

**Zeitschrift:** Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 66 (1974)  
**Heft:** 7

**Artikel:** Karsthydrologische Untersuchungen zur Beckendichtigkeit des Kardammakis Reservoirs in Mazedonien, Griechenland  
**Autor:** Haeferli, Charles / Schweizer, Jost  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-921256>

### **Nutzungsbedingungen**

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

### **Conditions d'utilisation**

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

### **Terms of use**

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

**Download PDF:** 04.02.2026

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

#### 4. ELEKTRIZITÄT

	Gesamte Schweiz in GWh			Veränderung gegenüber dem Vorjahr ‰
	Winter	Sommer	Hydrographisches Jahr	
<b>1. Energiebeschaffung</b>				
Wasserkraftwerke	11 453	16 334	27 787	+ 9,5
wovon:				
(Erzeugung im Winterhalbjahr aus Speicherwasser)	(5 340)			
Konventionell-thermische Kraftwerke	1 691	787	2 478	+ 5,7
Kernkraftwerke	3 740	2 533	6 273	+74,7
Landeseigene Erzeugung	16 884	19 654	36 538	+16,7
Einfuhr	5 305	1 873	7 178	—10,4
Erzeugung und Einfuhr	22 189	21 527	43 716	+11,2
<b>2. Energieverwendung</b>				
Haushalt, Gewerbe und Landwirtschaft	8 186	7 036	15 222	+ 7,6
Industrie	5 634	5 433	11 067	+ 4,4
wovon:				
(Allgemeine Industrie)	(3 457)	(3 175)	(6 632)	(+ 5,8)
(Elektrochemische, elektrometallurgische und elektrothermische Anwendungen)	(2 177)	(2 258)	(4 435)	(+ 2,3)
Bahnen	1 051	969	2 020	+ 0,7
Uebertragungsverluste	1 648	1 485	3 133	+ 5,2
Landesverbrauch ohne Elektrokessel und Speicherpumpen	16 519	14 923	31 442	+ 5,8
Elektrokessel	11	51	62	+ 3,3
Speicherpumpen	610	1 184	1 794	+16,6
Gesamter Landesverbrauch	17 140	16 158	33 298	+ 6,3
Ausfuhr	5 049	5 369	10 418	+30,5
Landesverbrauch und Ausfuhr	22 189	21 527	43 716	+11,2

## KARSTHYDROLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR BECKENDICHTIGKEIT DES KARDAMAKIS RESERVOIRS IN MAZEDONIEN, GRIECHENLAND

DK. 556.55 (495)

Charles Haefeli und Jost Schweizer

### 1. Einleitung

Der Bau des hydraulischen Kraftwerks B. Kardamakis in Mazedonien/Nord-Griechenland, geht zur Zeit seiner Vollendung entgegen. Im Tal des Aliakmon, südlich von Kozani, wird ein 105 m hoher Damm erstellt, der bei höchstem Stauziel auf Kote 291 m ü. M. einen See mit einer Oberfläche von 71 km<sup>2</sup> aufstauen wird (Bild 1). Die Public Power Corporation, Athen, betraute die Elektro-Watt, Ingenieurunternehmung, mit der Projektausarbeitung, der Bauleitung und den Nebenuntersuchungen für das 360-MW-Kraftwerk.

Da das Reservoir auf seiner linken Seite über eine grössere Strecke an ein verkarstetes Kalkgebirge anschliesst, waren zur Abklärung der Beckendichtigkeit ausgedehnte, sich über mehrere Jahre erstreckende hydrogeologische Untersuchungen notwendig. Besonderes Interesse erweckten dabei die Karstquellen bei Neraidha (Bild 3), die sich auf einer Kote von etwa 250 m ü.M. mit über 10 m<sup>3</sup>/s in das zukünftige Reservoir ergiessen, das heisst etwa 40 m unter dem geplanten Stauziel von 291 m ü.M.

Damm und Becken des Kardamakis-Projektes liegen zwischen dem Dhovras- und Skopos-Gebirge des Pelagonischen Massivs, welches in dieser Gegend meist aus flach gelagerten, metamorphen Gesteinen besteht. Das zukünftige Reservoirgebiet ist jedoch grösstenteils durch Ablagerungen des Aliakmon oder durch Gehängeschutt bedeckt, welche die Ausdehnung des verkarsteten Gebirges

weitgehend verhüllen. Anschliessend an die Skopos-Berge — im Norden durch die Sari-Giol-Depression getrennt — baut sich das Vermiongebirge auf, welches den östlichen Teil des Pelagonischen Massivs repräsentiert. Gegen die Ebene von Thessaloniki folgt darauf die aufgeschobene, steil stehende, stark gefaltete Vardar-Zone (Bild 2).

Nur auf der linken Seite, wo die verkarsteten Karbonatgesteine ins Reservoir hineinreichen, wurde die Dichtigkeit des Beckens namentlich bei hohem Wasserstand in Frage gestellt. Die hydrogeologischen Untersuchungen hatten daher zum Ziel, mittels voneinander unabhängigen Methoden, folgende Hauptprobleme zu beantworten:

- Grössenordnung des möglichen Wasserverlustes;
- Definierung von potentiellen Versickerungswegen durch das Vermiongebirge und die Vardarzone in die Ebene von Thessaloniki;
- Ermittlung der Lage und Höhe von Grundwasserscheiden;
- Abschätzung der Einzugsgebiete der Quellen von Neraidha.

### 2. Allgemeine Geologie

Das Untersuchungsgebiet umfasst zwei verschiedene tektonische Einheiten: das Pelagonische Massiv im Westen und die Vardar-Zone im Osten.

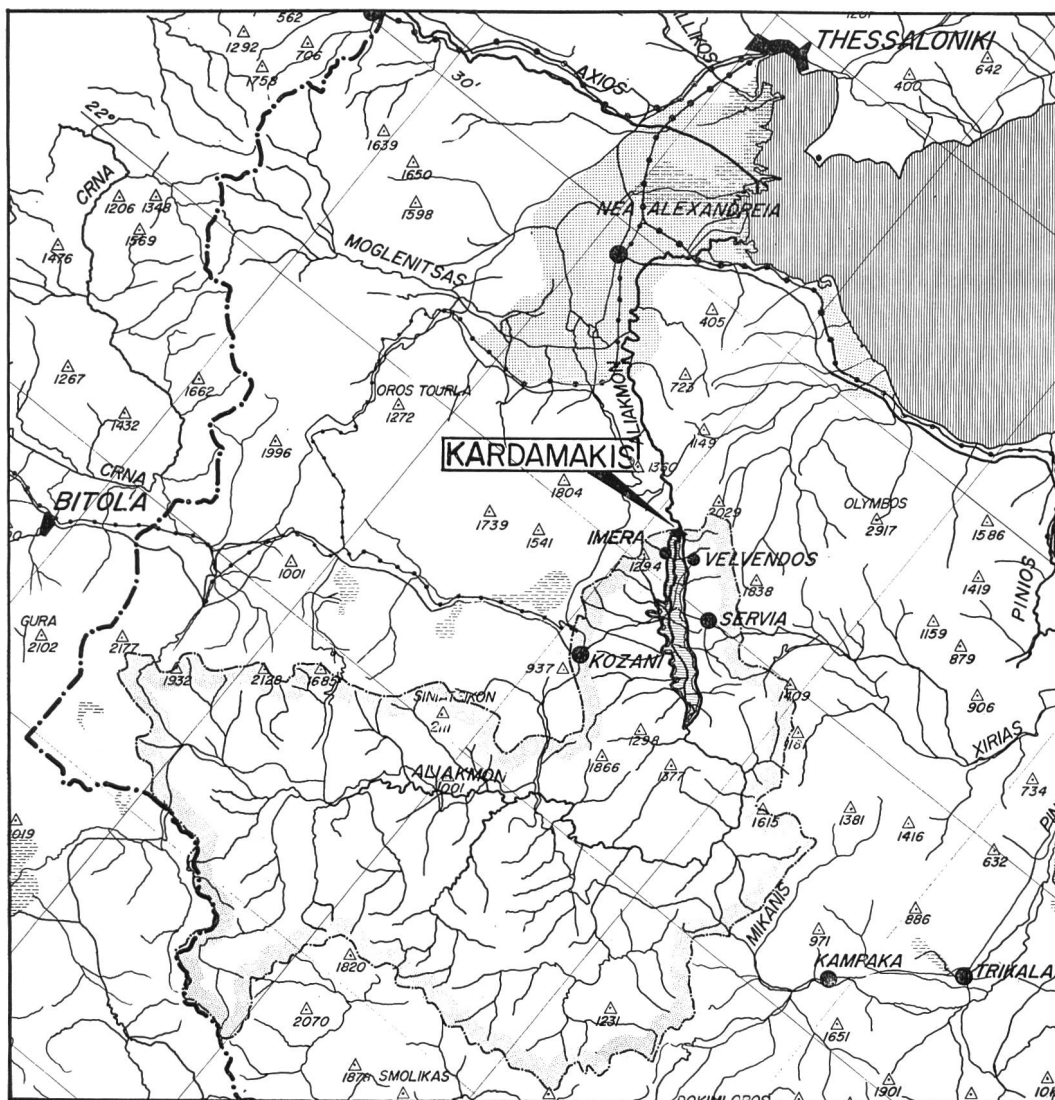


Bild 1 Lageplan

Die Gesteine des Pelagonischen Massivs setzen sich aus Sedimenten zusammen, deren Alter sich vom Jungpaläozoikum bis in den oberen Jura erstreckt. Eine Regionalmetamorphose verwandelte während der oberen Jura- und Kreidezeit die Sedimente in metamorphe Gesteine, welche — von unten nach oben — hauptsächlich aus Gneisen, Glimmerschiefern und Marmoren bestehen. Gleichzeitig mit der Orogenese setzte auch die Erosion ein. Die ältesten Verkarstungen des Marmors stammen aus dieser Zeit. Das Pelagonische Massiv umfasst die Dhovras-, Skopos- und Askionberge sowie den Hauptteil des Vermiongebirges; dazu gehören auch noch verschiedene pleistocäne Becken, wie zum Beispiel das Sari Giol, welche mit Erosionsprodukten aus den benachbarten Gebieten aufgefüllt worden sind.

Während der Orogenese füllten Verwitterungsprodukte das ursprüngliche Becken der Vardarzone. Dieser Prozess wurde von ultrabasischen Effusionen begleitet. In der älteren Tertiärzeit wurde die Vardar-Geosynklinale gegen Westen auf das Pelagonische Massiv an- und aufgeschoben. Dabei wurden die Gesteine — eine heterogene Serie von Ophioliten, Schiefern, plattigen und massiven Kalken und Konglomeraten — intensiv verfaltet.

### 3. Allgemeine Hydrologie

Dem Untersuchungsgebiet gehören drei grosse Einzugsgebiete an: Aliakmon, Sari Giol und Ost-Vermion. Allerdings kann nur der Aliakmon als echtes Entwässerungsgebiet bezeichnet werden. Das Sari Giol ist ein geschlossenes Becken ohne Oberflächenabfluss in angrenzende Gebiete, und der Ost-Vermion gehört zu einem Einzugsgebiet, welches den westlichen Teil der Thessaloniki-Ebene umfasst, deren Grenzen eher schlecht definiert sind (Bild 3).

Der jährliche Niederschlag variiert je nach Höhe zwischen 600 und 1200 mm. Annähernd zwei Drittel des Niederschlages tritt im Winterhalbjahr (Oktober bis März) auf. Das Oberflächenabflussdefizit (Niederschlag — Oberflächenabfluss = Defizit) beträgt für das Aliakmongebiet etwa 60 % und für Sari Giol bis 100 %. Für den Ost-Vermion kann kein entsprechender Betrag angegeben werden. Infolge tiefgreifenden Karstes ist hier praktisch kein Oberflächenabfluss vorhanden.

Da grosse Gebiete aus verkarstetem Marmor und Kalk bestehen, ist die Versickerungsrate sehr hoch, und das Grundwasser spielt in der hydrologischen Bilanz eine bedeutende Rolle. Allerdings ist das Grundwasser infolge des tiefgreifenden Karstes nicht an die morphologischen Grenzen gebunden.

zen zwischen den einzelnen Einzugsgebieten gebunden, was die Ermittlung von Wasserbilanzen ausserordentlich erschwert. Grosse Karstquellen, die 1 m<sup>3</sup>/s Wasser und mehr liefern, treten besonders im Ost-Vermion und im Aliakmon-Flussbett in der Gegend von Neraidha auf.

#### 4. Hydrogeologie der Vardarzone

Um festzustellen, ob die Vardarzone eine strukturelle Grundwasserbarriere darstellt, wurde in der Gegend von Veria eine detaillierte geologische Feldkartierung ausgeführt.

Die Vardarzone zeigt eine grosse Anzahl von Brüchen, die auf eine starke tektonische Beanspruchung hindeuten. Entlang dieser Brüche sind ophiolithische Gesteine in den darüberliegenden Kalk eingedrungen, der weitgehend marmorisiert wurde. Infolge der nachfolgenden Erosion erscheinen heute die Ophiolithe an der Oberfläche, insbesondere entlang tief eingeschnittener Täler. Die ophiolithischen Gesteine bestehen aus Serpentin, Grün- und Talkschiefer, die gelegentlich auch Chrysotilasbest aufweisen.

Die Austrittstellen der zahlreichen kleineren und grösseren Quellen lassen sich meist mit den Kalk/Ophiolith-Kontaktstellen in Beziehung bringen. Die Ophiolithe der

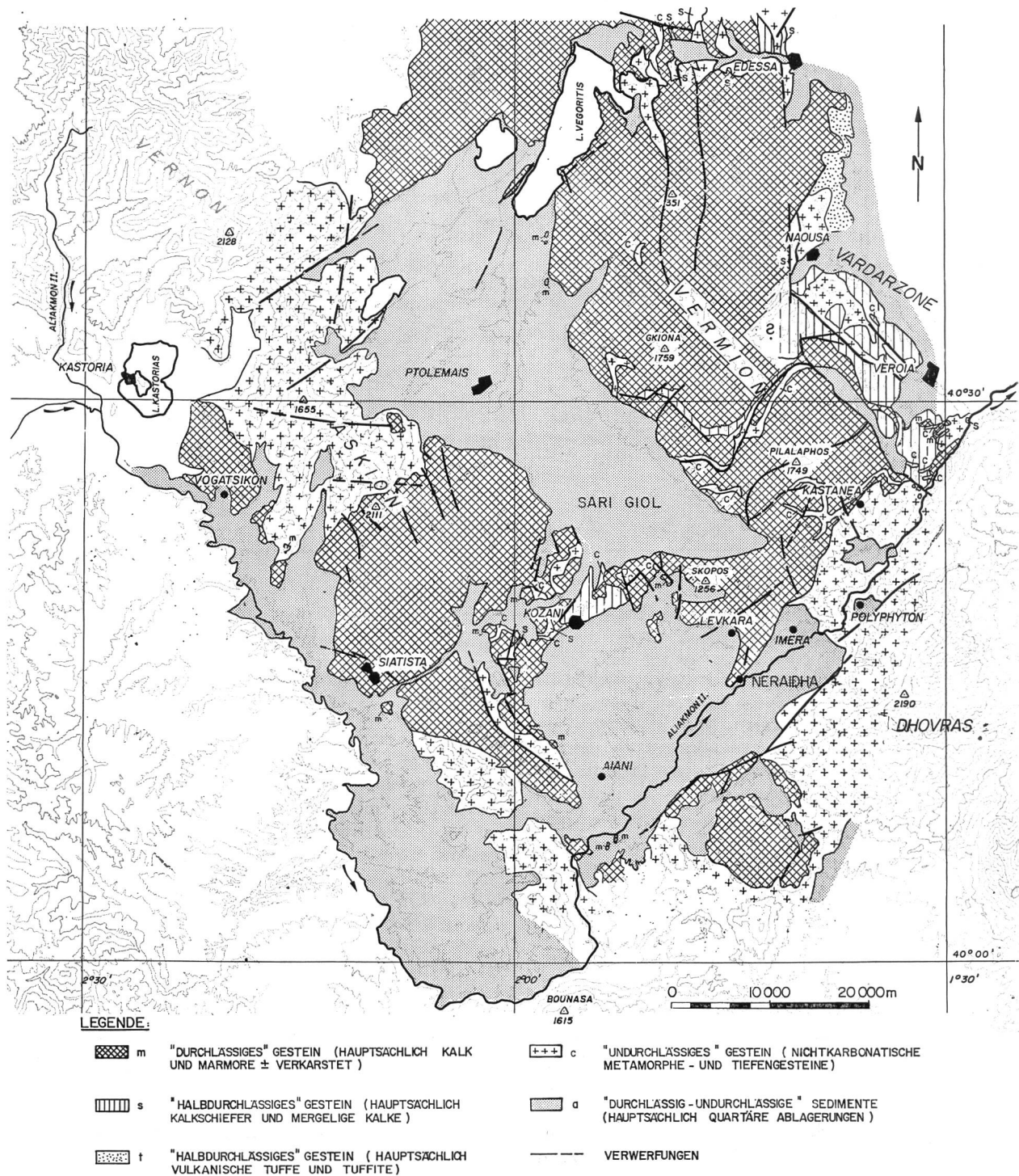


Bild 2 Hydrologische Uebersicht

#### LEGENDE:

- QUELLE MIT  $Q \geq 0.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ , MIT TERRAINKOTE UND ORDNUNGSNUMMER
- PROBEENTNAHMESTELLE FÜR ISOTOPEN-UND CHEM. ANALYSEN
- GX 5  
255 GETESTETE PIEZOMETER MIT KOTE DES REPRESENTATIVEN GRUNDWASSERSPIEGELS UND ORDNUNGSNUMMER
- 776 VERSCHIEDENE PIEZOMETER MIT KOTE DES APPROXIMATIVEN GRUNDWASSERSPIEGELS
- HAUPTSTRÖMUNGSRICHTUNG DES GRUNDWASSERS
- APPROXIMATIVE GRUNDWASSERSCHIED
- APPROXIMATIVE, TEKTONISCH BEDINGTE GRUNDWASSERBARRIERE OBERHALB KÖTE 300 m Ü.M.
- GEBIETE OHNE OBERFLÄCHENABFLUSS

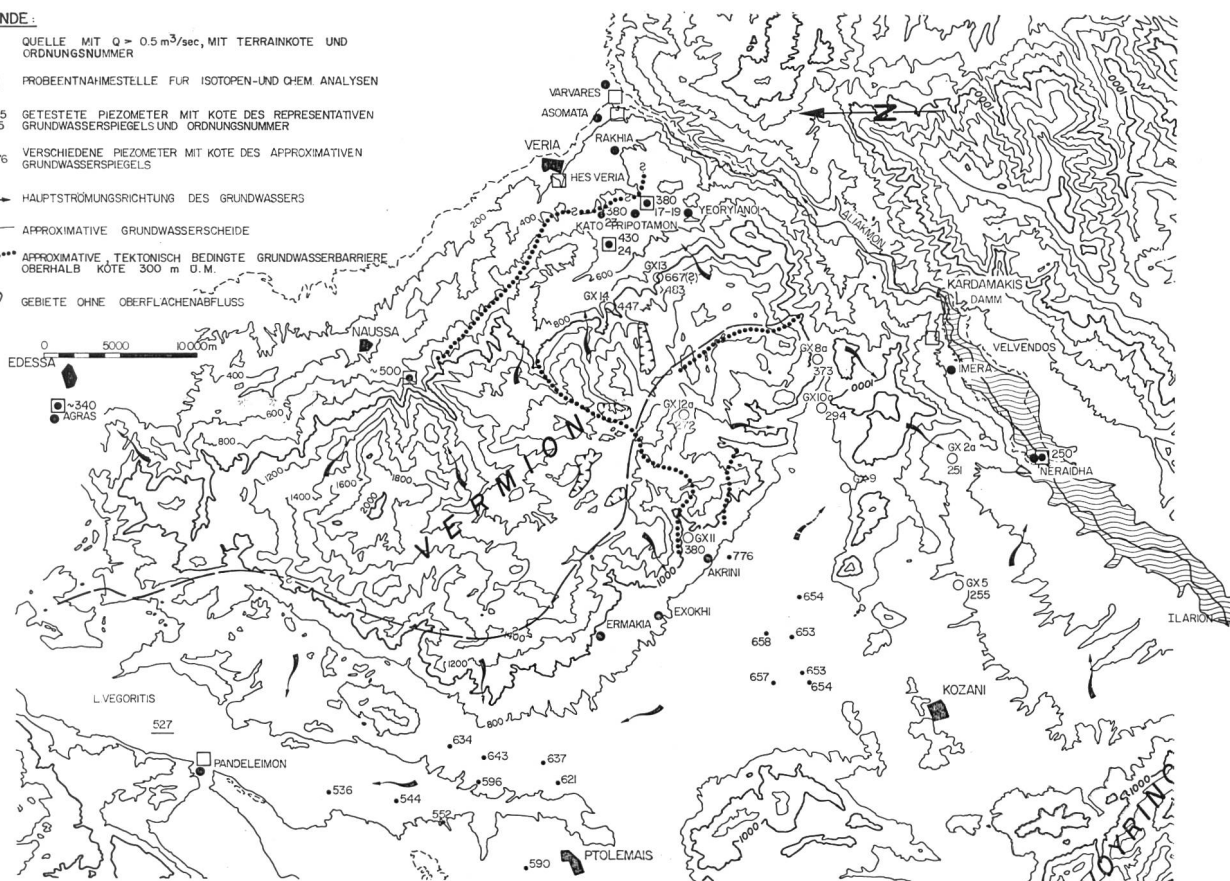


Bild 3 Grundwasserströmungsverhältnisse im Vermion

Vardarzone bilden eine hauptsächlich NW-SE orientierte Grundwasserbarriere. Nach den geologischen Feldaufnahmen erstreckt sich diese Schranke oberhalb der Kote von 300 m (maximaler Stauspiegel des Kardamakis-See: 291 m) lückenlos von der Gegend um Naussa bis SW von Veria. Von hier bis nach Rakhia tritt eine Lücke von ca. 5 km Breite auf. Anschliessend setzt sich die Ophiolithbarriere wieder weiter gegen den Aliakmonfluss fort.

Allfällige Versickerungswege durch die Vardarzone können demnach nur in der erwähnten Lücke auftreten. Allerdings befinden sich gerade in dieser Gegend die grossen Quellengruppen von Tripotamon (numeriert mit 24 auf Bild 3) und Yeoryiano (Nr. 17—19) auf über 350 m Höhe, die zusammen  $> 2 \text{ m}^3/\text{s}$  Wasser liefern. An diesen Stellen wird das durch verkarsteten Kalk fliessende Grundwasser zum Austritt an die Oberfläche gezwungen. Daher scheint auch hier eine tektonisch bedingte Schranke zu existieren, wenn auch unter der Ueberdeckung von Quelltuff und andern quartären Ablagerungen verborgen. Die mächtigen Tuffablagerungen, welche oberhalb der Kote 300 auftreten, weisen im weiteren darauf hin, dass die wichtigsten Quellaustritte schon während der Quartärzeit bestanden haben. Da sich die Quelltuffe nur unterhalb der Quellaustritte bilden konnten, mussten die Hauptquellen zwischen 300 bis 400 m ü. M. gelegen haben.

#### 5. Grundwasserscheide im Vermion

Um die Grundwasserverhältnisse in den Vermion-Bergen zu verifizieren, wurden während einer vorangehenden Studie zwischen 1968 und 1969 acht Bohrungen in Tiefen von 250 bis 1100 m niedergebracht und mit Piezometern ver-

sehen: GX 2a, GX 5, GX 8a, GX 9, GX 10a, GX 11, GX 12a, und GX 13. Im Herbst 1972 wurde eine weitere Bohrung GX 14 bis zu einer Tiefe von 602 m abgeteuft, um im südlichen Vermion eine Informationslücke zu schliessen.

Auf Grund der Mehrfachfilter der Piezometer und verschiedener Funktionsversuche kann angenommen werden, dass der Grundwasserspiegel in den Piezometern den Wasserspiegel des gesättigten Karstgrundwasserleiters (Bild 3) wiedergibt. Es scheint, dass GX 12a, GX 10a, GX 2a, GX 9 und GX 5 in einem intensiv verkarsteten Gebiet liegen, welches demnach eine hohe Durchlässigkeit und einen niedrigen hydraulischen Gradienten aufweist. Demgegenüber herrschen in der Zone von GX 8, GX 13, GX 11 und GX 14 eher entgegengesetzte Bedingungen vor, daher hoher Grundwasserspiegel und grosser Gradient (vgl. Bild 3). Die Höhe des Grundwasserspiegels der letzt-erwähnten Zone wird zudem von benachbarten nicht-kalkigen, metamorphen Gesteinsserien beeinflusst.

Die Grundwasserspiegel in den Piezometern GX 12a, GX 13, GX 14, die Koten der Hauptquellenaustritte SW von Veria und die geologische Struktur deuten auf eine über der zukünftigen Staukote liegende Grundwasserscheide zwischen GX 12a und GX 14 hin. Ihr wahrscheinlichster Verlauf durch den südlichen Vermion wird in Bild 3 dargestellt. Der weitere Verlauf der Grundwasserscheide durch den nördlichen Vermion muss hauptsächlich aus der Tektonik abgeleitet werden und ist nicht deutlich definiert. Hydrologische Bilanzen und das Verhältnis von Umweltisotopen (Kapitel 7 und 8) bestätigen die Existenz einer Grundwasserscheide durch den Vermion und die daraus resultierenden Hauptfliessrichtungen des Grundwassers. Ihre exakte Lage kann jedoch nicht genau angegeben werden.



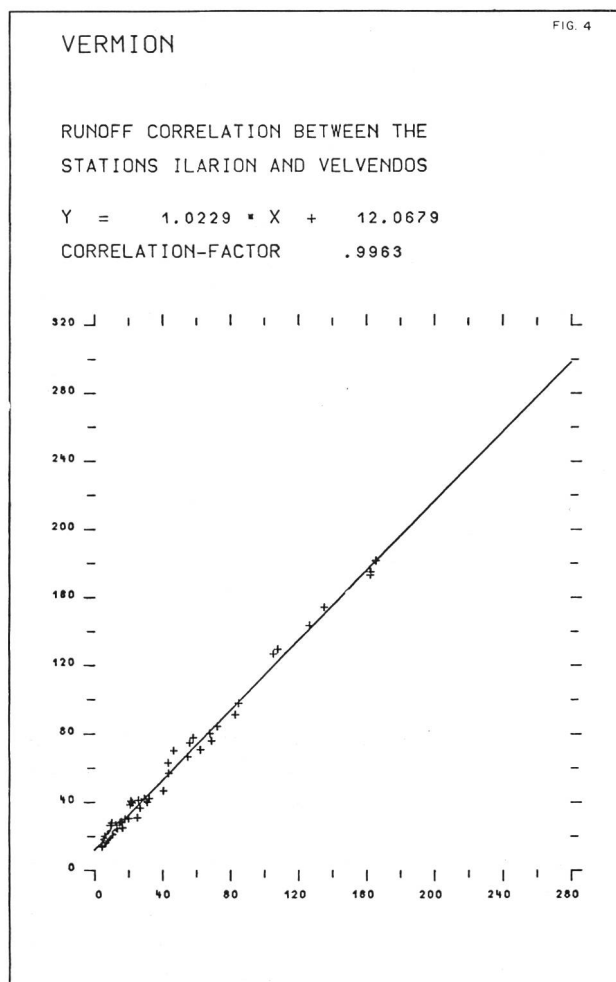


Bild 4 Korrelation zwischen den Aliakmon-Abflussmessstationen Ilarion und Velvendos.

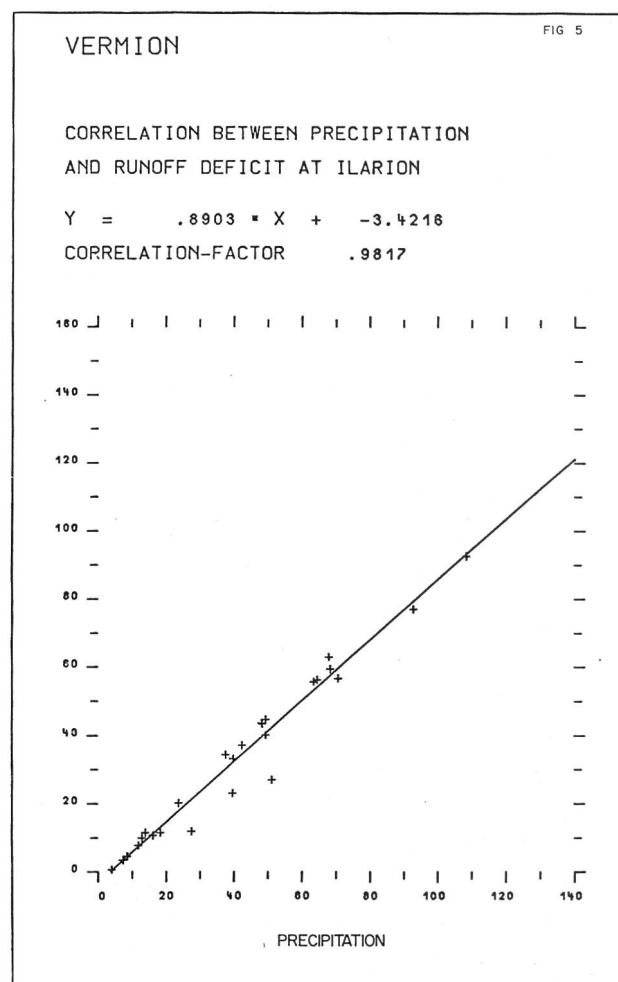


Bild 5 Korrelation zwischen Niederschlag und Abflussdefizit für das Einzugsgebiet oberhalb der Messstelle Ilarion (5000 km<sup>2</sup>).

Durch starke Grundwasserspiegel-Schwankungen sind lokale Verschiebungen möglich. GX 8a zum Beispiel zeigt saisonale Fluktuationen des Grundwasserspiegels bis zu 50 m. Im Hinblick auf das Ziel der Studie war die genaue Festlegung der Grundwasserscheide nicht relevant, es genügte vielmehr, das Vorhandensein derselben oberhalb der zukünftigen Staukote nachzuweisen.

## 6. Neraidha-Quellen

Die Austritte der zahlreichen Neraidha-Quellen liegen unmittelbar entlang dem Flussufer oder gelegentlich im Flussbett selbst, in einer Höhe von  $250 \pm 3$  m ü.M. Die Quellen durchdringen verkarstete und versinterter Kalk mit unregelmässigen Einlagerungen von Kalkkonglomeraten. Quelltuffe und Versinterungen deuten auf frühere, höher gelegene Quellaustritte, die nach und nach durch kalkige Ablagerungen abgedichtet wurden. Es scheint, dass die Quellaustritte Schritt für Schritt der Erosion des Aliakmon-Flusses folgten. Sie zeigen keine systematische Beziehung mit der Klüftung der Gesteine; in der Tat gibt die Oberflächengeologie nicht viele Hinweise auf den Verlauf von Wasserläufen im verkarsteten Kalk.

Die Quellen — durch eine grosse Anzahl Austritte in zwei Gruppen auftretend — fliessen teilweise direkt ins Flussbett des Aliakmon und verhindern so eine direkte Messung der gesamten Ausflussmenge. Die Quellschüttung wurde daher mittels Abflussmessungen im Aliakmon ober-

halb und unterhalb der Quellaustritte an den Messstellen Ilarion und Velvendos bestimmt (Bild 3). Da die Messungen durch das breite und flache Flussbett beeinträchtigt sind, schien es angebracht, bei Nieder- und Mittelwasser einen Messfehler von etwa 10 Prozent anzunehmen. Daraus folgt, dass die Quellschüttung mit ausreichender Genauigkeit nur während Niederwasser, das heisst bei einer Abflussmenge  $\leq 20$  m<sup>3</sup>/s ermittelt werden konnte. Im weiteren musste auch der Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet zwischen den beiden Messstationen in Betracht gezogen werden. Die Bestimmung der Quellschüttung war deshalb nur während trockener Perioden möglich.

Die Abflussmenge bei Velvendos,  $Q_{Vel}$ , minus die Abflussmenge bei Ilarion,  $Q_{Il}$ , dürfte der Schüttung der Neraidha-Quellen entsprechen, falls folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Beobachtungsperiode Juni bis Oktober (keine Schneeschmelze);
- Mittlere monatliche Niederschläge im Velvendos-Subbecken (Einzugsgebiet zwischen den Messstationen)  $< 20$  mm/Monat;
- Abfluss bei der Velvendos-Messstation  $< 20$  m<sup>3</sup>/s.

In der Beobachtungsperiode 1963—69 waren diese Bedingungen während acht verschiedener Monate erfüllt. Das maximale Monatsmittel betrug 12,5 m<sup>3</sup>/s, das minimale 9,8 m<sup>3</sup>/s und das mittlere 10,8 m<sup>3</sup>/s. Wenn man einen Messfehler von 10 Prozent in Betracht zieht, scheint eine

effektive mittlere Abflussmenge von  $11 \pm 1 \text{ m}^3/\text{s}$  richtig zu sein. Bei der Betrachtung der Abflussmengen nach längerer Trockenzeit fällt auf, dass keine signifikante Abnahme der Quellschüttungen zu verzeichnen ist; die Wasserführung der Quellen bleibt auch in den Sommerperioden konstant. Dies stimmt mit den Ergebnissen aus Kapitel 8 überein: Die saisonalen Schwankungen des Quellwassers verschwinden allmählich während des langen Fließweges und der beträchtlichen Aufenthaltsdauer.

Bei der Korrelation der zuverlässigen Abfluss-Monatsmittel (Abfluss ohne extreme Hochwasser) der Stationen Ilarion und Velvendos für die Jahre 1963—1968 erhält man die folgende Regressionsgleichung (Bild 5):

$$Y = 1.0229 \times X + 12,0679$$

welche wie folgt geschrieben werden kann

$$Q_{\text{Velv.}} = 1,0229 \times Q_{\text{Il.}} + 12,0679$$

Daraus ergibt sich für die Schüttung der Neraidha-Quellen  $12 \text{ m}^3/\text{s}$ , was ziemlich gut mit dem früher ermittelten Wert übereinstimmt.

## 7. Einzugsgebiete

### 7.1 ALIAKMON-BECKEN (5800 km<sup>2</sup>)

Die hydrometrischen Messungen zeigen, dass der mittlere jährliche Oberflächenabfluss,  $R_s$ , des Aliakmonbeckens oberhalb der Messstation Ilarion ungefähr 42 % der totalen Niederschlagsmenge,  $P$ , ist. 58 % gehen daher hauptsächlich durch Evapotranspiration,  $ET$ , verloren. Da sich Teile des Beckens innerhalb von tief verkarsteten Gebieten befinden, sind Grundwasserzu- und -abflüsse von und nach ausserhalb liegenden Gebieten,  $R_{g_{in}}$  und  $R_{g_{out}}$  für die Berechnung des Wassergleichgewichtes zu berücksichtigen. Die Oberflächenwasserscheide muss nicht unbedingt mit derjenigen des Grundwassers übereinstimmen, dies trifft vor allem für Karstgebiete zu. Wird die Volumenveränderung des gespeicherten Grundwassers vernachlässigt, kann die vereinfachte Gleichung für die hydrobiologische Bilanz wie folgt geschrieben werden:

$$P + R_{g_{in}} = R_s + ET + R_{g_{out}}$$

Die Beträge des zu- und abfliessenden Grundwassers sind unbekannt. Um zu ermitteln, wie stark diese die hydrologische Bilanz beeinflussen, wurde das Oberflächenabflussdefizit ( $= P - R_s$ ) mit den Niederschlagswerten für die Sommermonate (Mai—Oktober) korreliert. Für das Einzugsgebiet des Aliakmon oberhalb der Ilarion-Messstation ergibt dies eine vorzügliche Korrelation, für das Velvendos-Zwischenbecken besteht jedoch keine Beziehung (Bilder 5 und 6) zwischen den beiden Parametern. Daraus folgt, dass die Bilanz für das Ilarion-Einzugsgebiet durch Grundwasser-Zu- und -Abflüsse nicht merklich beeinträchtigt wird, im Velvendos-Zwischenbecken die Beeinflussung jedoch bedeutend ist. Bei geringen Niederschlagsmengen ergibt sich im letzteren Gebiet sogar ein Abflussüberschuss, der zudem ziemlich konstant bleibt (Bild 6). Demzufolge muss das Haupteinzugsgebiet der Neraidha-Quellen, die diesen Ueberschuss verursachen, ausserhalb des Velvendos-Zwischenbeckens liegen. Dies ging auch aus der unverhältnismässig grossen Abflussmenge pro Fläche Einzugsgebiet hervor.

Da die Schüttung der Neraidha-Quellen ziemlich konstant ist, muss unter Berücksichtigung der in Bild 5 dargestellten Ergebnisse angenommen werden, dass das Ein-

zugsgebiet der Neraidha-Quellen wahrscheinlich grösstenteils ebenfalls ausserhalb des Ilarion-Beckens liegt.

### 7.2 VERMIONGEBIRGE (1200 km<sup>2</sup>)

Ein weitmaschiges hydrologisches Beobachtungsnetz, die starke Verkarstung sowie die schlechte Zugänglichkeit erschweren das Aufstellen einer hydrologischen Bilanz für das Gebiet zwischen Sari Giol und Thessaloniki erheblich.

Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge,  $P$ , beträgt für dieses Gebiet annähernd 850 mm. Gemäss der Turc-Formel ergab die effektive Evapotranspiration,  $ET$ , folgenden Wert:

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Wobei:

$$L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$$

$T$  = mittlere Jahrestemperatur  $9^\circ\text{C}$

$$ET = 475 \text{ mm} = 56 \% \text{ von } P$$

Das Abflussdefizit für das Aliakmonbecken beträgt vergleichsweise 58 %.

Um den totalen Abfluss der Vermionegend in Grundwasserabfluss (Infiltration) und Oberflächenabfluss aufzu-

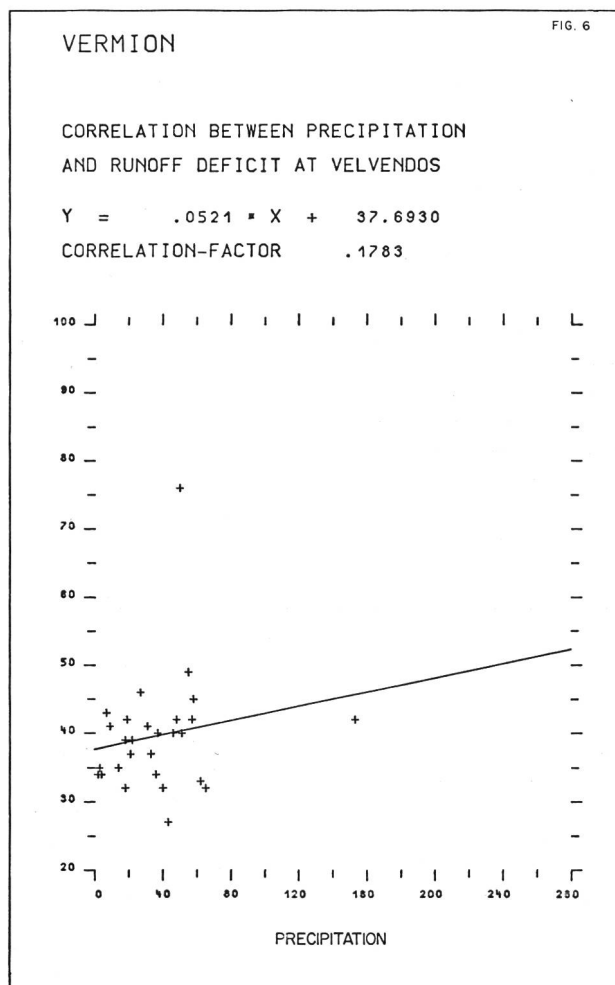


Bild 6 Korrelation zwischen Niederschlag und Abflussdefizit für das Einzugsgebiet zwischen den Messstellen Ilarion und Velvendos (800 km<sup>2</sup>).

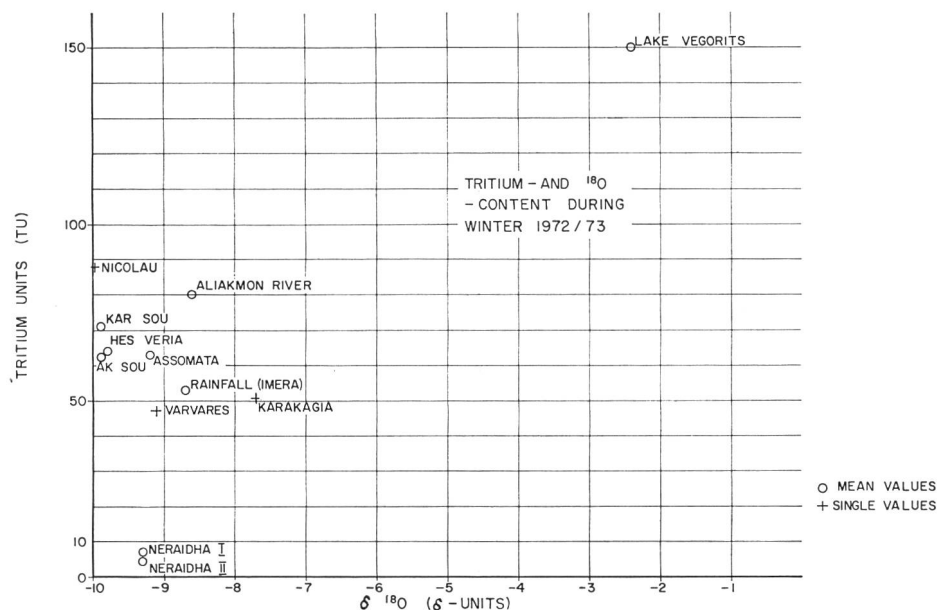


Bild 7  
Tritium- und  $^{18}\text{O}$ -Gehalt während des Winters 1972/73 im Quell-, Fluss- und Seewasser (0 Mittelwert, + Einzelwert).

teilen, kann als erste Annäherung angenommen werden, dass die Entwässerung im Karst fast ausschliesslich durch Grundwasser erfolgt, in kristallinen Nichtkarbonat-Gesteinen der Grundwasserabfluss jedoch vernachlässigbar ist. Der Oberflächengeologie entsprechend ergibt dies für das Vermiongebiet 80 bis 85 % Grundwasser- und 15 bis 20 % Oberflächenabfluss. Die ungefähre Wasserbilanz würde demnach wie folgt aussehen:

Evaporation	$50 \pm 5 \%$
Infiltration	$40 \pm 5 \%$
Oberflächenabfluss	$10 \pm 5 \%$

#### 7.2.1 Oestlicher Vermion

Aufgrund der geologischen Verhältnisse lässt sich das östlich der Grundwasserscheide liegende Gebiet des Vermion in einen nördlichen und südlichen Teil gliedern. Der südliche Teil wird durch die bei Veria liegenden Tripotamos-Quellen (Nrn. 17—19 und 24 auf Bild 3) sowie einer grossen Anzahl kleinerer Karst-Quellen entwässert. Ihre gesamte Schüttung beläuft sich auf  $3,3 \text{ m}^3/\text{s}$ . Berechnet man daraus die sich für das südliche Gebiet ergebende Infiltrationsrate (Fläche  $85 \text{ km}^2$ , mittlerer jährlicher Niederschlag  $1020 \text{ mm}$ ) so würde diese  $119 \%$  betragen. Das Einzugsgebiet muss deshalb noch einen beträchtlichen Teil des nördlichen Vermions umfassen, da sich für dieses Gebiet von  $550 \text{ km}^2$ , bei einer totalen Schüttung der Karstquellen von  $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$  (grösste Karstquelle bei Naussa und Agras, vergleiche Bild 3) und einem mittleren jährlichen Niederschlag von  $920 \text{ mm}$ , nur eine Infiltrationsrate von  $27,3 \%$  ergeben würde. Der nördliche und südliche Teil müssen deshalb durch einen etwa  $2 \text{ km}$  weiten hydraulischen Flaschenhals von verkarstem Kalk S von Naussa in Verbindung stehen (vgl. Bild 2).

Zieht man die Bilanz für den gesamten östlichen Vermion, so erhält man eine mittlere Infiltration von  $39 \%$ , was mit dem vorausgehend ermittelten Wert für das totale Vermiongebiet ziemlich gut übereinstimmt.

#### 7.2.2 Westlicher Vermion

Die westlichen Vermion-Berge (westlich der Grundwasserscheide) weisen in der Nähe von Akrini und Ermakia (Bild

3) je eine undurchlässige Einlagerung von ultrabasischen Gesteinen auf. Da ein Oberflächenabfluss im Karst fast vernachlässigbar ist und da in diesem Gebiet keine namhaften Karstquellen existieren, muss angenommen werden, dass die Gegend nördlich von Akrini durch Grundwasser entwässert wird, das in den Vegoritis-See oder in das Sari-Giol-Becken strömt. Falls rund  $40 \%$  der mittleren jährlichen Regenmenge ( $760 \text{ mm}$ ) im  $280 \text{ km}^2$  grossen Kalkgebiet infiltrieren, sollte der Grundwasserabfluss etwa  $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$  betragen.

Für das  $250 \text{ km}^2$  grosse Kalkgebiet südlich von Akrini wurde eine mittlere jährliche Niederschlagshöhe von  $920 \text{ mm}$  berechnet. Wird eine Infiltrationsrate von  $40 \%$  angenommen, ergäbe sich aus diesem Gebiet ein Grundwasserabfluss von annähernd  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ . Aufgrund der gemessenen Wasserspiegel in den Piezometern GX 2a, 5, 8a, 9, 10a und 12a, darf angenommen werden, dass dieses Grundwasser die Neraidha-Quellen speist. Mit einer Schüttung von etwa  $11 \text{ m}^3/\text{s}$  benötigen die Quellen aber weitere, grosse Einzugsgebiete. Mit einer Fläche von  $420 \text{ km}^2$ , einer mittleren jährlichen Niederschlagshöhe von  $750 \text{ mm}$  und einer angenommenen Infiltrationsrate von  $40 \%$ , kann das gesamte Karstgebiet der Askion-Voyrinos-Berge maximal  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  liefern. Weitere potentielle Einzugsgebiete können nur noch die Gebiete mit quartären und jungtertiären Ablagerungen sein, die an den Karst der Skopos- und Askion-Voyrinos-Berge angrenzen. So die Sari-Giol-Ebene, wo der Grundwasserspiegel höher liegt als in den umliegenden Kalkgebieten. Sogar eine Verbindung mit dem nordwestlichen Teil des Vermion kann nicht ausgeschlossen werden.

## 8. Verweildauer und Herkunft des Quellwassers

### 8.1 EINFÜHRUNG

Der Ursprung des Quellwassers kann mit Hilfe seiner chemischen Eigenschaften, seines Gehaltes an Umweltisotopen und mittels künstlicher Markierungsmittel untersucht werden. Für hydrogeologische Studien in regionalem Rahmen sind Markierungsmittel — an ausgewählten Punkten ins hydraulische System injiziert — meist ungeeignet. Lange



unterirdische Strömungswege, Verweildauer, Auslaugungs- und Auflösungserscheinungen beeinträchtigen die Markierungsversuche. Daher beschränkte man sich bei den vorliegenden Untersuchungen auf die Wasserchemie und besonders auf Umweltisotopen.

Das Wasserstoffisotop Tritium und Sauerstoff  $^{18}\text{O}$  welche in der vorliegenden Studie verwendet wurden, treten im gesamten hydrologischen Zyklus auf. Tritium ist radioaktiver Wasserstoff mit einer Halbwertszeit von 12 Jahren. Die Einheit für die Tritiumkonzentration ist TU (= Tritium Unit). 1 TU ist gleich dem Verhältnis, Tritium : stabiler Wasserstoff =  $1 : 10^{18}$ . Kosmische Strahlung produziert in der Atmosphäre ungefähr 10 TU. Viel grössere Mengen werden durch Wasserstoffbomben-Explosionen freigesetzt. Vor ca. zehn Jahren enthielten die Niederschläge mehr als 1000 TU. Wenn beispielsweise das Grundwasser im Untersuchungsgebiet mehr als 80 TU enthält, versickerte es nach 1962 (Höhepunkt der Nuklearexplosionen: 1963). Ist andererseits die Konzentration weniger als etwa 40 TU, infiltrierte das Grundwasser wahrscheinlich vor 1963, und mit weniger als 20 TU darf dies mit Bestimmtheit angenommen werden (ungefähre TU-Richtwerte für Nord-Griechenland, Winter 1972/73).

$^{18}\text{O}$  ist ein stabiles Isotop. Da seine mittlere Konzentration als Funktion des geographischen Ortes variiert (Abhängigkeit von der Höhe, der geographischen Breite, der Distanz von der Küste und der Temperatur) kann es für die Ermittlung der Grundwasserherkunft verwendet werden.

Die Konzentration von  $^{18}\text{O}$  wird in  $\delta$ -Einheiten ausgedrückt, welche die Konzentration der schweren Moleküle in der Wasserprobe verglichen zu einem Standardwasser (SMOW = Standard Mean Ocean Water) angibt:

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{R_{\text{Probe}} - R_{\text{Standard}}}{R_{\text{Standard}}} \cdot 1000 \text{ ‰}$$

## 8.2 UNTERSUCHUNGEN

Zwischen Oktober 1972 bis April 1973 wurden 51 Proben für Tritium- und  $^{18}\text{O}$ -Analysen entnommen. Die Analysen wurden durch das Isotopen-Laboratorium des Physikalischen Institutes der Universität Bern (U. Siegenthaler und U. Schotterer) ausgeführt. Während der gleichen Periode wurden 25 Wasserproben für chemische Untersuchungen erhoben. Für Vergleichszwecke wurden nicht nur Proben der Karstquellen, sondern auch vom Aliakmon-Fluss, vom Vegoritiss-See und von einer Niederschlagsmessstation entnommen.

Aufgrund von Tritium,  $^{18}\text{O}$  und der Mineralisation des Wassers, ist über dessen Herkunft folgende Interpretation möglich (vgl. Bild 7).

a) Neraidha-Quellen: Der  $^{18}\text{O}$ -, der niedrige TU-Gehalt und die kleinen monatlichen Variationen der TU-Konzentration, welche gleichzeitig für die beiden analysier-

ten Quellaustritte Neraidha I und Neraidha II zutreffen, geben an, dass

- 80 bis 90 % des Quellwassers vor 1958 infiltrierte und der verbleibende Rest von 10 bis 20 % während der letzten Jahre;
- keine Verbindung zum Vegoritiss-See existiert;
- die Herkunft des Quellwassers leicht verschieden ist von dem der Tripotamosquellen (Nrn. 17—19, 24) bei Veria.

b) Die Tripotamos- und HES Veria-Quellen zeigen untereinander ähnliche Werte: Ihr Wasser infiltrierte vor nicht mehr als zwei bis drei Jahren. Sie haben eine verwandte Herkunft.

c) Es scheint, dass 20 bis 30 % des Karakagia-Quellwassers (Quellen bei Agras) aus dem Vegoritiss-See stammen. Die verbleibenden 70 bis 80 % besitzen eine Verweilzeit von kurzer Dauer oder von mehr als zehn Jahren; aufgrund von starken Schüttungsschwankungen dürfte die erste Annahme richtig sein.

d) Die Nicolau-Quellen bei Naussa führen, wenn überhaupt, höchstens 10 % Vegoritiss-Seewasser: TU-Konzentration und Variationen in der Schüttung deuten auf eine Verweilzeit von nicht mehr als fünf Jahren.

## 9. Schlussfolgerungen

- Aufgrund der hydrogeologischen Studie — durchgeführt mit verschiedenen, unabhängigen Untersuchungsmethoden — scheint die Beckendichtigkeit des Kardamakis-Reservoirs gewährleistet zu sein. Alle Ergebnisse deuten auf eine hoch gelegene, SE—NW gerichtete Grundwasserscheide durch den Vermion hin und bestätigen das Vorhandensein einer Grundwasserbarriere in der Vardarzone. Wasserverluste durch den Karst des Vermiongebirges und die Vardarzone in die Ebene von Thessaloniki sind daher praktisch ausgeschlossen.
- Ein Zufluss von der Grössenordnung der Neraidha-Quell-Schüttung wird auch nach dem Aufstau anhalten.
- Die verkarsteten Gesteine werden zusätzlichen Speicherraum liefern; diesem Umstand sollte insbesondere beim ersten Aufstau Rechnung getragen werden.

## Nachtrag

Im Winter 1974 wurde mit der Stauhaltung im Kardamakis-Reservoir begonnen. Bei Redaktionsschluss hatte die Staukote 285 m ü.M. erreicht (Stauziel 291 m ü.M.). Gleichzeitig mit dem Seeanstieg reagierte der Grundwasserspiegel in den Piezometern GX 2a, GX 5 und GX 9 und stellte sich auf dasselbe Niveau ein. Die restlichen Piezometerstände wurden bis zu diesem Zeitpunkt von der Stauhaltung nicht beeinflusst; auch die Schüttung der Karstquellen im östlichen Vermion blieb konstant.

Adresse der Verfasser:

Dr. Ch. Haefeli, Hydrogeologe  
Dr. J. Schweizer, Geologe  
Elektro-Watt Ingenieurunternehmung AG  
Bellerivestrasse 36  
8008 Zürich