die elektrische Leitfähigkeit (E.C.) zwischen 490 und 1270  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Diese Werte sind höher als sonst erwartet: Die höheren Ionenkonzentrationen der granodioritischen Wasserproben von Serifos werden offensichtlich von den Verwitterungsprodukten der Erzminerale beeinflusst.

Die pH-Werte sind meist  $> 7$ , dies ist auf den hohen Anteil der Alkalien zurückzuführen.

Die  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionenkonzentrationen liegen zwischen 23,2 und 110 mg/l und jene des Magnesiums zwischen 10,32 und 49,68 mg/l. Das Verhältnis  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  schwankt zwischen 0,31 und 1,24 (Durchschnittswert 0,70). Es handelt sich um Werte, die höher als die von H. SCHOELLER (1962) angegebenen Werte granitischer Aquifere sind (durchschnittlich 0,30). Der Granodiorit von Serifos weist also höhere  $\text{Mg}^{2+}$ -Gehalte auf. Nach G. MARINOS (1951) ist der Biotit ein wichtiges Nebenmineral im Granodiorit,  $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe(II)})_3(\text{OH})_2/\text{Al}, \text{Fe(III)}\text{Si}_3\text{O}_{10}$ ; P. RAMDOHR & H. STRUNZ (1967) halten dieses Mineral für eine wichtige Magnesiumquelle.

Als nicht unwesentlich ist jedoch der Einfluß des Meeres zu betrachten und zwar dadurch, daß Meerestropfen durch die starken Winde von den Küsten bis zu den Berggipfeln hinauf getragen werden, insbesondere während der Winterstürme (M. SCHOELLER, 1963).

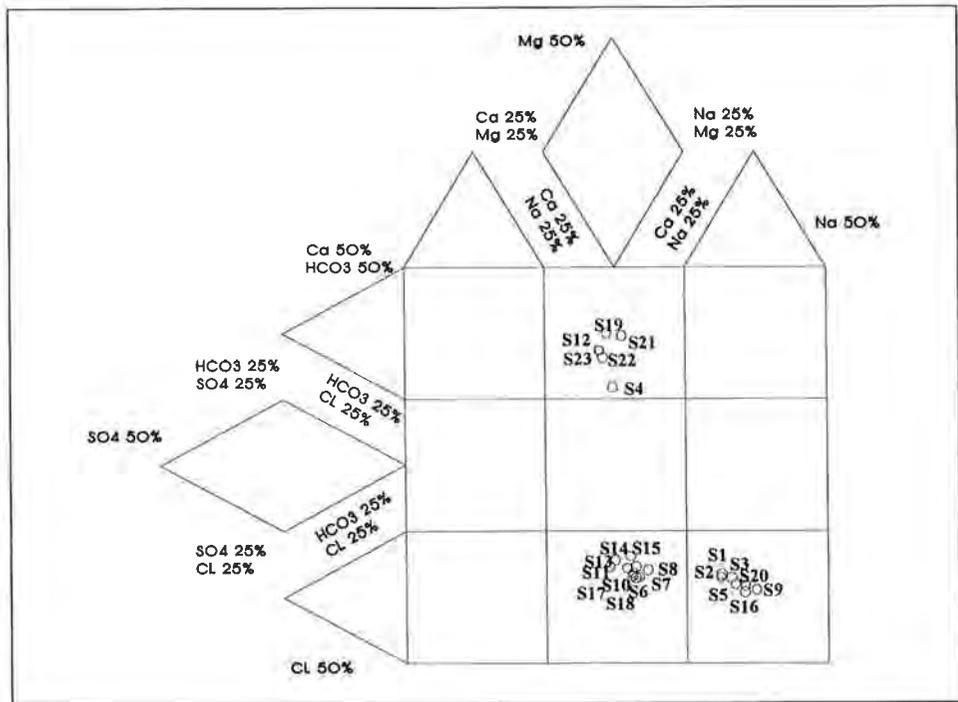


Fig. 5: Erweitertes DUROV-Diagramm für die 23 Wasserproben aus Serifos.  
Expanded DUROV diagram for the 23 water samples from Serifos.

Tab. 2: Chemische Analysen der Wässer aus dem granodioritischen Aquifer der Insel Serifos. Sch – Ionechindex,  $SI_c$  – Sättigungsindex Kalzit,  $SI_d$  – Sättigungsindex Dolomit; Ss<sup>G</sup>.21 – Proben-Nr: S = Serifos, W = Brunnen, s = Quelle, <sup>G</sup> = Granodiorit, <sup>al</sup> = Allwium (aus klastischen Materialien granodioritischen Ursprungs).  
 Chemical analyses of water samples from the granodioritic aquifer of Serifos Island. Sch – ion exchicients,  $SI_c$  – saturation index of calcite,  $SI_d$  – saturation index of dolomite; Ss<sup>G</sup>.21 – number of sample: S = Serifos, W = well, s = spring, <sup>G</sup> = Granodiorite, <sup>al</sup> = Alluvial (clastic material of granodioritic or)

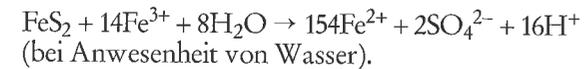
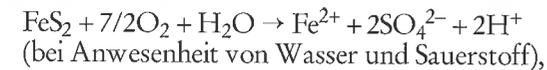
Probe-Nr.	pH	E.C. [µS/cm]	Cl <sup>-</sup> [mval]	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mval]	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [mval]	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mval]	Ca <sup>2+</sup> [mval]	Mg <sup>2+</sup> [mval]	NaK <sup>+</sup> [mval]	SiO <sub>2</sub> [mg/l]	T.Mn <sup>2+</sup> [mg/l]	T.Fe <sup>2+/3+</sup> [mg/l]	Na <sup>+</sup> /Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /Cl <sup>-</sup>	Mg <sup>2+</sup> /Ca <sup>2+</sup>	Sch	SI <sub>c</sub>	SI <sub>d</sub>
Ss <sup>G</sup> .1	7,10	730,00	4,37	1,77	1,17	0,037	1,92	1,38	4,074	26,10			0,99	0,27	0,71	-0,01	-0,87	-1,57
Ss <sup>G</sup> .2	7,02	490,00	3,52	1,14	0,46	0,012	1,16	0,98	3,085	29,70			0,98	0,13	0,84	0,00	-1,32	-2,44
Sw <sup>al</sup> .3	7,66	600,00	4,79	1,82	0,75	0,005	1,88	1,34	4,095	26,10			0,94	0,16	0,71	0,04	-0,30	-0,43
Ss <sup>G</sup> .4	7,55	650,00	3,8	2,22	1,67	0,005	3,22	1,28	3,067	28,70			0,80	0,44	0,39	0,18	-0,10	-0,28
Sw <sup>al</sup> .5	7,33	770,00	4,87	1,96	1,46	0,008	2,56	1,80	4,080	29,00			0,98	0,30	0,70	0,00	-0,48	-0,78
Sw <sup>al</sup> .6	7,50	700,00	4,7	2,1	1,23	0,012	2,72	1,80	3,069	26,70			0,78	0,26	0,65	0,21	-0,25	-0,35
Sw <sup>al</sup> .7	7,12	990,00	6,31	3,24	1,67	0,005	3,78	2,62	5,179	29,70			0,85	0,26	0,69	0,13	-0,34	-0,46
Sw <sup>al</sup> .8	7,18	590,00	5,04	2,44	1,17	0,012	2,38	2,12	4,077	22,90			0,86	0,23	0,88	0,12	-0,57	-0,85
Ss <sup>G</sup> .9	7,38	690,00	6,54	2,24	0,79	0,002	1,42	1,54	5,115	41,70			0,86	0,12	1,07	0,12	-0,63	-0,89
Sw <sup>al</sup> .10	7,06	600,00	5,24	2,32	0,60	0,008	2,42	2,12	3,053	24,80			0,67	0,12	0,87	0,32	-0,70	-1,12
Sw <sup>G</sup> .11	7,11	810,00	5,18	2,2	1,10	0,017	2,28	1,98	3,077	23,40			0,68	0,21	0,86	0,31	-0,70	-1,13
Ss <sup>G</sup> .12	7,59	890,00	4,06	3,42	2,08	0,013	3,78	2,58	2,056	44,30			0,66	0,51	0,68	0,32	0,17	0,53
Ss <sup>M,G</sup> .13	7,14	600,00	3,44	1,7	0,98	0,020	1,94	1,36	2,126	40,70			0,66	0,28	0,69	0,31	-0,82	-1,50
Ss <sup>G</sup> .14	7,19	920,00	5,18	3,34	1,02	0,013	3,94	1,54	3,054	12,90			0,75	0,20	0,35	0,24	-0,21	-0,49
Ss <sup>G</sup> .15	7,56	1091,00	5,61	3,64	0,92	0,037	4,12	2,48	5,090	18,70	0,10	0,04	0,93	0,16	0,60	0,05	0,05	0,10
Ss <sup>G</sup> .16	7,06	936,00	5,58	2,0	1,06	0,022	1,63	2,05	5,090	18,20	0,00	0,32	0,97	0,19	1,24	0,02	-1,08	-1,88
Sr <sup>al</sup> .17	7,13	670,00	4,03	2,2	0,52	0,022	3,06	1,08	2,046	14,20	0,00	0,07	0,68	0,136	0,35	0,31	-0,68	-1,65
Ss <sup>G</sup> .18	7,82	662,00	4,42	1,92	1,00	0,051	2,5	1,10	3,079	21,20		0,01	0,73	0,23	0,44	0,25	-0,14	-0,47
Ss <sup>G</sup> .19	7,32	580,00	2,25	2,3	0,71	0,066	2,78	0,86	237,054	20,80	0,10	0,00	1,05	0,31	0,31	-0,08	-0,50	-1,35
Ss <sup>G</sup> .20	7,18	630,00	4,06	1,84	0,92	0,051	1,88	1,34	3,062	13,30	0,40	0,02	0,87	0,23	0,71	0,11	-0,91	-1,82
Ss <sup>G</sup> .21	7,30	1260,00	4,08	3,98	4,79	0,051	5,32	4,00	6,069	36,40	0,20	0,03	1,49	1,17	0,74	-0,51	-0,10	-0,06
Sr <sup>G</sup> .22	7,62	1262,00	4,54	3,32	5,42	0,037	5,2	4,14	4,056	25,50	0,00	0,00	0,89	1,19	0,79	0,10	0,14	0,43
Sw <sup>G</sup> .23	7,23	1275,00	4,62	3,83	3,95	0,05	5,5	3,86	4,700	24,10	0,20	0,02	0,88	0,86	0,69	0,11	-0,16	-0,23

Die Natrium-Ionen schwanken zwischen 52 und 140 mg/l, die Kalium-Ionen zwischen 1,8 und 4,9 mg/l. Der Ionenaustauschindex (Sch) nach M. SCHOELLER (1963), Tab. 2, hat bei den meisten Wasserproben positive Werte. Das ist eher ein Merkmal dieser Gesteinsgruppe, die Na<sup>+</sup> und K<sup>+</sup> in Überschuß enthält, und nicht unbedingt ein Zeichen für Ionenaustausch.

Die Cl<sup>-</sup>-Ionenwerte sind hoch und bewegen sich zwischen 80 und 224 mg/l. Das Verhältnis Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup> (Tab. 2) schwankt um den Wert 0,80, der sowohl charakteristisch für Regen- als auch für Meereswasser ist. Aufgrund dessen verstärkt sich die Annahme, daß Cl<sup>-</sup>-Ionen aus dem Meer angereichert werden und zwar nicht über den sonst üblichen küstennahen Versalzungsmechanismus (überpumpen), sondern durch Salz aus windtransportierten Meereswassertropfen.

Die SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Ionenkonzentrationen sind hoch (25–250 mg/l). Dies ist nicht ungewöhnlich für Wasser aus granitischen Aquiferen:

Der überall anwesende Pyrit (G. MARINOS, 1951) oxidiert und führt laut den Gleichungen von H. SCHOELLER & M. SCHOELLER (1985) zur Erhöhung des Sulfationenanteils:



Aus dem erweiterten DUROV-Diagramm (J. W. LLOYD, 1965) in Fig. 5 lassen sich drei Gruppen von Wässern ableiten:

- Magnesium-Hydrogenkarbonat-Wässer (Proben Nr. 4, 12, 19, 21, 22, 23),
- Magnesium-Chlorid-Wässer (Proben Nr. 7, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 17),
- Natrium-Chlorid-Wässer (Proben Nr. 1, 2, 3, 5, 9, 16, 20).

Aus diesem Diagramm ergibt sich, daß das Wasser des granodioritischen Aquifers durch seine hohe Mg<sup>2+</sup>-Konzentration charakterisiert wird (Gruppe a und b).

Der NaCl-Gehalt des Meereswassers begünstigt wiederum die Verwitterung des Biotits. D. BÄTJER & H. KUNZE (1963, zitiert in: G. MATTHESS, 1990), korrelieren die

erhöhten Na<sup>+</sup>- und Mg<sup>2+</sup>-Konzentrationen in Regenwässern NW-Deutschlands mit der Stärke der NW-Winde.

Der hohe Gehalt des Meereswassers an leichtlöslichen Magnesiumsalzen ist wohl bekannt (U. HOFMANN & W. RÜDORFF, 1973).

Die Beschaffenheit der Granodioritwässer von Serifos entspricht nicht dem allgemein erwarteten Bild eines granitischen Aquifers; es ist ja bekannt, daß diese Wässer normalerweise arm an gelösten Stoffen sind, mit Werten, die 100–200 mg/l nicht übersteigen (M. HADZISEHOVIC et al., 1995, H. SCHOELLER, 1962). Die Konzentrationen der meisten Ionen sind erwartungsgemäß niedrig. Die Wässer des granodioritischen Aquifers sind an Kalzit und Dolomit untersättigt, was aus den negativen SI<sub>c</sub> und SI<sub>d</sub>-Werten ersichtlich ist (Tab. 2). Dies ist auf die Abwesenheit der oben genannten Mineralien zurückzuführen.

### 5.3. Statistische Bearbeitung der hydrochemischen Daten (Faktorenanalyse)

Um die Interpretation der Ergebnisse der chemischen Analysen zu verstärken, wird die R-mode Faktorenanalyse angewendet, obwohl aufgrund der Anzahl der Wasserproben die Aussagekraft fast im Grenzbereich liegt. Diese Methode ermöglicht den Vergleich der Beziehungen zwischen den Probenvariablen, in unserem Fall zwischen den hydrochemischen Parametern.

#### 5.3.1. R-Mode Faktorenanalyse

a) **Standardisierung der Daten:** Zunächst wurden die Daten der chemischen Analysen (Tab. 2) nach der Formel

$$Z_i = \frac{x_i - x_m}{\sigma}$$

standardisiert; dabei ist:

Z<sub>i</sub> der i-ste Wert der normalisierten Variablen (Durchschnittswert = 0, Standardabweichung = 1),

x<sub>i</sub> Wert der Variablen x,

x<sub>m</sub> der Durchschnittswert der Variablen,

σ die Standardabweichung.

Der Prozeß der Normalisierung versucht die arithmetischen Unterschiede unter den Variablen auszugleichen. Der Prozeß vermindert den Einfluß der nicht kompatiblen Einheiten, da die Variablen zu reinen (dimensionslosen) Zahlen umgewandelt werden.

b) **Berechnung der Schwankungs- und der Mitschwankungskoeffizienten der Variablen:** Dies wurde mit Hilfe der Beziehung

$$\frac{\sum_i (x_i - x_m)(y_i - y_m)}{\left\{ \left[ \sum_i (x_i - x_m)^2 \right] \left[ \sum_i (y_i - y_m)^2 \right] \right\}^{1/2}}$$

durchgeführt. Dabei sind:

x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub> der i-ste Wert der normalisierten Variablen x und y,

x<sub>m</sub>, y<sub>m</sub> die entsprechenden Durchschnittswerte.

Die Korrelationskoeffizienten erscheinen in Form einer Korrelationskoeffizientenmatrix.

c) **Berechnung der Eigenwerte und der Eigenvektoren:** Die Lösungen der oben genannten Matrix führen zur Berechnung der Eigenwerte und der entsprechenden Eigenvektoren.

d) **Transformation der Daten zu Faktoren.**

e) **Wahl der Anzahl der Faktoren.**

Leider gibt es keine allgemein gültigen Kriterien zur Wahl der Anzahl der Faktoren, die das zu untersuchende Phänomen (in unserem Fall die hydrochemischen Beziehungen) am besten beschreiben. Darüber gibt es verschiedene Gesichtspunkte zur optimalen Wahl der Faktorenanzahl – so z. B. „amount of the cumulative variance“, Eigenwerte > 1, „screen-plot“ Kriterium usw. (J. C. DAVIS, 1987, R. REYMENT & K. G. JORESKOG, 1993).

Die zuverlässigste Lösung zu diesem Problem wäre die Berücksichtigung derjenigen Faktoren, die die jeweilige hydrogeologische Fragestellung am besten unterstützen. Daher wurden endgültig fünf Faktoren ausgewählt, die mehr als 91 % der Gesamtvarianz ausdrücken (Tab. 3).

Aus dieser Tabelle erkennt man, daß alle Variablen hohe Werte von Faktorenschwankungen (communality) aufweisen (0,83–0,97). Dies bedeutet wiederum, daß die Beschreibung des hydrochemischen Modells durch dieses Fünf-Faktoren-Modell sehr gut ist.

Tab. 3: Gemeinsame Faktorenvaryanzen und Faktorenladungen nach Achsenrotation.  
Common factor variables and factor loads after axis-rotation.

Variablen	Gemeinsame Faktorenvaryanzen	Faktorenladungen [%]				
		I (40,10)	II (20,3)	III (15,7)	IV (9,51)	V (6,28)
pH	96,96	0,224	-0,005	0,958	-0,031	-0,015
E.C. [ $\mu$ S/cm]	93,82	0,890	0,323	-0,042	-0,063	0,189
Cl <sup>-</sup> [mg/l]	94,35	0,086	0,883	-0,079	-0,032	-0,385
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/l]	88,07	0,897	0,183	-0,049	-0,201	-0,001
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [mg/l]	90,99	0,917	-0,074	0,072	0,188	0,153
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/l]	96,67	0,263	-0,212	0,048	-0,176	0,905
Ca <sup>2+</sup> [mg/l]	91,46	0,920	-0,039	0,058	-0,235	0,085
Mg <sup>2+</sup> [mg/l]	91,44	0,926	0,179	-0,091	0,130	0,018
Na <sup>+</sup> [mg/l]	85,79	0,294	0,843	-0,085	0,227	0,044
K <sup>+</sup> [mg/l]	83,67	-0,347	0,398	0,117	0,734	0,076
SiO <sub>2</sub> [mg/l]	94,39	0,116	-0,025	0,014	0,939	-0,217
CO <sub>2</sub> [mg/l]	95,95	-0,273	-0,137	0,919	0,128	0,078

f) **Rotation der Faktorenachsen:** Dies ermöglicht die Bildung einer „einfachen Struktur“. Das bedeutet, daß die Korrelationskoeffizienten zwischen Variablen und Faktoren („Ladungen“ in der einschlägigen Literatur) jeweils um + 1 oder nahe sind. In dieser Arbeit wurde das Kriterium der größten Schwankung nach KAISER (varimax) benutzt (H. F. KAISER, 1958).

### 5.3.2. Ergebnisse und Interpretation

Der **Faktor I** beinhaltet 40,1 % der Gesamtvarianz der Daten und zeigt starke positive Ladungen für  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ; dies bedeutet, daß außer der für „rezente Wässer“ erwarteten  $\text{HCO}_3^-$ - und  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen, die Anteile der  $\text{Mg}^{2+}$ -Ionen (bereits aus dem erweiterten DUROV-Diagramm ersichtlich) und der  $\text{SO}_4^{2-}$ -Ionen (aus der Pyrit-Oxidation) recht hoch sind.

Der **Faktor II** beinhaltet 20,3 % der totalen Varianz: Die hohen Ladungen, die für  $\text{Na}^+$ - und  $\text{Cl}^-$ -Ionen gleichermaßen berechnet wurden, sind auf die Wirkung von windverfrachteten Meereswassertropfen zurückzuführen.

Der **Faktor III** (15,7 % der totalen Varianz) drückt den selbstverständlichen Zusammenhang zwischen pH und  $\text{CO}_2$  aus.

Der **Faktor IV** (9,51 % der totalen Varianz) hat hohe positive Ladungen für Kalium und  $\text{SiO}_2$ ; mit anderen Worten reagiert das bei der Granitverwitterung entstandene  $\text{SiO}_2$  mit  $\text{Al}^+$  unter gleichzeitiger Bildung von Tonmineralien. Man denke an den Prozeß der Adularbildung (ein Tonmineral, zusammengesetzt aus  $\text{K}^+$ ,  $\text{Al}^+$  und  $\text{Si}^{4+}$ ) nach den Formeln von G. MICHARD (1980):



Der **Faktor V** (6,28 % der totalen Varianz) hat hohe Ladungen für die  $\text{NO}_3^-$ -Ionen. Dies dürfte mit anthropogen bedingten Einflüssen zusammenhängen (z. B. Abwasser-verseuchung, Düngemittel, wenn auch in relativ geringem Maße).

## 6. Schlußfolgerungen

Aus der Untersuchung der Granodioritwässer von Serifos ergibt sich folgendes:

- Der granodioritische Aquifer von Serifos hat zwar eine niedrige Ergiebigkeit, ist jedoch sehr wichtig für die Wasserversorgung der Insel. Die hydraulischen Parameter sind:  $T = 1,2-2\text{m}^2/\text{T}ag$ ,  $S = 0,48\%$ .
- Die Beschaffenheit der Wässer differenziert sich, verglichen zu den typischen Wässern granitischen Ursprungs, insofern, daß windtransportierte Meereswassertropfen aus den Küsten hohe  $\text{Na}^+$ - und  $\text{Cl}^-$ -Werte verursachen.
- Hohe  $\text{Mg}^{2+}$ - und  $\text{SO}_4^{2-}$ -Gehalte erklären sich durch die Verwitterung von Biotit und Erzmineralien (Pyrit).
- Die Wässer sind an Kalzit und Dolomit untersättigt.
- Eine Tonmineralienbildung ist im Gange, was höchstwahrscheinlich mit der Granodioritverwitterung zu tun hat.

## Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der hydrogeologischen und hydrochemischen Merkmale des granodioritischen Aquifers der Insel Serifos sowie des alluvialen Aquifers, der in direktem hydraulischen Zusammenhang mit dem Granodiorit steht und aus klastischen Sedimenten granodioritischen Ursprungs besteht.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung können wir als repräsentativ betrachten, zumal sich in ähnlichen Gesteinstypen auf anderen Inseln der Ägäis vergleichbare Aquifere entwickeln, deren Beitrag zur Lösung von Trinkwasserproblemen unentbehrlich ist. Aus der Bearbeitung der hydrogeologischen Daten werden die Transmissivitätswerte (T) und das Speichervermögen (S) berechnet: T = 15–22 m<sup>2</sup>/Tag (alluvialer Aquifer) und T = 1,2–2 m<sup>2</sup>/Tag (Granodiorit), S = 0,48 % (Granodiorit). Aufgrund ihrer Beschaffenheit werden sie zu den Gruppen der Mg(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>- und NaCl-Wässer zusammengefaßt. Die beobachteten hohen Mg<sup>2+</sup>-Werte sind auf die Biotitverwitterung, die hohen Cl<sup>-</sup>-Werte auf die Windverfrachtung von Meereswassertropfen aus dem Bereich von Brandungsküsten zurückzuführen.

## Literatur

- DAVIS, J. C. (1987): Statistics and data analysis in Geology.– 2nd edition, 656 S., N.Y. (John Wiley and Sons).
- BÄTJER, D. & H. KUNZE (1963): Untersuchungen des Niederschlagwassers im Küstengebiet Ostfrieslands und Oldenburgs.– Küste, 11, 34–51, Heide i. Holstein.
- EVANGELIDIS, T. (1909): The island of Serifos and the surrounding islets. A topographical – historical investigation.– Ermoupolis, 149 S., Athens (in Greek).
- GLEZOS, M. (1994): An Integrated Environmental Management in Naxos.– Program MEDSPA, 91-1, Final report (in Greek).
- HADZISEHOVIC, M., A. DANGIC, N. MILJEVIC, V. SIPKA & D. GOLOBOCANIN (1995): Geothermal water characteristics in the Surdulica aquifer.– Groundwater, 33 (1), 112–123, Worthington, Ohio.
- HOFMANN, U. & W. RÜDORFF (1973): Anorganische Chemie.– 862 S., Stuttgart (Braunschweig).
- KAISER, H. F. (1958): The varimax criteria for analytical rotation in factor analysis.– Psychometrika, 23, 187–200.
- KARRENBERG, H. (1981): Hydrogeologie der nichtverkarstungsfähigen Festgesteine.– 284 S., Wien (Springer-Verlag).
- KTENAS, K. (1913): A Metallogeny Research in SE Aegeis.– Scientific Yearbook, University of Athens, Athens (in Greek).
- LLOYD, J. W. (1965): The Hydrochemistry of the aquifers of North-Eastern Jordan.– Journal of Hydrology, 3, 319–330, Amsterdam.
- MARINOS, G. (1951): Geology and Metallogeny of Serifos Island.– Geol. and Geophysical Research, Subsurface Research Service, Min. of Coordination, 95–127, Athens (in Greek, with engl. summary).
- MATTHES, G. (1990): Die Beschaffenheit des Grundwassers.– 2. Aufl., 498 S., Berlin/Stuttgart (Borntraeger).
- MICHARD, G. (1980): Contrôle des concentrations d'éléments dissous dans les eaux thermales et géothermales.– Journal Français d'Hydrologie, 11, fasc. 1 (31), 7–16, Paris.
- MOUNTRAKIS, D. (1985): Geology of Greece.– 207 S., Thessaloniki (University Studio Press, in Greek).
- RAMDOHR, P. & H. STRUNZ (1967): Lehrbuch der Mineralogie.– 820 S., Stuttgart (Enke-Verlag).
- REYMENT, R. & K. G. JORESOG (1993): Applied factor analysis in the Natural Sciences.– 371 S., London (Cambridge University Press).
- SCHOELLER, H. (1962): Les eaux souterraines.– 642 S., Paris (Masson).
- SCHOELLER, M. (1963): Recherches sur l'acquisition de la composition chimique des eaux.– 231 S., Bordeaux (E. Drouillard).
- SCHOELLER, H. & M. SCHOELLER (1985): Study of the chemical composition of a thermal water in its circuit, in crystalline terrain, in the Pyreneans mountains, France.– Geothermics Thermal-Mineral waters and Hydrogeology, 71–96, Athens (Theophrastus Publication).
- SOULIOS, G. (1979): General Hydrogeology.– 332 S., Thessaloniki (University Studio Press, in Greek).
- ZACHOS, K. (1951): Geomagnetical Research in Serifos island.– Geol. and Geophysical Researches, Subsurface Research Service, Min. of Coordination, 125–152, Athens (in Greek, with engl. summary).

## Summary

The purpose of this study is the investigation of the hydrogeological and hydrochemical properties of the granodioritic aquifer of Serifos Island (South Aegean Sea, Greece), as well as of the alluvial aquifer composed of clastics of granodioritic origin. Both aquifer systems are hydraulically connected.

The results of this investigation could be regarded as representative, since similar aquifers are also encountered in other Aegean islands. Such aquifers are invaluable water resources for the South Aegean islands.

Transmissivity values vary between 15–22 m<sup>2</sup>/day (alluvial aquifer) and 1.2–2 m<sup>2</sup>/day (granodiorite), while the storage coefficient of granodiorite aquifer is about 0.48 %. Based on the hydrochemistry of the water-samples, three main groups may be identified: Mg(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> waters, MgCl<sub>2</sub> waters and NaCl waters. High Mg<sup>2+</sup> values may be explained by biotite-weathering and high Cl<sup>-</sup> values by airborne seawater droplets carried by storms to the mountains.