

Wasserwirtschaftliche Untersuchungen im Karst von Montenegro

Von A. KRAUSPE (Aachen)

Inhalt:	Seite
1. Einleitung	102
2. Basisdaten	105
2.1. Klima	105
2.2. Hydrographie	105
2.3. Geologie	109
2.3.1. Stellung im größeren Raum	109
2.3.2. Stratigraphie und Lithologie	112
2.3.3. Tektonik und Verkarstung	114
2.4. Pedologie	115
3. Wasserbedarf	116
3.1. Potentielle Evapotranspiration (ETP)	116
3.1.1. Messung der ETP	116
3.1.2. Berechnung der ETP	116
3.1.2.1. Formel von TURC	116
3.1.2.2. Formel von PENMAN	117
3.1.2.3. Formel von BLANEY & CRIDDLE	118
3.1.3. Projektwerte der ETP	119
3.2. Theoretischer Wasserbedarf	119
3.3. Praktische Bewässerungserfahrungen	120
3.4. Möglichkeiten zur Deckung des Wasserbedarfes	120
4. Zur Deckung des Wasserbedarfes aus Grundwasser	120
4.1. Hydrogeologie und Hydrologie der Zeta-Ebene	120
4.1.1. Grundwasserstockwerke	120
4.1.1.1. Quartäres Porengrundwasserstockwerk	120
4.1.1.2. Tertiäres Poren- und Kluftgrundwasserstockwerk	121
4.1.1.3. Mesozoisches Karstwasserstockwerk	121
4.1.2. Kommunikation zwischen den Grundwasserstockwerken	121
4.1.2.1. Westrand der Ebene	121
4.1.2.2. Südrand der Ebene und mesozoische Inselberge	123
4.1.2.3. Ostrand der Ebene	123
4.1.3. Grundwasserfließrichtung und Vorflutverhältnisse	124
4.1.4. Grundwasserspiegelgefälle	125
4.1.5. Schwankungen des Grundwasserspiegels	126
4.1.6. Flurabstand des Grundwasserspiegels	127
4.1.7. Grundwassermächtigkeit	128

4.1.8. Permeabilität und Transmissivität	129
4.1.8.1. Ergebnisse von Pumpversuchen	129
4.1.8.2. Räumliche Verteilung der Transmissivität	132
4.1.9. Grundwasserneubildung	132
4.1.9.1. Allgemeines	132
4.1.9.2. Einspeisung von Karstwasser	133
4.1.9.3. Versickernde Niederschläge	133
4.1.9.4. Versickerndes Flußwasser	135
4.1.10. Unterirdischer Abfluß	137
4.1.11. Grundwasserhöflichkeit	139
4.1.12. Grundwassergüte	140
4.2. Folgerungen für das Bewässerungsprojekt	141
4.2.1. Nutzbarkeit des Grundwassers	141
4.2.1.1. Grundwasserdargebot	141
4.2.1.2. Bewässerbare Flächen	142
4.2.2. Nutzungsweise	142
4.2.2.1. Art, Anzahl und Leistung der Brunnen	142
4.2.2.2. Lage der Brunnen	142
4.2.2.3. Tiefe und Ausbau der Brunnen	145
4.2.3. Voraussichtliche Auswirkungen der projektierten Grundwasserentnahmen	145
4.2.3.1. Auswirkungen auf die Grundwasserernährung	145
4.2.3.2. Auswirkungen auf die Höhe des Grundwasserspiegels	146
4.2.4. Möglichkeiten zur Erhöhung des Grundwasserdargebotes	147
4.2.5. Ausblick	148
Danksagung	149
Zusammenfassung	149
Literatur	150
Summary	151

1. Einleitung

Die Zeta-Ebene zwischen Titograd und dem Skadar-See (Fig. 1) ist mit fast 300 km² die größte Ebene im überwiegend gebirgigen Montenegro („Schwarze Berge“). Trotz der südlichen Lage (42° nördlicher Breite) und der Vorteile des adriatischen Klimas sind nur knapp 10% dieser Fläche landwirtschaftlich genutzt, zum größten Teil durch kleinste Privatbetriebe, daneben durch das Agrokombinat „13. Juli“ in Titograd. Wegen der großen Bedeutung der Ebene für die landwirtschaftliche Produktion Montenegros und ganz Jugoslawiens sieht der Entwicklungsplan des Agrokombinates vor, die Ebene schrittweise nutzbar zu machen.

Nachdem von jugoslawischer Seite Basisdaten auf den Gebieten der Klimatologie (18, 21), Hydrologie (1, 11, 12, 13, 19, 20, 23), Geoelektrik (10) und Pedologie (2, 13)

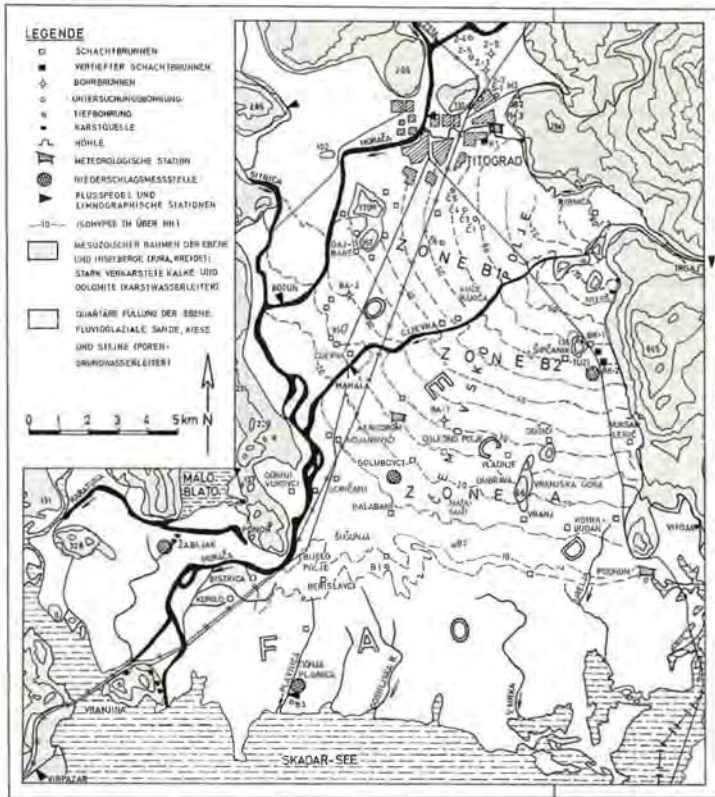


Fig. 1: Übersichtskarte der Zeta-Ebene (Montenegro).

erarbeitet wurden sowie eine Versuchsfarm eingerichtet war, veranlaßten Größe und Schwierigkeit der Aufgabe die jugoslawischen Behörden, technische und wirtschaftliche Hilfe der FAO (Food and Agriculture Organization) und der OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) anzufordern. Dabei wird der südliche Teil der Ebene bis zur Höhe + 9 m über NN – die zeitweilig überschwemmte Uferzone des Skadar-Sees – durch die FAO bearbeitet, der zentrale und nördliche Teil der Ebene (Čemovsko Polje) durch die OECD (vgl. Fig. 1).

Innerhalb des Gesamtprojektes beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit den Bewässerungsmöglichkeiten aus Grundwasser. Entsprechend dem Stufenplan der Nutzlandgewinnung liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen im zentralen Teil der Ebene (Zonen A und B 2 auf Fig. 1).

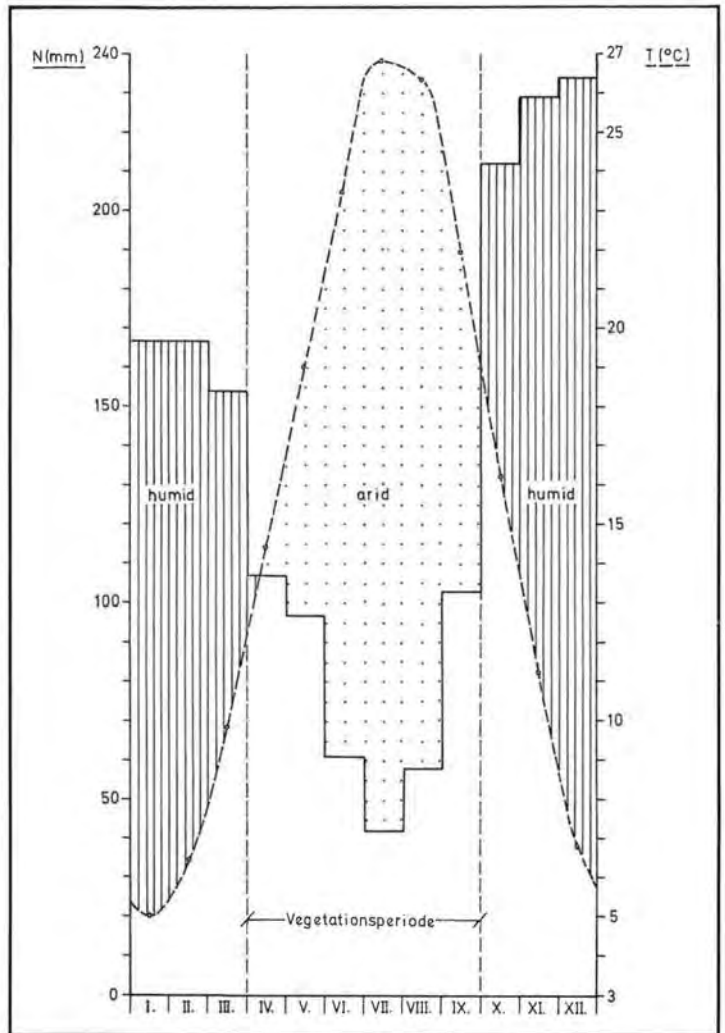


Fig. 2: Klimadiagramm Meteorologische Station Titograd (42° 26' N).

2. Basisdaten

2.1. Klima

Die wasserwirtschaftliche Problematik zeigt sich bereits im Klimadiagramm (Fig. 2, Daten aus [18]). Infolge der Meeresnähe (30 km) dominiert das adriatische Klima mit humidem Winter und arider Vegetationsperiode (April bis September). Unter diesen Bedingungen sagen die Jahresmittel (1630 mm Niederschlag, Lufttemperatur 15,6° C) nur wenig aus. Gerechter wird der Aufgabenstellung eine Klima-Betrachtung in Perioden, die dem Bewässerungsbedarf (Abs. 4.2.1.2.) zugrunde gelegt ist.

Von Bedeutung für die wasserwirtschaftlichen Verhältnisse sind ferner folgende Faktoren, welche die Verdunstung begünstigen:

- Relativ starke Nordwinde (Bura) und Südwinde (Jugo) mit mittleren Geschwindigkeiten von 4,4 bzw. 3,0 m/s, die oft orkanartig anschwellen (in Titograd werden an 13 Tagen im Jahr Windgeschwindigkeiten ≥ 8 Beaufort = 18,9 m/s und an 66 Tagen im Jahr ≥ 6 Beaufort = 12,3 m/s erreicht).
- Geringe Bewölkung in den heißen Monaten Juni bis September (reelle Insolation = $\frac{3}{8}$ - $\frac{3}{4}$ der potentiellen Insolation).
- Geringe relative Luftfeuchtigkeit während der Vegetationsperiode:

Monat:	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Relative Luftfeuchtigkeit (%):	66	65	59	51	51	61

Die klimatischen Verhältnisse erfordern also zur Zeit des größten Wasserbedarfes der Kulturen umfangreiche künstliche Bewässerung.

2.2. Hydrographie

Fig. 3 gibt einen schematischen Überblick über die Hydrographie der Zeta-Skadar-Ebene. Aus dem gebirgigen Zentral-Montenegro strömen der Ebene von Nordwesten und Norden die Flüsse Zeta und Morača zu. Während die Zeta perenniert, fällt die Morača direkt nach dem Austritt aus ihrem grandiosen Canyon während der heißen Sommermonate häufig trocken.

Aus den Schneebergen Albaniens kommend, tritt die Cijevna von Nordosten in die Ebene ein. Auch sie versiegt während des Sommers innerhalb der Ebene. Ribnica und Sitnica, kleinere Nebenflüsse der Morača, die aus Karstquellen am Rande der Ebene entspringen, sind ebenfalls periodische Flüsse.

Von der Konfluenz mit der Zeta bis zur Cijevna-Mündung führt die Morača ständig Wasser, wenn auch mit starken Abflussschwankungen. Unterhalb versickert sie in Trockenzeiten durch Kontakt mit verkarsteten Karbonatgesteinen. Erst der teilweise regulierte Unterlauf der Morača bis zur Einmündung in den Skadar-See weist wieder ständigen Abfluß auf.

Die Abflussschwankungen der Hauptflüsse Morača und Cijevna als Funktion der Niederschläge zeigt Fig. 4 (Daten aus [20]). Das Abflußmaximum fällt mit dem Niederschlagsmaximum im Dezember zusammen. Ein zweites Abflußmaximum im April/Mai ist durch die Schneeschmelze bedingt. Besonders deutlich ist dieses Schneeregime bei der Cijevna ausgeprägt. Das Abflußminimum im August folgt dem Niederschlagsminimum mit einmonatiger Verzögerung.

Der Wasserspiegel des Skadar-Sees reagiert wiederum mit jeweils einmonatiger Verzögerung auf die Extrema der Abflüsse. Die gegenüber den Abflußkurven ausgeglichene Ganglinie geht hauptsächlich auf die zusätzliche Speisung durch Grundwasser und die Retentionswirkung der Porengrundwasserleiter zurück.

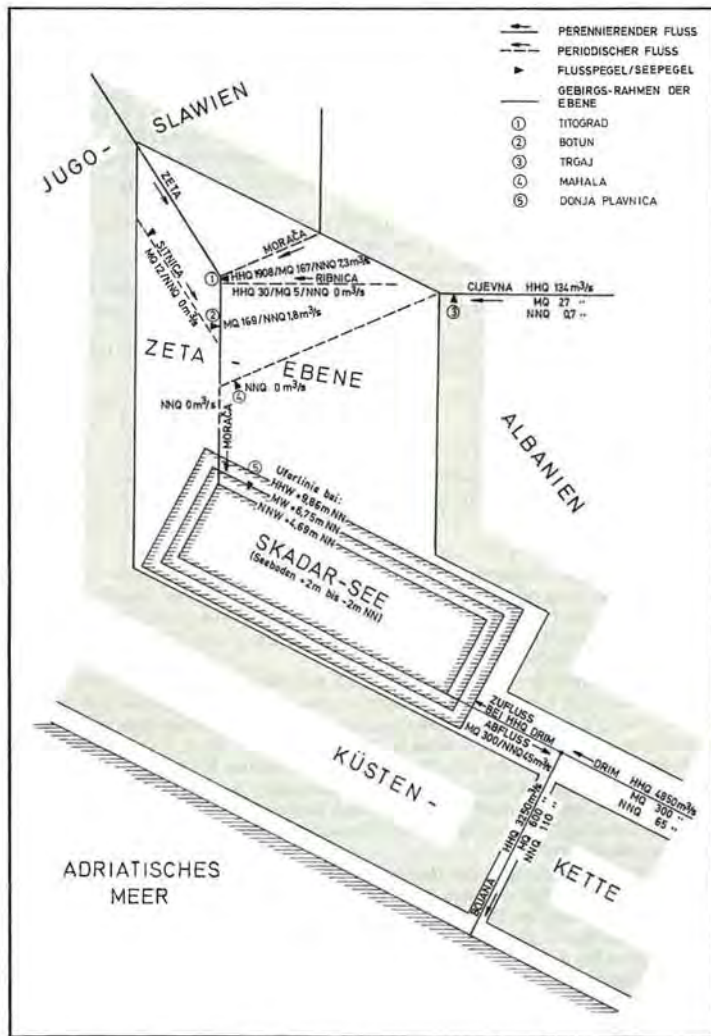
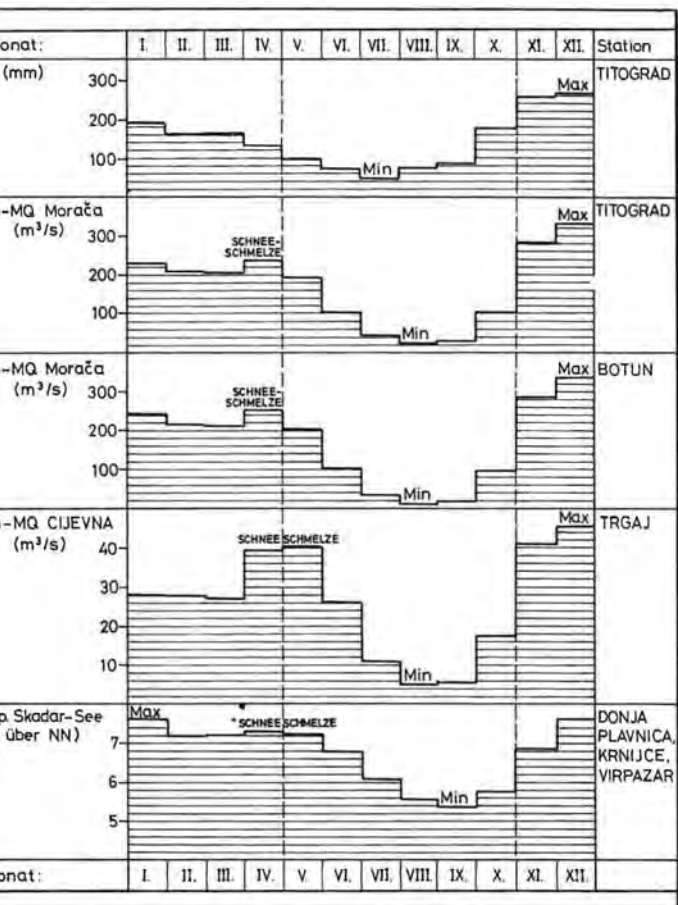


Fig. 3: Schema Hydrographie der Zeta-Ebene.



4: Monatsmittel der Niederschläge (Station Titograd), der Abflußmengen von Morača und Cijevna und des Wasserspiegels des Skadar-Sees (Jahresreihe 1956/1968).

Was die dargestellten Seespiegel-Schwankungen für die landwirtschaftliche Nutzung der unteren Zeta-Ebene bedeuten, illustrieren die Abbildungen Fig. 5 und Fig. 6. Sie zeigen Burgberg und Ortschaft Žabljak bei niedrigem und hohem Wasserspiegel des Skadar-Sees (Lage vgl. Fig. 1). Der Fuß des Inselberges liegt auf etwa + 8 m über NN.

Die Ausdehnung der zeitweilig überschwemmten Küstenzone des Skadar-Sees ist auf Fig. 1 erkennbar. Die eingetragene Küstenlinie bezieht sich auf NNW = + 4,69 m NN; bei MW verläuft die Küstenlinie entlang der Höhe + 6,75 m NN; bei HHW reicht der See bis + 9,86 m NN (vgl. auch schematische Darstellung auf Fig. 3).

Diese enormen Spiegelschwankungen von maximal 5,17 m gehen nicht allein auf die Zuflüsse aus der Zeta-Ebene zurück. Eine der Hauptursachen sind die verheerenden Hochwässer des Flusses Drim aus den albanischen Schneebergen. Bis zu einem Katastrophen-Hochwasser im Jahre 1846 (die Hochwasservorhersage ergibt einen theoretischen Höchstabfluß von 7000 m³/s alle 10.000 Jahre) mündete der alte Drim ca. 20 km südöstlich des natürlichen See-Abflusses Bojana in die Adria. Seit diesem Durchbruch vereinigt er sich wenige Kilometer vom Skadar-See entfernt mit dem entgegenkommenden See-Abfluß (vgl. Kreis auf Fig. 7), um mit diesem gemeinsam als Bojana nach Südwesten durch die Küstenkette der Adria zuzufließen. Als Folge dieser eigenartigen hydrographischen Verhältnisse verteilen sich die bekanntgewordenen Höchstabflüßmengen wie folgt (vgl. auch Fig. 3):

Morača bei Titograd:	HHQ	1908 m ³ /s (16.12.1963)
Abfluß des Skadar-Sees bei Skadar (Skutari):		0 m ³ /s
Drim bei Skadar:	HHQ	4850 m ³ /s (13. 1. 1963)
Bojana:	HHQ	3250 m ³ /s



Fig. 5: Žabljak bei niedrigem Wasserspiegel des Skadar-Sees (Foto: M. Mićunović).



Fig. 6: Žabljak bei hohem Wasserspiegel des Skadar-Sees (Foto: M. MITUNOVIĆ).

Bei Hochwasserführung der Flüsse nimmt der Skadar-See also nicht nur seine natürlichen Zuflüsse auf, sondern auch einen Teil des Hochwasserabflusses vom Drim (1600 m³/s abzüglich eines untergeordneten Anteils, der dann wieder im alten Drim-Lauf abfließt), wobei der See abflußlos wird.

Die in der Größenordnung richtigen Zahlen zeigen, daß das Problem der landwirtschaftlichen Nutzbarmachung der zeitweise überfluteten Uferzone in Kooperation mit Albanien durch Regulierung des Drim-Laufes gelöst werden sollte.

2.3. Geologie

2.3.1. Stellung im größeren Raum

Fig. 7 läßt die Zeta-Ebene als größtes neozoisches Becken innerhalb der Dinariden Montenegros erkennen. Zusammen mit dem Skadar-See bildet sie eine natürliche geologische Einheit, die Zeta-Skadar-Ebene. Es handelt sich um eine tektonische Schwächezone im Scharungsbereich der nordwest-südöstlichen dinarischen Richtung mit der nordost-südwestlichen zetischen Richtung. Die Ebene ist in verkarstete Kalke und Dolomite des Mesozoikums (Trias-Kreide) eingesenkt. Diese bereits von J. CVJIĆ (8, 9) konstatierte junge tektogenetische und epirogenetische Senkungstendenz hält bis heute an: Unter dem Skadar-See werden Epizentren von Erdbeben beobachtet, die bis zu Stärke 9 der Sieberg-Mercalli-Skala erreichen, und die ganze Zeta-Ebene ist eine rezent seismisch aktive Zone.

Der gebirgige Rahmen der Ebene gehört einer tektonischen Einheit an, die Z. BEŠIĆ (4, 5, 6) als altmontenegrinische Schuppe zwischen küstenländischer Schuppe und

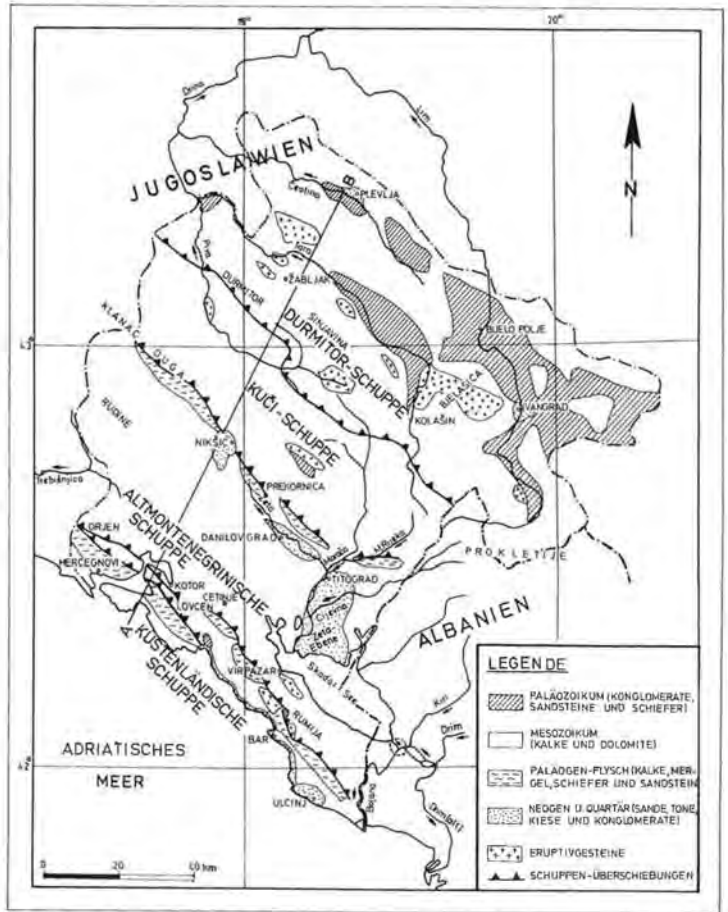


Fig. 7: Geologisch-tektonische Übersichtskarte von Montenegro (nach Z. Bžić, 1949).

Kuči-Schuppe bezeichnet (vgl. Fig. 7). Z. BEŠIĆ stellte der älteren Deckentheorie (F. NOPCSA [16], F. KOSSMAT [14], J. BOURCART [7] u. a.) die Auffassung gegenüber, daß in den Dinariden Montenegros lediglich ein südwestvergenter Faltenbau besteht, der durch zahlreiche mehr oder weniger steil stehende streichende Störungen den Charakter eines Schuppenbaues annimmt (vgl. Fig. 8).

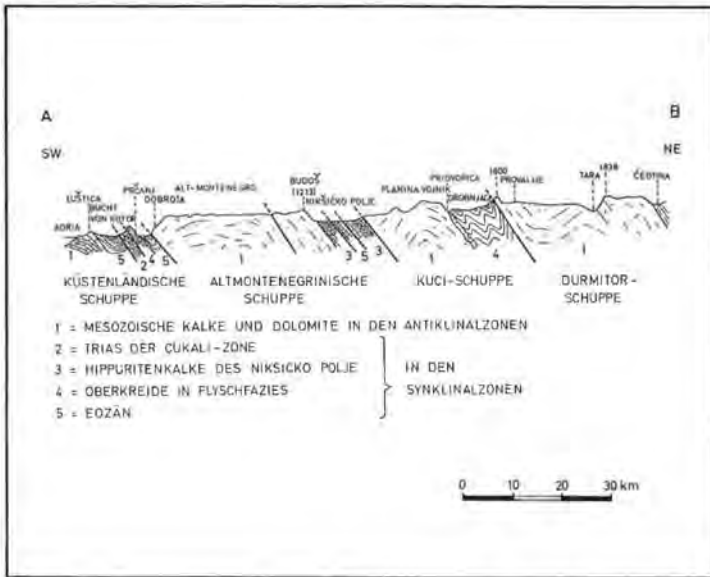


Fig. 8: Schematisches Profil Bucht von Kotor – Četina (nach Z. BEŠIĆ, 1959). Lage des Schnittes s. Fig. 7.

Wie jede Schuppe, so bestand die altmontenegrinische Schuppe nach Z. BEŠIĆ (6) ursprünglich aus Antiklinale und Synklinale, die während der Orogenese derart verändert wurden, daß sie heute oft schwer erkennbar sind. Demnach wird die Antiklinalzone durch das 800 m hohe Karstplateau von Altmontenegro gebildet, dem u. a. die Gebirge Orjen und Lovćen angehören (vgl. Fig. 7). Es wird hauptsächlich aus Trias- und Jura-Kalken aufgebaut. Der unmittelbare Rahmen der Ebene gehört dagegen der auch morphologisch tiefer gelegenen Synklinalzone an, die vorwiegend aus oberkretazischen Kalken und Dolomiten besteht. Der Oberkreide lagert am Nordoststrand der Schuppe noch Eozän-Flysch auf. Da an anderen Stellen auch Oligozän in den Falten- und Schuppenbau einbezogen ist, das Neogen in der Zeta-Ebene aber flache Lagerung aufweist, ergibt sich das Alter der Hauptphase des Schuppenbaues als postoligozän-präneogen.

2.3.2. Stratigraphie und Lithologie

Am Aufbau der Zeta-Ebene sind folgende Schichten beteiligt (22):

Zeitalter	Formation	Stufe	Mächtigkeit	Hauptgesteine	Beimengungen	
Neozoikum	Quaritär	Pleistozän	0-85 m, durchschnittlich 60 m	Hellgraue Kalk- und Dolomitkiese u. -steine, z. T. Konglomerat mit karbonatischem Bindemittel	hellgrauer kalkig-dolomitischer Grob-, Mittel- u. Feinsand, z. T. Schluff- und Tonlagen	
Mesozoikum	Kreide	Neogen	Pliozän + Miozän	0-260 m	grüne u. graue Tone u. sandige Tone	tonige Sandsteine
Mesozoikum	Kreide	Oberkreide	höhere Oberkreide + Turon	ca. 150 m	hellgraue Dolomite und Kalke	bituminös
			Cenoman	> 170 m	hellgraue Dolomite u. Kalke	bituminös
					hellgraue Kalke	mergelig
			+ Alb	ca. 400 m	und Dolomite	
Mesozoikum	Kreide	Unterkreide	tiefer Unterkreide	ca. 900 m	hellgraue Kalke und Dolomite	
Jura	Malm		Portland + Kimmeridge	ca. 150 m	hellgraue Dolomite u. Kalke	Kalke bituminös
			Kimmeridge + Oxford	> 150 m	hellgraue oolithische Kalke	

Während Oberjura nur in den Bergen am Rande der Ebene aufgeschlossen ist, ragt Kreide in einigen Inselbergen um 50 bis 100 m aus der Zeta-Ebene selbst auf. Es handelt sich um die höchsten Erhebungen eines postoligozän-präneogenen Paläoreliefs (vgl. Fig. 9), das im übrigen durch jüngere Bildungen verhüllt ist.

Die Vertiefungen dieses Paläoreliefs sind mit Tonen, Sanden und Sandsteinen des Neogens (marines Miozän und Pliozän) ausgefüllt. Die Neogenbasis liegt am Nordufer des Skadar-Sees nach Erdölbohrungen und geoelektrischen Untersuchungen tiefer als - 400 m NN.

Darüber bzw. bei Auskeilen des Neogens direkt auf dem Mesozoikum lagern fluvioglaziale Sedimente des Pleistozäns, die im überwiegenden Teil der Ebene an der Oberfläche anstehen. Es handelt sich um kalkig-dolomitische Steine und Kiese, die im Schwankungsbereich eines fossilen oder rezenten Grundwasserspiegels z. T. mit karbonatischem Bindemittel zu Konglomeraten verkittet wurden. Besonders gut ist dies in den canyonartigen Einschnitten der Morača und der Cijevna zu beobachten, aber auch am östlichen Rand der Ebene bei Tuzi.

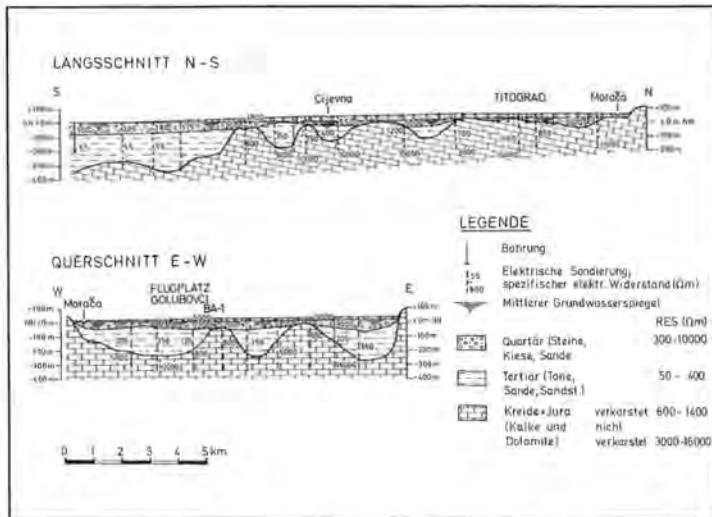


Fig. 9: Interpretierte geoelektrische Profile durch die Zeta-Ebene nach Untersuchungen von „Geofizika“ Zagreb (1956–1967).

Die fluvioglazialen Sedimente entstammen hauptsächlich den Gebirgsmassiven im Osten der Ebene, die während der Rib- und Würm-Eiszeit intensiv vergletschert waren. Von dort drangen die Gletscher im Cijevna-Tal in südwestlicher Richtung auf die Zeta-Ebene vor, und das glazigene Material wurde durch die Cijevna in Form eines riesigen Schwemmkegels in die Ebene umgelagert. Dieser Kegel ist aus den Höhenlinien von Fig. 1 gut erkennbar. Bei seinem Vordringen wurde der alte nord-südliche Verlauf der Morača am Ostrand der Ebene verschüttet. Dadurch wurde die Morača an den Westrand der Ebene zur Zeta hin abgedrängt. Auch das alte Zeta-Tal wurde durch den Vorstoß des Cijevna-Schwemmfächers verschüttet, und heute graben sich Morača und Zeta gemeinsam in die fluvioglazialen Sedimente ein.

Entsprechend der Transportrichtung im Cijevna-Schwemmkegel nehmen die Korngrößen nach Südwesten ab. In Zone B 2 (vgl. Fig. 1) beträgt die durchschnittliche Korngröße noch 20–80 mm, in Zone A schalten sich zunehmend Sandlagen ein. Am Nordufer des Skadar-Sees ist eine viermalige Wechsellagerung zwischen psephitisch-psammitischem und pelitisch-torfigem Material zu beobachten, die verschiedene Transgressions- und Regressionsstadien des Sees anzeigt.

Wie die Oberfläche des Mesozoikums, so weist auch die Quartärbasis nach geoelektrischen Untersuchungen von Geofizika Zagreb (10) ein Relief auf. Es ist allerdings bedeutend schwächer entwickelt als das präneogene Relief, soweit es nicht mit jenem zusammenfällt. Die markantesten Merkmale dieses Reliefs sind zwei ausgeprägte, etwa Nord-Süd verlaufende Rinnen am Ost- und Westrand der Ebene. Sie erreichen im Süden mit der Quartärbasis bei –90 m NN bzw. –80 m NN ihre größte Tiefenlage. Entsprechend nimmt auch die Quartärmächtigkeit von 35 m im Norden bei Titograd

über 60–70 m im zentralen Teil der Ebene auf mehr als 90 m am Nordufer des Skadar-Sees zu. Infolge des Reliefs der Quartärunterfläche bestehen freilich auf engem Raum bedeutende Mächtigkeitsunterschiede.

2.3.3. Tektonik und Verkarstung

Durch die Überdeckung mit jungen Sedimenten entzieht sich die Tektonik des mesozoischen Untergrundes in der Zeta-Ebene der direkten Beobachtung. Sie muß daher aus den Lagerungsverhältnissen am Rande der Ebene und aus Bohrungen in der Ebene in Verbindung mit den geoelektrischen Untersuchungen erschlossen werden.

Wenn auch im Mesozoikum des Rahmens keine Randabbrüche festgestellt wurden, so sind doch Grabenstörungen in nord-südlicher Richtung an den Rändern der Ebene anzunehmen. Dies kann einerseits daraus geschlossen werden, daß die mesozoischen Schichten westlich und östlich der Ebene im Streichen und in der Abfolge nicht zusammenpassen, andererseits aus dem steilen Abfall des Paläoreliefes in manchen Randbereichen der Ebene, besonders deutlich zwischen Tuzi und Podhum.

Westlich der Ebene dominiert im Streichen der mesozoischen Schichten die dinarische Richtung, östlich der Ebene kommt ost-westliches und südwest-nordöstliches Streichen hinzu. Entsprechend ist das Einfallen der Schichten nach Nordosten, Norden oder Nordwesten gerichtet, und zwar flach mit 10–20°. Die Lagerungsverhältnisse sind dabei nördlich von Schuppenüberschiebungen bei Tuzi (Ostrand) und am See Malo Blato (Westrand) normal, dagegen südlich dieser Überschiebungen invers (Cenoman über Turon). Insgesamt ist eine ausgeprägte Südwestvergenz zu beobachten, die durch Schuppentektonik überprägt wird.

Bezüglich der Störungsrichtungen zeigt sich ein deutliches Maximum in dinarischer Richtung (140°), welches auf Überschiebungen zurückgeht, ebenso wie ein Nebenmaximum in ost-westlicher Richtung. Das Hauptmaximum zwischen 30° und 50° wird von Querstörungen senkrecht zum dinarischen Streichen gebildet. Diagonalstörungen finden sich hauptsächlich in ost-westlicher Richtung, während die theoretisch zu erwartende nord-südliche Richtung im gebirgigen Rahmen der Ebene stark unterdrückt ist.

Die erwähnten Störungsrichtungen werden von einem ausgeprägten Netz meist bankrechter Klüfte begleitet. Klüfte und Störungen stellen zusammen mit den Schichtfugen bevorzugte Lösungsbahnen für Sicker- und Grundwasser dar. Die kalkig-dolomitischen Gesteine in den Inselbergen der Ebene und deren Rahmen sind daher stark verkarstet. An der Oberfläche sind Klüfte und Schichtfugen zentimeterweit geöffnet, ja, es kommen auch ausgedehnte Karsthohlräume vor, wie z. B. die Höhlen von Vuksan Lekić am Ostrand der Ebene. Besonders intensiv ist die Verkarstung bei steiler Lage der Lösungsflächen.

Daß die Verkarstung schon in altpleistozäner Zeit wirksam war, konnte durch geoelektrische Untersuchungen von Geofizika Zagreb (10) nachgewiesen werden. Dabei läßt sich in den Kalken und Dolomiten deutlich zwischen einer oberen verkarsteten Zone mit 800 bis 1400 Ωm und einer unteren unverkarsteten Zone mit 3000 bis < 10.000 Ωm unterscheiden (vgl. Fig. 9). Die verkarsteten Zonen befinden sich vor allem unter den Aufragungen des präneogenen Paläoreliefes mit oder ohne Pleistozänüberdeckung. Dagegen wurden verkarstete Zonen unter den mit Neogen gefüllten Depressionen nicht angetroffen. Man kann daher den Beginn des Verkarstungsprozesses postneogen und vor Ablagerung des Cijevna-Schwemmkegels ansetzen.

2.4. Pedologie

In Abhängigkeit von der räumlichen Korngrößenverteilung des Substrates (vgl. Abs. 2.3.2.) finden sich in der Zeta-Ebene von Norden nach Süden folgende pedologische Zonen:

Nördlich der Cijevna (Zone B 1 auf Fig. 1) überwiegen flachgründige Braunerden von 15 bis 40 cm Mächtigkeit über fluvioglazialen sandig-kiesigen Steinen und Konglomeraten. Der Humusgehalt im A-Horizont liegt bei 3–5%.

Im zentralen Teil der Ebene (Zone B 2 und nördlicher Teil der Zone A) herrschen flachgründige Rendzinen vor. Sie lagern in 20–40 cm Tiefe fluvioglazialen sandigsteinigen Kiesen und kiesigen Sanden auf. Der Humusgehalt im A-Horizont ist mit rund 10% höher als bei den Braunerden.

Braunerden und Rendzinen nehmen die größten Flächen in der Zeta-Ebene ein. Sie sind als ausgesprochene Skelettböden entwickelt. Der Skelettanteil steigt von 15–30% im B-Horizont auf über 60% im C-Horizont an (vgl. Fig. 10).

Typisch für diese flachgründigen Böden ist die steppenartige Xerophyten-Vegetation mit *Saturea subspicata*, *Asphodelus racemosus* und einigen Grasarten, die im Frühjahr und Herbst eine Schafweide ermöglichen. Waldbestände, die bis zu den Türkenkriegen insbesondere in der Braunerde-Zone anzutreffen waren, wurden bis auf kümmerliche Restbestände abgeholzt. Durch die damit verbundene Störung des Wasserhaushaltes und die Winderosion sind die pedogenetischen Prozesse entscheidend beeinflusst worden. Lokal ist der A-Horizont bereits der Winderosion anheimgefallen.

Bei einer nutzbaren Wasserkapazität von 16 bis 19 Volumenprozenten (Braunerden) bzw. rund 25% (Rendzinen) und einem Durchlässigkeitsbeiwert zwischen 3,5



Fig. 10: Flachgründiger Skelettboden in der nördlichen Zeta-Ebene (Foto: R. MIŠKOVIC).

und $6,0 \cdot 10^{-5}$ m/s ist die Retention der flachgründigen Böden gering und der Versickerungsanteil relativ hoch.

An die Rendzina-Zone schließen sich im Süden Hochflutablagerungen der Flüsse an. Zwischen den NN-Höhen + 20 m und + 10 m (südlicher Teil der Zone A) herrschen sandige Mergel- und Lehm Böden von krümeliger Struktur vor, deren Mächtigkeit in nord-südlicher Richtung von 0,4 m bis auf 2 m zunimmt. Sie lagern schluffigen Sanden, im Norden auch kiesigen Sanden auf. Dieses Gebiet ist das fruchtbarste der Ebene und wird relativ intensiv privat-landwirtschaftlich genutzt.

In der zeitweilig überfluteten Küstenzone des Skadar-Sees überwiegen tonig-mergelig-schluffige Böden mit nach Süden zunehmendem Gehalt an torfiger Substanz. Sie erreichen bis zu 2,5 m Mächtigkeit und lagern meist schwerdurchlässigen Mergel- und Tonschichten auf. Durch Überschwemmungen und hochstehendes Grundwasser ist eine nennenswerte landwirtschaftliche Nutzung zur Zeit nicht möglich.

Skelettarme Terrarossa von unterschiedlicher Mächtigkeit ist auf die Umgebung der mesozoischen Karbonatgesteine des Gebirgsrandes und der Inselberge beschränkt. Flächenmäßig sind diese Böden von untergeordneter Bedeutung.

3. Wasserbedarf

3.1. Potentielle Evapotranspiration (ETP)

3.1.1. Messung der ETP

Über die Größenordnung der ETP orientieren Evapotranspirationmessungen des Hydrometeorologischen Dienstes von Montenegro (21). Sie wurden in der Vegetationsperiode der Jahre 1965–1968 an zwei mit weißem Klee bewachsenen Evapotranspirometern in Donja Gorica durchgeführt. Wegen der Störung der Energiebilanz durch die vegetationslose Umgebung der Zylinder wurden reichlich hohe Werte ermittelt:

Monat	ETP (mm)
April	163
Mai	188
Juni	193
Juli	251
August	305
September	174
Summe	1274.

Sie liegen damit höher als die Verdunstung von der freien Wasseroberfläche (vgl. Abs. 3.1.2.2.).

3.1.2. Berechnung der ETP

3.1.2.1. Formel von TURC

In der Evapotranspirationsformel von TURC

$$ETP = k \frac{t}{t + 15} (I_g + 50) \left(1 + \frac{50 - H_r}{70}\right)$$

bedeuten:

ETP = mittlere potentielle Evapotranspiration in mm/Monat

t = mittlere monatliche Lufttemperatur in °C

k = Konstante: 0,37 im Februar; in allen anderen Monaten 0,40

$I_g = I_{gA} \left(0,18 + 0,62 \frac{h}{H}\right)$ in cal/cm² · Tag

- h = mittlere wirkliche Dauer der Insolation in h/Tag
 H = mittlere theoretische Dauer der Insolation in h/Tag, entsprechend der astronomischen Dauer des Tages
 I_{GA} = Gebiets-Insolation in Abwesenheit von Atmosphäre in $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{Tag}$
 Hr = Monatsmittel der relativen Luftfeuchtigkeit in %; der Korrekturfaktor $(1 + \frac{50 - Hr}{70})$ wird nur berücksichtigt, wenn $Hr > 50\%$.

Die zur Berechnung der monatlichen ETP notwendigen Glieder sind für die meteorologische Station Titograd (geographische Breite: $42^\circ 26'$), Jahresreihe 1931/1940 und 1946/1968, für die Insolation 1953/1968:

Monat	IV	V	VI	VII	VIII	IX
k	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
t	14,4	19,0	23,4	26,8	26,3	21,9
Hr	66	85	59	51	51	61
I_{GA}	797	928	983	957	852	693
h	7,0	7,9	9,4	11,0	10,7	8,7
H	13,38	14,58	15,25	14,98	13,91	12,50

Hieraus ergeben sich für die Vegetationsperiode die folgenden Werte der ETP:

Monat	ETP (mm)
April	90
Mai	117
Juni	144
Juli	172
August	153
September	114
Summe	790

3.1.2.2. Formel von PENMAN

Die Formel von PENMAN gilt für die Evaporation von der freien Wasseroberfläche (E_0). Sie läßt sich durch empirisch ermittelte Korrelationskoeffizienten k_c in die ETP verschiedener Kulturen umrechnen (vgl. auch [3]).

Die PENMANSche Formel kann vereinfacht geschrieben werden:

$$E_0 = \frac{I}{59} \frac{([II \cdot III] - [IV \cdot V \cdot VI]) + VII (VIII - e_a)}{I + 0,485}$$

mit:

$$I = \Delta$$

$$II \cdot III = 0,95 (0,29 \cos \varphi + 0,53 \frac{n}{N}) HA$$

$$IV = 118 \cdot 10^{-9} (273 + t)^4$$

$$V = 0,10 + 0,90 \frac{n}{N}$$

$$VI = 0,56 - 0,092 \sqrt{e_a}$$

$$VII = 0,485 \cdot 0,35 (0,5 + 0,54 u)$$

$$VIII = e_{\max}$$

Hierin bedeuten:

- E_o = Evaporation von freier Wasseroberfläche in mm/24 h
 Δ = Neigung der Temperatur-Dampfdruckkurve bei der Temperatur t in mm Hg pro °C
t = mittlere Lufttemperatur in 2 m Höhe in °C, berechnet aus dem 24-h-Mittel
 φ = geographische Breite in °
n = mittlere wirkliche Dauer der Insolation in h
N = mittlere theoretische Dauer der Insolation in h
 H_a = theoretisches Maximum der Kurzwellenstrahlung in Abwesenheit von Atmosphäre in cal/cm² · Tag (ANGOT-Werte aus SMITHSONS Meteorologischen Tafeln)
 e_{max} = Dampfdruck bei Sättigung und der Temperatur t in mm Hg
 e_a = tatsächlicher Dampfdruck in 2 m Höhe in mm Hg, berechnet aus dem 24-h-Mittel ($H_r - e_{max}$)
u = Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe in m/s, berechnet aus dem 24-h-Mittel.

Für die meteorologische Station Titograd gelten während der Vegetationsperiode die folgenden Daten:

	April	Mai	Juni	Juli	August	September
t	14,4	19,0	23,4	26,8	26,3	21,9
l	0,78	1,01	1,28	1,53	1,49	1,18
n	210	245	282	340	331	261
N	401,4	452,0	457,5	464,4	431,2	375,0
H_a	797	928	983	957	852	693
II - III	444	527	595	580	532	407
IV	805,0	857,9	910,7	953,3	946,9	892,5
v	0,57	0,59	0,66	0,76	0,79	0,73
H_r	0,66	0,65	0,59	0,51	0,51	0,61
VIII	12,30	16,46	21,58	26,46	25,74	19,70
e_a	8,1	10,7	12,7	13,5	13,0	12,0
VI	0,30	0,26	0,23	0,22	0,23	0,24

Da für die Windgeschwindigkeiten keine differenzierten Messungen vorliegen, wurde u entsprechend der Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen und den mittleren Windgeschwindigkeiten mit 3,4 m/s für alle betrachteten Monate angenommen (vgl. Abs. 2.1.), entsprechend VII = 0,4.

Für die Werte von E_o und ETP ergibt sich hieraus:

Monat	E_o (mm/24 h)	E_o (mm)	k_e	ETP (mm)
April	4,5	135	0,7	95
Mai	6,1	188	0,8	150
Juni	7,6	229	0,8	183
Juli	8,0	248	0,8	198
August	7,1	221	0,8	177
September	4,9	146	0,8	117
Summe		1167		920

3.1.2.3. Formel von BLANEY & CRIDDLE

Die anhand von Bewässerungserfahrungen in den USA entwickelte Formel von BLANEY & CRIDDLE liefert brauchbare Werte für aride Gebiete, ist im übrigen aber

durch den einseitigen Bezug auf die Lufttemperatur nur bedingt zuverlässig. Sie lautet: $ETP = A \cdot B \cdot p \cdot k_c$ (mm/Monat)

mit

$$A = \frac{45,7 t + 813}{100}$$

$$B = 0,0311 t + 0,240$$

t = mittlere monatliche Lufttemperatur in °C

p = monatlicher Prozentsatz der jährlichen Tages-Stunden

k_c = Kultur-Faktor, im vorliegenden Fall 0,75.

Für Titograd erhält man:

Monat	t	A	B	p	A · B · p	ETP (mm)
April	14,4	14,72	0,688	9,0	91	68
Mai	19,0	16,81	0,831	10,1	141	106
Juni	23,4	18,83	0,967	10,2	186	140
Juli	26,8	20,38	1,074	10,4	228	171
August	26,3	20,15	1,058	9,7	206	155
September	21,9	18,15	0,921	8,4	140	105
Summe						745

3.1.3. Projektwerte der ETP

Der Vergleich der nach den verschiedenen Methoden ermittelten ETP-Werte läßt erkennen, daß trotz prinzipieller Übereinstimmung methodische Abweichungen vorliegen. Die Anwendung der Formel von PENMAN ergibt die höchsten Werte, während die Formel von BLANEY & CRIDDLE im allgemeinen die niedrigste ETP liefert, was maßgeblich auf den unterschiedlichen Ansatz der empirischen Kultur-Faktoren zurückgeht. Als Projektwerte der ETP werden die Mittelwerte aus den Formeln von TURC, PENMAN und BLANEY & CRIDDLE zugrunde gelegt:

Monat	ETP (mm) TURC	ETP (mm) PENMAN	ETP (mm) BLANEY & CRIDDLE	Projektwerte der ETP (mm)
April	90	95	68	84
Mai	117	150	106	124
Juni	144	183	140	156
Juli	172	198	171	180
August	153	177	155	162
September	114	117	105	112
Summe	790	920	745	818

3.2. Theoretischer Wasserbedarf

Er ergibt sich aus der Differenz D zwischen potentieller Evapotranspiration und Niederschlag (meteorologische Station Titograd, Jahresreihe 1931/1940 und 1946/1968) während der Vegetationsperiode:

Monat	ETP (mm)	N (mm)	D (mm)	D (m ³ /ha)
April	84	107	0	0
Mai	124	97	27	270
Juni	156	61	95	950
Juli	180	42	138	1380
August	162	58	104	1040
September	112	103	9	90
Summe	818	468	373	3730

3.3. Praktische Bewässerungserfahrungen

Vom Agrokombinat „13. Juli“, Titograd, wurden bisher folgende Bewässerungserfahrungen gesammelt:

Kultur	Anzahl der Bewässerungsgaben	Monate der Bewässerungsgaben	Bewässerungsmenge (m ³ /ha)
Pfirsich	5	V-IX	1430-1600
Kirsche	4-5	V-IX	1200-1470
Birne	4-5	V-IX	1500
Erdbeere	8-9	IV-IX	2400-2660
Wein	4-5	V-IX	2000
Haselnuß	3-4	V-VIII	1500
Paprika	5	V-VI	2500
Tomate	5	V-IX	2500
Kraut	1	IV	500
grüne Bohnen	1	V	500
Luzerne	3	V-VII	2500

Man ersieht hieraus, daß – abgesehen von den Erdbeerkulturen – die Bewässerung in Einklang mit den theoretischen Ermittlungen nur in den Monaten Mai bis September erfolgt und daß die Bewässerungsmengen deutlich unter dem theoretischen Wasserbedarf (vgl. Abs. 3.2.) liegen. Geht man davon aus, daß Paprika, Pfirsiche, Wein und Futterpflanzen die Hauptkulturen sein werden und daß hierfür nach den praktischen Bewässerungserfahrungen 2500 m³/ha als ausreichend angesehen werden, so benötigt man praktisch nur $\frac{2}{3}$ des theoretischen Wasserbedarfes, ohne allerdings optimale Ergebnisse zu erzielen. Bei dem relativ geringen Retentionsvermögen der vorliegenden flachgründigen Skelettböden (vgl. Abs. 2.4.) läßt sich jedoch der Bewässerungseffekt durch Vermehrung der Gabenzahl bei konstanter Bewässerungsmenge pro Vegetationsperiode noch erhöhen.

3.4. Möglichkeiten zur Deckung des Wasserbedarfes

Zur Deckung des Wasserbedarfes der im Projektgebiet vorgesehenen Kulturen kommen folgende Quellen in Frage (in der Reihenfolge der Wirtschaftlichkeit):

- Grundwasser
- Flußwasser (Flüsse Morača und Cijevna)
- Seewasser (Skadar-See)

Die folgenden Untersuchungen gelten ausschließlich der Frage, ob oder bis zu welchem Grade der Wasserbedarf aus dem Grundwasser als der ökonomischsten Quelle gedeckt werden kann. Der Schwerpunkt liegt dabei im zentralen Teil der Ebene (Zonen A und B 2 auf Fig. 1). Da auch im nördlichen und südlichen Teil der Ebene neue Kulturen vorgesehen sind, ist das Hauptaugenmerk auf die Grundwasservorkommen der zentralen Ebene selbst zu richten.

4. Zur Deckung des Wasserbedarfes aus Grundwasser

4.1. Hydrogeologie und Hydrologie der Zeta-Ebene

4.1.1. Grundwasserstockwerke

4.1.1.1. Quartäres Porengrundwasserstockwerk

Das Grundwasser in der quartären Beckenfüllung der Zeta-Ebene bewegt sich im Porenraum der Sande, Kiese und Steine. Es ist meist durch freien Grundwasserspiegel gekennzeichnet. Im Überschwemmungsbereich des Skadar-Sees gerät der

Grundwasserspiegel durch Überlagerung mit mergeligen Tonen unter Spannung. In Bohrungen bei Vranjina und an der Mündung der Gostiljska stellte sich ein artesischer Grundwasserspiegel der tieferen Kiessand-Lagen bei +0,13 m bzw. +1,50 m über dem Seewasserspiegel ein.

Über dem Hauptgrundwasserstockwerk befinden sich lokal noch hängende Grundwasserstockwerke geringerer Mächtigkeit über karbonatisch verkitteten Konglomeratlagen. Z. B. erfaßt Brunnen 18 in Tuzi ein hängendes Grundwasserstockwerk mit mittlerem Spiegel bei +25 m NN, während der benachbarte Brunnen 10 den Hauptgrundwasserspiegel bei +12 m NN antrifft. In Dušiči wird in Brunnen 19 hängendes Grundwasser bei +15 m NN erreicht, im nahen Brunnen 5 der Hauptgrundwasserspiegel bei +10 m NN. Auch in der Nähe der Cijevna zwischen Srpska und Mahala wird ein oberer Grundwasserspiegel bei +15 m NN angetroffen, der Hauptgrundwasserspiegel aber erst bei +10 m NN.

Eine Kluft- oder Karstwasserführung der Konglomerate wurde nicht beobachtet. Da zwischen fest verkitteten Konglomeraten und ungebundenen Kiessanden und Steinen alle Übergänge vorkommen, ist auch im Porenraum der weniger verfestigten Konglomerate eine Porenwasserführung möglich. Dies ist für die Versickerung von Flußwasser bedeutsam, sofern das Flußbett aus Konglomeraten besteht. Es wechseln hier impermeable, semipermeable und permeable Bereiche.

4.1.1.2. Tertiäres Poren- und Kluftgrundwasserstockwerk

Differenzierter als im Quartär sind die hydrogeologischen Verhältnisse im Neogen, welches innerhalb der Zeta-Ebene die Depressionen im Relief der mesozoischen Unterlage ausfüllt. Hier sind die vorherrschenden Tone Grundwasserstauer, während zwischengelagerte tonige Sandsteine je nach Kompaktion und Zementation Kluftwasser oder Kluft- und Porenwasser führen. Insgesamt ist die Bedeutung der neogenen Grundwasserstockwerke gering, und es dominiert die wasserstauende Wirkung der Tone, welche das quartäre vom mesozoischen Grundwasserstockwerk trennen.

4.1.1.3. Mesozoisches Karstwasserstockwerk

Die mesozoischen Kalke und Dolomite sind an den Rändern und im Untergrund der Zeta-Ebene stark verkarstet (vgl. Abs. 2.3.3.). Signifikante Unterschiede in der Verkarstungsintensität der Kalke und der Dolomite konnten nicht festgestellt werden.

Die Karbonatgesteine stellen einen Karst-Grundwasserleiter von großer Kapazität dar. Die Wasserbewegung erfolgt in definierten Lösungskanälen, die den Trennflächen im Gestein, daneben auch Zonen mit erhöhter Makroporosität folgen.

Ein Karstwasserspiegel kann über größere Entfernungen nicht interpoliert werden. Im Gebirgsrahmen der Ebene gibt es Karstwasservorkommen in ganz verschiedener Höhe über dem Grundwasserspiegel der Ebene. Das Karstwasser im Mesozoikum bildet also ein selbständiges Grundwasserstockwerk, wenn auch lokal Kommunikationen mit dem quartären Stockwerk bestehen.

4.1.2. Kommunikationen zwischen den Grundwasserstockwerken

4.1.2.1. Westrand der Ebene

Wo die Kontaktflächen permeabel sind, kommuniziert das Porengrundwasser im Quartär mit dem Karstwasser im Mesozoikum. Dabei kommt es in örtlich und zeitlich unterschiedlicher Weise teils zur Einspeisung von Karstwasser in das Quartär, teils zur Einspeisung von Porengrundwasser in das Mesozoikum.

Am Westrand der Ebene tritt Porengrundwasser der Ebene in die stark verkarsteten Karbonatgesteine im Liegenden einer Überschiebung westlich von Mahala ein. Es findet seine Vorflut in starken Quellen am Ostufer des Sees Malo Blato (vgl. Pfeile auf Fig. 11). Diese Fließrichtung wird sowohl bei hohem als auch bei niedrigem Grundwasserspiegel im Quartär beibehalten. In gleicher Weise fließt das Porengrundwasser aus der Gegend von Bijelo Polje/Morača durch den verkarsteten Oberjura des Berges Lepa ploča in Richtung auf den Ort Ponor an der Segrnica ab. Inwieweit die Quellen am Fuße des Burgberges von Zabljak aus Porenwasser des Quartärs gespeist werden, welches in die mesozoischen Karbonatgesteine übertritt, oder allein aus Karstwasser mit höher gelegenen Einzugsgebiet im Norden, ist offen.

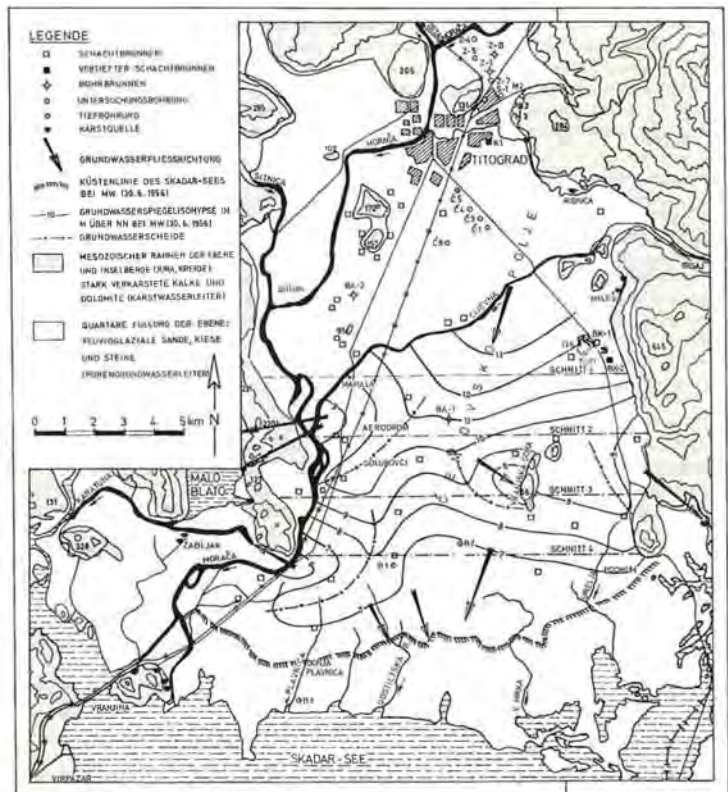


Fig. 11: Grundwasserspiegelisohypsen bei Mittelwasserverhältnissen.

4.1.2.2. Südrand der Ebene und mesozoische Inselberge

Auf der Insel Vranjina im Skadar-See treten einige Karstquellen aus, z.B. bei der Ortschaft Vranjina, weiterhin an der Stelle, wo die Morača die Insel erstmals berührt, ca. 400 m weiter südlich sowie eine starke Quelle unterhalb des Klosters Sv. Nikola, die jedoch nur bei tiefem Seewasserspiegel sichtbar wird. Auch bei diesen Quellen ist die Herkunft des Karstwassers nicht geklärt. Eine Beteiligung von Porengrundwasser der Ebene ist jedoch sehr wahrscheinlich, da die wasserführenden Kiessandlagen – bedingt durch die steile Aufragung der mesozoischen Karbonatgesteine der Insel – mit den Karstspalten in Kontakt treten können.

Kommunikationen zwischen Poren- und Karstwasserstockwerk wurden nachgewiesen an den Rändern der Inselberge. Aus den Grundwasserspiegelisohypsen (vgl. Fig. 11) ist abzuleiten, daß Porengrundwasser aus dem Raum Dubrava/Vladnja in das Karstwasser des Inselberges Vranjska Gora eingespeist wird, und zwar sowohl bei hohem als auch bei niedrigem Grundwasserspiegel im Quartär. Dabei sind die Einspeisungszonen lokal begrenzt: An der Südostseite des Berges zwischen Dušići und Vranj läßt sich z.B. keine Einspeisung nachweisen. Der Grund ist in der Ernährung des Quartärgrundwassers von Nordwesten her zu suchen.

4.1.2.3. Ostrand der Ebene

Die Verhältnisse werden am besten durch die Ergebnisse eines Färbungsversuches mit Natriumfluorescein nach V. RADULOVIĆ (15) charakterisiert. Das Färbemittel wurde während einer Trockenperiode des Jahres 1965 nahe des Pegels Trgaj (vgl. Fig. 1) in die Cijevna eingegeben (Höhe ca. + 90 m NN). Nach ca. 24 h erschien es in den Quellen von Mileš nordöstlich von Tuzi (vgl. Fig. 11; Abstandsentfernung 2,4 km, Höhe ca. + 70 m NN), nach weiteren 24 h in einer Höhle bei Vuksan Lekić südöstlich von Tuzi (Abstandsentfernung 4,1 km, Höhe des Karstwasserspiegels bei NW ca. + 10 m NN) und nach weiteren sechs Tagen in der Quelle von Vitoja nordöstlich von Podhum am Skadar-See (Abstandsentfernung 4,1 km, Seewasserspiegel bei NW ca. + 5 m NN).

Hier wird also Flußwasser der Cijevna zunächst zu Karstwasser. In den Quellen von Mileš tritt dieses teilweise wieder an die Oberfläche, um bei NW sogleich in benachbarten Ponoren erneut zu versinken und längs des Randes der Ebene in den verkarsteten Karbonatgesteinen über die Höhle zur Quelle von Vitoja abzufließen. Bei HW können die Durchflußquerschnitte im Karst jedoch nicht die volle Schüttungsmenge der Quellen von Mileš aufnehmen. Dann speisen die Quellen den periodischen Fluß Urelja, der über Tuzi, Vuksan Lekić und Kotrabudan innerhalb der Ebene zum Skadar-See abfließt. Daß dieser Fluß sich hoch über dem Grundwasserspiegel halten kann, ist mit der partiellen Zementierung der oberflächennahen Schichten und der Überschreitung der Schluckfähigkeit des Flußbettes zu erklären. Schon bei MW-Verhältnissen versickert der Fluß oberhalb von Tuzi. Er speist dann zunächst das erwähnte hängende Grundwasserstockwerk im Quartär (vgl. Abs. 4.1.1.1.), um von da zwischen Dušići und Vuksan Lekić in der Art eines unterirdischen Wasserfalles auf den Hauptgrundwasserspiegel im Quartär abzufallen.

In der Gegend von Vuksan Lekić südöstlich von Tuzi ist nach den Grundwassergleichen bei HW, MW und NW eine mehr oder weniger starke Einspeisung aus dem Porengrundwasser der Ebene in die Karsthohlräume des Gebirgsrahmens und von da nach Südosten in den Skadar-See gegeben (vgl. Pfeil auf Fig. 11): Die Kommunikation ist einsinnig. Das zeigen auch die Karstwasserspiegel in der Höhle nördlich von Vuksan Lekić. Die Anwohner erklären, daß hier der höchste Wasserspiegel in Geländehöhe liegt, also bei ca. + 38 m NN, der tiefste Wasserspiegel bei 25 bis 30 m unter

Gelände, also bei +13 bis +8 m NN. Demgegenüber wurde im benachbarten Brunnen 4 in Vuksan Lekić der Grundwasserspiegel im Quartär bei HW mit +10,00 m NN, bei MW mit +8,50 m NN und bei NW mit +5,57 m NN eingemessen. Daraus muß einerseits geschlossen werden, daß in der Nähe der Höhle keine Einspeisung von Karstwasser in das Porengrundwasser erfolgt, andererseits, daß wegen des ständigen Abflusses von Grundwasser aus dem Quartär in das Mesozoikum bei Vuksan Lekić verschiedene Karstsysteme bestehen, die untereinander keine Verbindung haben.

4.1.3. Grundwasserfließrichtung und Vorflutverhältnisse

Als Basisdaten liegen Grundwasserspiegelbeobachtungen an 26 Brunnen des Projektgebietes vor, die vom Institut für Wasserwirtschaft und vom Agrokombinat „13. Juli“ in Titograd z. T. seit 1949 dreimal monatlich durchgeführt werden (1). Sie wurden durch eigene Messungen ergänzt.

Weil die Grundwasserspiegelschwankungen im Quartär bis zu 9 m betragen, war es erforderlich, Grundwasserspiegelisohypsen für hohen, mittleren und niedrigen Grundwasserstand darzustellen. Da die extremen Wasserstände nicht überall synchron eintreten, wurden Grundwasserspiegelganglinien angefertigt, durch deren Analyse folgende charakteristische Wasserstände ausgewählt wurden:

MW: 30. 6. 1956 (Grundwasserspiegelisohypsen auf Fig. 11)

HW: 20. 12. 1952

NW: 30. 12. 1953 (Grundwasserspiegelisohypsen auf Fig. 13)

Der Spiegelplan für MW-Verhältnisse (Fig. 11) zeigt generell eine Fließrichtung von Norden (Cijevna) nach Süden zum Skadar-See an, die durch lokale Vorflut in den Karst modifiziert wird.

Da in der Küstenzone des Skadar-Sees das Grundwasser durch tonige Deckschichten vom Seewasser getrennt ist, kann eine Kommunikation nur an den in Abs. 4.1.2.2. beschriebenen Aufragungen der verkarsteten Karbonatgesteine stattfinden. Hierfür kommt u. a. der Inselberg Vranjina in Frage, der aber so peripher zur Zeta-Ebene liegt, daß er für den zentralen Teil der Ebene als Vorflut wohl ausscheidet. Die Grundwasserspiegelisohypsen zeigen hier vielmehr eine Vorflut in Richtung auf die Fließchen Plavnica, Zetica, Gostiljska, Pjavnik, Svinaš und Mrka, die bei MW-Verhältnissen ihren Ursprung in Stauquellen bei Berislavci, Gostilje und Gošici nehmen. Diese Quelllinie entspricht dem Auskeilen der südlich anschließenden tonigen Deckschichten. Das Grundwasser der quartären Beckenfüllung läuft hier in die erwähnten Fließchen über, um nach Süden – durch tonige Deckschichten nunmehr vom Aquifer getrennt – in den Skadar-See abzuzießen.

Neben dieser Hauptvorflut findet das Grundwasser im Quartär der Ebene seine Vorflut in den verkarsteten Karbonatgesteinen am Rande und inmitten der Ebene (vgl. Abs. 4.1.2.). Die dadurch hervorgerufenen Absenkungszonen sind auf Fig. 11 deutlich zu erkennen bei Mahala (Abfluß nach Südwesten zu den Quellen am Ostufer des Sees Malo Blato), bei Bijelo Polje (Abfluß nach Westen in Richtung auf den Ort Ponor, eventuell Kommunikation mit den Quellen von Vranjina), bei Vladnja (Abfluß nach Südosten in das Mesozoikum des Inselberges Vranjska Gora) und bei Vuksan Lekić (Abfluß nach Südosten durch das Mesozoikum zum Skadar-See). Diese Absenkungszonen werden im Süden jeweils durch Grundwasserscheiden von dem nach Süden gerichteten Hauptgrundwasserstrom getrennt.

In allen Absenkungszonen besitzt der Grundwasserspiegel eine für die Fließbewegung noch ausreichende Höhendifferenz zum Wasserspiegel des Skadar-Sees mit Ausnahme der Absenkungszone von Bijelo Polje. Hier wurde der Grundwasserspiegel in den Brunnen Bistrica 16 mit +6,28 m NN und Bijelo Polje 15 mit +5,77 m NN ein-

gemessen, während der Wasserspiegel des Skadar-Sees zur gleichen Zeit am Pegel Donja Plavnica bei + 6,32 m NN festgestellt wurde. Zur Erklärung dieser Höhenverhältnisse gibt es folgende Möglichkeiten: Entweder geht die Vorflut zum See Malo Blato, dessen Spiegel zumindest zeitweilig unter dem des Skadar-Sees liegen müßte, oder über den Karst direkt zur Adria. Für einen künstlichen Absenkungstrichter sind die Grundwasserentnahmen zu gering.

Schließlich ist die Kommunikation zwischen den Hauptflüssen Morača und Cijevna und dem Grundwasser zu klären. Hierfür stehen neben den Grundwasserspiegelbeobachtungen die absoluten Höhen der Flußwasserspiegel bei MW an den Moračepegeln Titograd (+ 26,02 m NN) und Botun (+ 16,43 m NN) sowie an den Cijevnapegeln Trgaj (+ 87,97 m NN) und Mahala (ca. + 18,00 m NN) zur Verfügung. Durch Vergleich mit den absoluten Höhen des Grundwasserspiegels ergibt sich für die Cijevna, daß sie an jeder Stelle über dem Grundwasserspiegel fließt und in das Grundwasser einspeisen kann.

Der Flußwasserspiegel der Morača liegt bei MW in der Gegend von Botun um 2–5 m über dem Grundwasserspiegel. Unterhalb von Botun lassen sich mangels eines hydrologischen Längsprofiles der Morača keine sicheren Höhenangaben machen. Jedoch kann unter Berücksichtigung der Grundwasserspiegelisohypsen (die keine Grundwassereinspeisung in die Morača anzeigen), der NW-Verhältnisse (wobei die Morača zwischen Cijevnamündung und Bijelo Polje austrocknet) und der HW-Verhältnisse (wobei der Anstieg des Grundwasserspiegels im Quartär nicht ohne Versickerungswasser aus der Morača zu erklären ist) mit hoher Wahrscheinlichkeit angenommen werden, daß die Morača zwischen Botun und Bistrica in das Grundwasser einspeist. In Morača-Nähe ist also mit Uferfiltrat zu rechnen, wenngleich die Fließrichtung des Grundwassers im Quartär auch insgesamt unter der Morača nach Osten durch den Karst zum See Malo Blato gerichtet ist.

Gegenüber den MW-Verhältnissen ergeben sich bei HW nur geringe Änderungen, was die Grundwasserfließrichtung und die Kommunikation mit dem Flußwasser angeht. Der Grundwasserspiegel liegt jedoch insgesamt um ca. 3 m höher, und die Einspeisung von Flußwasser ist verstärkt. Die Hauptvorflut geht wiederum nach Süden über die erwähnten Fließchen zum Skadar-See. Allerdings liegen deren Quellen gegenüber MW-Verhältnissen weiter nördlich, die Quelle der Pjavnik sogar in der Gegend von Golubovci. Die aufgeführten Absenkungszonen mit Vorflut in den Karst sind auch bei HW vorhanden. Im Bereich von Bijelo Polje liegt der Grundwasserspiegel ebenfalls erheblich tiefer als der Wasserspiegel des Skadar-Sees.

Auch bei NW-Verhältnissen (vgl. Fig. 13) ergeben sich keine prinzipiellen Veränderungen, jedoch liegt der Grundwasserspiegel um 2–3 m tiefer als bei MW. In der Absenkungszone von Bijelo Polje liegt der Grundwasserspiegel wiederum bis zu 0,84 m unter dem Wasserspiegel des Skadar-Sees. Die kleinen zum See entwässernden Fließchen sind versiegt.

4.1.4. Grundwasserspiegelgefälle

Um das Grundwasserspiegelgefälle zeitlich und räumlich zu erfassen, wurden die Gefällswerte bei HW-, MW- und NW-Verhältnissen im Bereich von vier Schnittlinien bestimmt (Schnitte 1–4 auf Fig. 11). Es wurden folgende Durchschnittswerte gefunden:

Bereich	HW (20. 12. 1952)	MW (30. 6. 1956)	NW (30. 12. 1953)
Schnitt 1	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Schnitt 2	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Schnitt 3	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Schnitt 4	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$

Entsprechend der guten Permeabilität der quartären Lockergesteine ist also das Grundwasserspiegelgefälle mit ca. 1‰ gering. Lokal – insbesondere im Bereich der Absenkungszonen – werden höhere Werte erreicht.

4.1.5. Schwankungen des Grundwasserspiegels

Die Schwankungen des Grundwasserspiegels werden maßgeblich bestimmt durch die Schwankungen des Wasserspiegels im Skadar-See, der die lokale Vorflut für das Grundwasser im Quartär der Zeta-Ebene bildet. Im Beobachtungszeitraum 1956/1968 betragen die maximalen Schwankungen des Seewasserspiegels am Pegel Donja Plavnica 5,17 m (20). Die charakteristischen Wasserstände sind (m über NN):
 NNW MNW MW MHW HHW
 +4,69 +5,21 +6,75 +8,64 +9,86

Nächst den Schwankungen des Seewasserspiegels nimmt die unterschiedliche Ernährung des Grundwassers durch versickernde Niederschläge und Flußwasser (Cijevna und Morača) Einfluß auf die Schwankungen des Grundwasserspiegels.

Einen Überblick über die minimalen, mittleren und maximalen jährlichen Grundwasserspiegelschwankungen sowie über die größten im Beobachtungszeitraum festgestellten Schwankungen in den einzelnen Brunnen gibt die nachstehende Tabelle:

Ort/Brunnen	Tiefe (m)	Grundwasserspiegelschwankungen (m)			absolut (Beobachtungsdauer)
		min.	jährlich Mittel	max.	
Gornji					
Vukovci/1	13,47	2,85	3,95	5,40	5,64 (1950/60)
Vranj/3	19,51	2,80	3,92	4,93	5,30 (1950/60)
Kotrabudan/3	16,21	2,66	3,88	4,97	5,04 (1950/60)
Vuksan Lekić/4	40,84	3,06	4,54	5,94	6,75 (1950/60)
Dušići/5	32,36	2,92	4,55	5,71	6,70 (1950/60)
Vladnje/6	27,91	2,72	4,06	5,03	5,49 (1950/60)
Dubrave/7	25,73	2,52	3,95	5,40	6,15 (1950/60)
Mahala/8	18,41	3,15	4,07	4,93	5,49 (1950/60)
Cijevna/9	21,09	4,09	5,29	6,20	6,79 (1950/60)
Tuzi/10	51,43	3,94	6,02	7,24	8,73 (1950/60)
Šipčani/11	49,79	3,60	5,53	7,03	8,70 (1950/60)
Goričani/12	13,52	2,47	3,58	4,67	5,40 (1950/60)
Mojanovići/13	14,64	2,99	3,78	4,45	5,20 (1950/60)
Kurilo/14	9,29	2,18	3,00	3,81	4,53 (1950/60)
Bijelo Polje/15	14,31	2,16	3,22	4,44	5,67 (1950/60)
Bistrica/16	10,40	2,12	3,30	5,15	5,33 (1950/60)
Balabani/95	11,83	2,07	2,76	3,67	4,14 (1949/68)
Gostilj/98	9,58	1,94	2,89	3,88	4,72 (1949/68)
Šušunja/100	11,60	2,13	3,00	4,12	4,84 (1949/68)
Berislavci/101	9,46	2,11	2,76	3,93	4,88 (1948/68)

Generell steigen die mittleren jährlichen Spiegelschwankungen von ca. 3 m in der Nähe des Skadar-Sees auf 5–6 m an der Cijevna und am nordöstlichen Rand der Ebene bei Tuzi an (vgl. Ganglinien auf Fig. 12). Die besonders hohen Schwankungen in den Brunnen Šipčani und Tuzi weisen auf die Nähe des Karstwasserleiters mit seiner bedeutenden Kapazität und seinen hohen Spiegelschwankungen von 25–30 m hin.

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf der Grundwasserspiegelschwankungen anhand von Ganglinien (Fig. 12), so erkennt man, daß der Tiefstand des Grundwasserspiegels am häufigsten im September eintritt. Bei Verzögerung der herbstlichen Regenfälle kann er sich in die erste Oktoberhälfte verschieben.

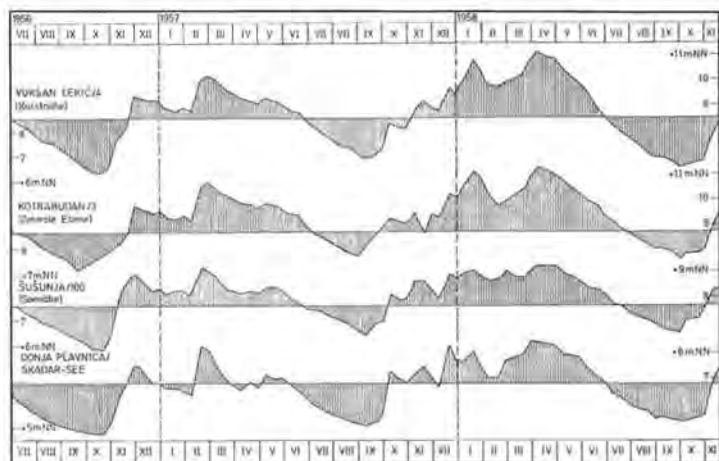


Fig. 12: Ganglinien des Grundwasserspiegels zwischen Karst- und Seeregime.

Der anschließende Anstieg des Grundwasserspiegels ist i. a. steil, bedingt durch Anstieg des Wasserspiegels im See sowie starke Regenfälle und Versickerung aus den hochwasserführenden Flüssen. Das erste Maximum wird in der der Morača benachbarten Zone gewöhnlich am 20. 12. erreicht, entsprechend der November/Dezember-Hochwasserführung der Morača, im nordöstlichen Projektgebiet (Tuzi – Šipčani – Dubrave) Ende Dezember/Anfang Januar, entsprechend den Dezember-Hochwässern der Cijevna unter Berücksichtigung der längeren Fließwege des versickernenden Flußwassers. Zuletzt (Februar) tritt das erste Maximum im zentralen und östlichen Gebiet von Vladnje – Vranj – Vuksan Lekić – Kotrabudan auf, wo das Grundwasser ebenfalls von der Cijevna gespeist wird.

Nach dem ersten Maximum hält sich ein hoher Grundwasserspiegel auf etwas niedrigerem Niveau bis zum zweiten Maximum infolge der Schneeschmelze bis April/Mai, dann beginnt die Kurve des natürlichen Grundwasserspiegelabfalls. Diese setzt sich ohne zwischenzeitliche Anstiege bis zum Tiefststand des Grundwasserspiegels im September bzw. Anfang Oktober fort.

4.1.6. Flurabstand des Grundwasserspiegels

Bestimmendes Element des Flurabstandes ist die topographische Höhe des Geländes, die sich räumlich weit stärker ändert als die Grundwasserspiegelhöhe.

Die Flurabstände steigen von 0 m an der jeweiligen Uferlinie des Skadar-Sees auf über 40 m im Gebiet nördlich von Tuzi und Šipčani an (vgl. Fig. 13). Die Flurabstände bei HW liegen um etwa 5 m niedriger als bei NW.

Interessant ist ein Vergleich der Ortslagen mit den Flurabstandslinien. Man erkennt, daß der relativ dicht besiedelte südliche Bereich etwa von der 10-m-Flurabstandslinie bei NW im Norden begrenzt wird. Da sich diese Linie (Ortslagen Lajkovići – Mahala – Golubovci – Mataguži – Vranj – Sukurić – Kotrabudan) über verschiedene pedologische Einheiten hinwegzieht, dürfte sie durch die Grenze der mit

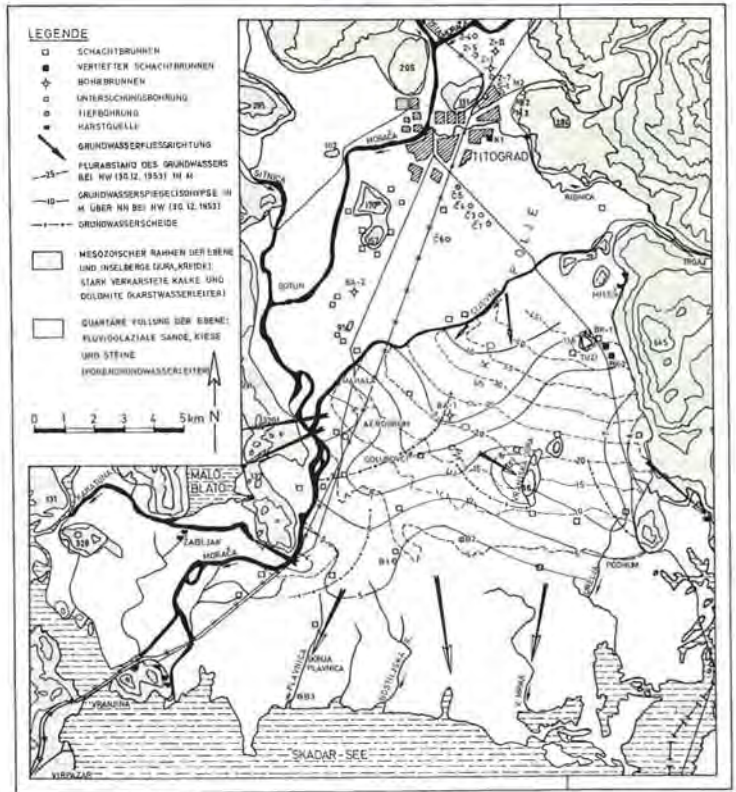


Fig. 13: Grundwasserspiegelisohypsen und Flurabstand des Grundwasserspiegels bei Niedrigwasser-Verhältnissen.

einfachen technischen Mitteln zu bewerkstelligen Grundwasserhebung bedingt sein (Kreiselpumpen mit tiefer gelegtem Fundament).

Schließlich sei darauf hingewiesen, daß der Flurabstand im Gebiet südlich von Berislavci und Gostilje bei MW-Verhältnissen bei nur 1 m und darunter liegt, was für bestimmte Kulturen limitierend sein kann.

4.1.7. Grundwassermächtigkeit

Die Mächtigkeit des Grundwassers im Quartär wurde auf Fig. 15 für niedrigen Wasserspiegel (30. 12. 1953) dargestellt, weil für die Grundwassergewinnung die ungünstigsten Verhältnisse entscheidend sind. Unter Berücksichtigung von Abs. 4.1.3. ist die mittlere Grundwassermächtigkeit um 2 m (Süden) bis 3 m (Norden) höher, die

größte Grundwassermächtigkeit um 5 m (Süden) bis 6 m (Norden) höher anzusetzen als bei NW-Verhältnissen.

Wegen des geringen Gefälles des Grundwasserspiegels ist für die Grundwassermächtigkeit das Relief der Quartärbasis maßgebend. Deutlich sind die beiden in Abs. 2.3.2. beschriebenen Quartärrinnen zu erkennen. Hier treten Grundwassermächtigkeiten von über 50 m, im Zentrum und Süden von über 75 m auf.

Andererseits zieht sich an der Grenze des Quartärs gegen das Mesozoikum ein Streifen geringer Grundwassermächtigkeiten < 25 m entlang. Durch den zwischen den Rinnen gelegenen Inselberg Vranjska Gora wird das Grundwasservorkommen also in einen westlichen und einen östlichen Bereich unterteilt, was auch aus den Grundwasserspiegelisohypsen zu erkennen ist.

Generell steigt die mittlere Grundwassermächtigkeit von Norden nach Süden an. Im Bereich der in Abs. 4.1.4. aufgeführten Schnitte wurden folgende Durchschnittswerte ermittelt:

	HW (20. 12. 1952)	MW (30. 6. 1956)	NW (30. 12. 1953)
Schnitt 1	38 m	36 m	33 m
Schnitt 2	54 m	51 m	49 m
Schnitt 3	60 m	57 m	55 m
Schnitt 4	75 m	72 m	70 m

4.1.8. Permeabilität und Transmissivität

4.1.8.1. Ergebnisse von Pumpversuchen

Zur Beurteilung der Permeabilität der grundwasserführenden Quartärsedimente standen Ergebnisse von Pumpversuchen aus den Jahren 1963–1967 zur Verfügung, die in Tab. 1 wiedergegeben werden (11, 12, 15, 23). Zur Auswertung der Pumpversuche hinsichtlich des Durchlässigkeitsbeiwertes wurden je nach örtlichen Gegebenheiten (vollkommener/unvollkommener Brunnen, Meßgrößen) folgende Formeln benutzt:

$$1. \quad k_f = \frac{0,16 \, Q}{(s_1 - s_2) \, l_{1-2}} \left(\operatorname{arsh} \frac{l_{1-2}}{r_1} - \operatorname{arsh} \frac{l_{1-2}}{r_2} \right) \quad (\text{GIRINSKI})$$

$$2. \quad k_f = \frac{0,16 \, Q}{(l_0 - 0,5 [s_0 - s_1]) (s_0 - s_1)} \left(\ln \frac{1,6 (l_0 - 0,5 [s_0 - s_1])}{r_0} - \operatorname{arsh} \frac{l_0 - 0,5 (s_0 - s_1)}{r_1} \right) \quad (\text{GIRINSKI})$$

$$3. \quad k_f = \frac{0,16 \, Q}{l' \cdot s_1} \operatorname{arsh} \frac{l'}{x_1} \quad (\text{BABUSCHKIN})$$

$$4. \quad k_f = \frac{0,733 \, Q}{s_0 \left(\frac{i + s_0}{\log \frac{R}{r}} + \frac{1}{\log \frac{0,66 \, l}{r}} \right)} \quad (\text{BABUSCHKIN})$$

$$5. \quad k_f = \frac{0,183 \, Q}{\beta - H} \quad (\text{JACOB})$$

$$6. kt = \frac{(Q_2 - Q_1) \ln \frac{R}{r}}{\pi (h_1^2 - h_2^2)} \quad (\text{BIESKE})$$

$$7. kt = \frac{2 (Q_2 - Q_1)}{h_1^2 - h_2^2} \quad (\text{BIESKE})$$

$$8. kt = \frac{Q (\ln x_2 - \ln x_1)}{\pi (h_2 + h_1) (h_2 - h_1)} \quad (\text{THIEM/DUPUIT})$$

Hinsichtlich der Bedeutung der Symbole wird auf die Fachliteratur verwiesen.

Tab. 1: Auswertung von Pumpversuchen im quartären Aquifer der Zeta-Ebene (von Norden nach Süden)

Ort/Brunnen	Tiefe (m)	Ruhe-WSp. (m)	Q (l/s)	s (m)	Q/s (l/s/m)	Auswertung nach Formel	kt (m/s · 10 ⁻³)
Titograd (Zagorić)/ BZ-1	54,00	-25,30	23	1,92	12	6), 7), 8)	0,43
			34	4,70	7,2		
			68	9,40	7,2		
			81	10,26	7,9		
Titograd (Tološi)/ BT-1	59,00	-18,60	40	0,82	49	6), 7), 8)	1,4
			59,3	1,12	53		
			80	1,68	48		
Titograd (Tološi)/ BT-2	59,00	-18,67	40	0,78	51	6), 7), 8)	1,4
			59	1,10	54		
			80	1,59	50		
Titograd (Konik)/ K-1	40,00	-19,90	7,0	0,04	175	6), 7)	3,4
			12,5	0,12	104		
			16,5	0,18	92		
Daj Babe (Aluminium-Kombinat)/ BA-2	36,00	-13,80	102,9	0,40	257	1), 6), 7), 8)	7,9
			127,5	0,51	250		
— Achse des Cijevna-Schwemmfächers —							
Tuzi/ BK-1	50,00	ca. -40	3,0	0,02	150	7)	3,8
			5,0	0,07	71		
			10,0	0,22	45		
Tuzi/ BK-2	48,60	-39,80	3,0	0,08	38	7)	4,5
			5,0	0,13	38		
			10,0	0,26	39		
Sv. Nikola (Agrokombinat)/ BA-1	38,40	-18,73	53,0	0,48	110	2), 3), 4), 5), 6), 7), 8)	3,7
			71,1	0,76	94		
			87,2	1,16	75		

Für die räumliche Verteilung der Permeabilität ergibt sich, daß die k_f -Werte mit wachsender Entfernung von der Achse des Cijevna-Schwemmfächers abnehmen (vgl. Tab. 1). Diese Beobachtung entspricht den Transportrichtungen und der Korngrößenverteilung im Schwemmfächer.

Inwieweit sich der hohe k_f -Wert von $7,9 \cdot 10^{-3}$ m/s für die vom Brunnen des Aluminium-Kombinates erschlossenen Schichten verringert, wenn ausreichend lange Ableitung des Pumpwassers vorliegt, muß dahingestellt bleiben. Andererseits ist der k_f -Wert von $4,3 \cdot 10^{-4}$ m/s für Brunnen Zagorić wohl zu niedrig. Nach Mitteilung von Herrn Dipl.-Ing. PEROVIĆ (Wasserwerk Titograd) leistet dieser Brunnen im Dauerbetrieb ca. 120 l/s ohne nennenswert stärkere Absenkung, was auf die Vergrößerung der Fließquerschnitte durch Auswaschung von Bentonit der Spülung nach dem Pumpversuch zurückgeführt wird.

Aus dem engeren Projektgebiet südlich der Cijevna lagen nur die Pumpversuche am Bohrbrunnen BA-1 des Agrokombinates (11) und an den beiden vertieften Schachtbrunnen BK-1 und BK-2 in Tuzi vor (23). Das ursprünglich vorgesehene Abteufen von drei Versuchsbrunnen mit anschließendem Pumpversuch scheiterte zunächst an der Finanzierung.

Da beim Pumpversuch an Brunnen BA-1 die Ableitung des Pumpwassers zu kurz und überdies nach oberstrom gewählt worden war und daher die Möglichkeit eines hydraulischen Kurzschlusses gegeben war, wurde dieser Pumpversuch mit genügender Ableitungslänge wiederholt.

Um zusätzliche Anhaltspunkte über die räumliche Verteilung der Permeabilität zu erhalten, wurden Kurzzeitpumpversuche an flachen Schachtbrunnen in Mataguži, Gošići und Šušunja ausgeführt. Hierfür wurde eine transportable Kreiselpumpe mit Dieselantrieb verwendet, die für eine maximale Fördermenge von 25 l/s ausgelegt war. Da sich eine Leistungsdrosselung unter 8 l/s als unmöglich und eine Leistungsregelung oberhalb 10 l/s als langwierig erwies, wurden in Mataguži und Gošići bei geringem Grundwasserandrang (kein Beharrungszustand erzielbar) nur Pumpversuche mit instationären Strömungsverhältnissen durchgeführt. In Šušunja konnte da-

Tab. 2: Auswertung von Kurzzeitpumpversuchen im quartären Aquifer südlich der Cijevna.

Ort Brunnen	Tiefe	Haupt- gesteine	Ruhe-WSp. (m)	Q (l/s)	s (m)	Q/s (l/s/m)	Auswertung nach Formel	k_f (m/s)
Sv. Nikola (Agrokombi- nat)/ BA-1	38,40	sandig – steiniger Kies	-19,11	31,23	0,295	106	2), 3), 4),	$3,7 \cdot 10^{-3}$
				44,55	0,440	101	5), 6), 7),	
				52,08	0,555	94	8)	
Mataguži/ Mat-779	9,61	stark schluffi- ger, san- diger Kies	-7,245	19,2	entfällt (instationäre Methode)	5)	$3,0 \cdot 10^{-5}$	
Gošići/ Gol-Z	6,05	stark schluffi- ger, san- diger Kies	-4,47	8,75 11,98 12,63	entfällt (instationäre Methode)	5)	$2,0 \cdot 10^{-4}$	
Šušunja/ Gol-5423	5,46	sandig- steiniger Kies	-3,795	11,50 12,67	0,055 0,080	209 158	6), 7)	$1,9 \cdot 10^{-3}$

gegen infolge größeren Grundwasserzulaufes mit zwei Entnahmemengen bei stationären Strömungsverhältnissen gearbeitet werden. Alle Pumpversuche wurden im Juli 1970 bei mittlerem Grundwasserstand durchgeführt. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse findet sich auf Tab. 2.

Zusammenfassend brachte der Pumpversuch an Bohrbrunnen BA-1 die Bestätigung des früher ermittelten k_i -Wertes (11), die Pumpversuche an den flachen Schachtbrunnen dagegen zeigen, daß die Permeabilität des quartären Aquifers besonders in seinen oberen Bereichen nicht homogen ist, sondern von Schicht zu Schicht variiert, wobei k_i horizontal $>$ k_i vertikal ist.

Insgesamt handelt es sich bei der quartären Füllung der Zeta-Ebene nach den Ergebnissen der Pumpversuche um einen Grundwasserleiter mit befriedigender bis guter Permeabilität.

4.1.8.2. Räumliche Verteilung der Transmissivität

Die Faktoren der Transmissivität, nämlich Permeabilität und Grundwassermächtigkeit, sind im Gebiet zwischen Cijevna und Skadar-See unterschiedlich gut bekannt. Die Grundwassermächtigkeit wurde ermittelt aus den Grundwasserspiegelisohypsen und der geoelektrischen Quartärbasis-Karte, die ihrerseits durch Bohrungen punktuell kontrolliert ist. Wesentliche Änderungen dürften sich hier nicht mehr ergeben, es sei denn, man stellt durch weitere Bohrungen noch mächtige Zwischenlagen von zementierten Konglomeraten oder von Tonen fest.

Dagegen erfolgt die Beurteilung der Permeabilität nur nach den Pumpversuchen in den Brunnen Tuzi und Agrokombinat sowie nach allgemein-geologischen Gesichtspunkten:

Entsprechend der Korngrößenabnahme im Cijevna-Schwemmkegel nach Süden ist mit einer Abnahme der k_i -Werte in dieser Richtung zu rechnen. Der Gradient dieser Abnahme kann vorerst nur nach der Differenz der k_i -Werte in Tuzi (Schnitt 1) und in Brunnen BA-1 (Schnitt 2) abgeschätzt werden. Im Bereich der in Abs. 4.1.4. aufgeführten Schnitte wird demnach vorläufig mit folgenden Werten für k_i , die Grundwassermächtigkeit H und die Transmissivität T gerechnet:

Schnitt	HW (20. 12. 1952)			MW (30. 6. 1956)			NW (30. 12. 1953)		
	k_i (m/s)	H (m)	T (m ² /s)	k_i (m/s)	H (m)	T (m ² /s)	k_i (m/s)	H (m)	T (m ² /s)
1	0,0042	38	0,16	0,0042	36	0,15	0,0042	33	0,14
2	0,0037	54	0,20	0,0037	51	0,19	0,0037	49	0,18
3	0,0033	60	0,20	0,0033	57	0,19	0,0033	55	0,18
4	0,0030	75	0,23	0,0030	72	0,22	0,0030	70	0,21

Diese Werte stellen Mittel für den Bereich der Schnitte dar. In den Quartär-Rinnen ist die Transmissivität entsprechend der größeren Grundwassermächtigkeit höher, in der Nähe des Kontaktes zum Mesozoikum niedriger.

4.1.9. Grundwasserneubildung

4.1.9.1. Allgemeines

Für die Ernährung des quartären Aquifers kommen theoretisch die folgenden Quellen in Betracht: Versickernde Niederschläge sowie Einspeisung von Fluß-, Karst- und Seewasser.

Hiervon ist die Einspeisung von Wasser aus dem Skadar-See bei den derzeitigen Grundwasserverhältnissen unwahrscheinlich, weil der See bei jeder Grundwasser-

spiegelhöhe die lokale Vorflut für das Grundwasser der Ebene darstellt, und weil der Seeboden und die zeitweilig überschwemmte Uferzone von schlecht durchlässigen tonigen Schichten bedeckt sind.

4.1.9.2. Einspeisung von Karstwasser

Die Einspeisung von Karstwasser aus dem mesozoischen Rahmen des Projektgebietes südlich der Cijevna kann aufgrund der Grundwasserspiegelisohypsen bei HW, MW und NW (vgl. Abs. 4.1.3.) verneint werden, wenn man von der Einspeisung aus den Quellen von Mileš bei HW-Verhältnissen absieht. Hierbei handelt es sich nachgewiesenermaßen um Flußwasser der Cijevna (vgl. Abs. 4.1.2.3.), und der Umweg über den Karst ist für die Fragestellung ohne Bedeutung.

Karstwasser wird jedoch sicher im Norden der Ebene eingespeist, und zwar nordwestlich, nördlich und östlich von Titograd aus den Oberkreide-Kalken. Die mengenmäßige Bestimmung dieser zeitlich unterschiedlichen Einspeisung setzt hydrologische Untersuchungen in weit entfernten Einzugsgebieten voraus, die den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Folgende Fakten seien jedoch mitgeteilt:

Die Karstquellen von Mareza, 7 km nordwestlich von Titograd, werden zur Wasserversorgung von Titograd genutzt, nach MILOJEVIĆ (15) mit 175 l/s. Nach mündlicher Mitteilung von Herrn Dipl.-Ing. PEROVIĆ (Wasserwerk Titograd) liegt die Gesamtschüttung aller hier austretenden Quellen im Minimum (September) bei ca. 2 m³/s, im Maximum (November-März) bei ca. 10 m³/s. Das Überlaufwasser tritt in die Sitnica und in einen Bewässerungskanal über, die beide in die Morača münden. Da die Sitnica an der westlichen Grenze der Ebene gegen das Mesozoikum entlangfließt und bei NW-Verhältnissen in der Nähe der Brücke Tološko Polje in die Kalkberge versickert, der Bewässerungskanal aber abgedichtet ist, muß eine Karstwasser-Einspeisung von den Quellen Mareza in den quartären Aquifer des Projektgebietes als unwahrscheinlich gelten.

Karstwasser tritt unterirdisch und in Form von Karstquellen auch östlich von Titograd aus dem Berge Kokaricka Gora ins Quartär der Ebene über. Zum großen Teil speist es den periodischen Fluß Ribnica, der unterhalb des Pegels Titograd in die Morača mündet. Die Wasserführung der Ribnica in Titograd beträgt nach Mitteilung von Herrn Ing. RADULOVIĆ im Maximum etwa 30 m³/s; im Mittel aus 20 Messungen während der Jahre 1954-1964 wurden 3,7 m³/s und im Minimum 0 m³/s festgestellt. Es wäre also zunächst denkbar, daß Karstwasser nach Süden in den quartären Aquifer des Projektgebietes übertritt. Gerade für NW-Verhältnisse kann dies aber durch die Ergebnisse eines Färbungsversuches ausgeschlossen werden, bei dem das Färbungsmittel oberhalb des Pegels Trgaj in die Cijevna eingegeben wurde und in der Ribnica wieder zum Vorschein kam. Die Cijevna gibt hier also sowohl Wasser nach Nordwesten als auch nach Südwesten ab (vgl. Abs. 4.1.2.3.). Unter ihr liegt mithin eine Grundwasserscheide, die den Übertritt des Grundwassers aus dem nordöstlichen Teil der Ebene nach Süden verhindert.

Zusammenfassend ist zu schließen, daß bei NW-Verhältnissen die Einspeisung von Karstwasser in den quartären Aquifer des Projektgebietes keine bedeutende Rolle spielt, und es verbleibt allein Grundwasserneubildung aus versickernden Niederschlägen und Flußwasser.

4.1.9.3. Versickernde Niederschläge

Wie die Auswertung der Grundwasserspiegel-Ganglinien ergab (vgl. Abs. 4.1.5.), folgt der Grundwasserspiegel von April/Mai bis zum Tiefststand im September/Oktober ohne Zwischenanstiege der Kurve des natürlichen Abfalls. Daraus ist zu schlie-

Tab. 3: Daten zur Wasserbilanz des quartären Aquifers in der Zeta-Ebene

Monat	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
N (mm)	193,9	164,4	165,9	133,1	96,0	71,0	48,2	73,7	87,2	177,8	258,3	265,6
k	0,40	0,37	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
t (°C)	4,6	6,1	9,6	14,3	18,9	23,0	26,1	25,9	21,4	16,4	11,3	7,2
Hr (%)	64	69	83	63	61	57	50	49	58	66	86	74
$1 + \frac{70}{50} - Hr$												
IgA (cal/cm ² · Tag)	329	460	626	797	928	983	957	852	693	516	367	295
h (h/Tag)	3,9	4,4	5,2	6,4	8,0	9,5	10,9	10,6	8,5	6,7	3,4	2,9
H (h/Tag)	9,45	10,68	11,90	13,38	14,58	15,25	14,98	13,91	12,50	11,10	9,80	9,15
ETP _{TRUC} (mm)	18,3	27,8	53,1	86,5	117,2	146,5	163,2	153,1	111,8	70,1	33,5	21,1
D = N - ETP (mm)	175,6	136,6	112,8	46,6	-21,2	-75,5	-115,0	-79,4	-24,6	107,7	224,8	244,5
MQ Botun/ Moráča (m ³ /s)	244	218	215	254	205	103	35,5	14,0	20,1	98,4	288	336
MQ Titograd/ Moráča (m ³ /s)	232	210	209	240	185	104	44,2	24,4	30,6	103	283	331
Δ MQ Botun/ Titograd (m ³ /s)	12	8	6	14	10	-1	-8,7	-10,4	-10,5	-4,6	5	5
MQ Trgaj/ Čijevna (m ³ /s)	28,3	28,2	27,1	39,5	41,3	26,6	11,0	5,00	5,74	17,5	41,0	45,5
MINQ Trgaj/ Čijevna (m ³ /s)	17,1	11,3	17,9	29,2	33,3	19,3	7,50	3,20	3,68	6,80	22,4	25,4
MINW Mahala/ Čijevna (cm)	4	0	12	67	109	54	0	0	2	0	10	0

ßen, daß während dieser Zeit eine Grundwasserneubildung durch versickernde Niederschläge nicht erfolgt. Diese Feststellung deckt sich mit der Bestimmung der Differenz $D = N - ETP_{TURC}$, berechnet für die Meteorologische Station Titograd. Hierbei wurde der Zeitraum 1956/1968 zugrunde gelegt, weil hierfür auch Abflußmessungen an den Flußpegeln vorliegen. Eine Zusammenstellung dieser Daten zur Wasserbilanz findet sich auf Tab. 3.

In der Vegetationsperiode von Mai bis einschließlich September übersteigt die potentielle Evapotranspiration die Niederschläge, und eine Grundwasserneubildung aus Niederschlägen findet nur ausnahmsweise statt. Im April ist nur eine geringe Grundwasserneubildung aus Niederschlägen zu erwarten, in den Monaten des Winterhalbjahres ist sie aber beträchtlich, insbesondere im November, Dezember und Januar. Sie ist jedoch geringer als die Werte von D (Tab. 3), in denen auch der Beitrag zum oberirdischen Abfluß enthalten ist.

4.1.9.4. Versickerndes Flußwasser

Daß aus Morača und Cijevna in ihrem Verlauf durch die Zeta-Ebene Flußwasser ins Grundwasser versickert, zeigt sich besonders deutlich in anhaltenden Trockenzeiten, wo die Cijevna unterhalb der Straßenbrücke Titograd-Tuzi und die Morača oberhalb des Zusammenflusses mit der Zeta sowie unterhalb von Botun austrocknen. In Frage steht deshalb nicht die Grundwasserneubildung aus den Flüssen, sondern die je nach Wasserführung wechselnde Versickerungsmenge einerseits und deren Abflußrichtung andererseits.

Zur Beurteilung der Abflußmengen (Daten aus [18]) stehen die Morača-Pegel Titograd und Botun sowie der Cijevna-Pegel Trgaj zur Verfügung (vgl. Tab. 3). Der Vergleich der mittleren monatlichen Abflußmengen der Morača an den Pegeln Titograd und Botun zeigt während der Monate Juni bis einschließlich Oktober ein Defizit zwischen $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (Juni) und $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (September) an. Zwischen den beiden Pegeln mündet nur der Nebenfluß Ribnica ein (vgl. Abs. 4.1.9.2.). Die Wasserführung der Ribnica liegt in den Monaten August/September unter $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$, kann also vernachlässigt werden. Ebenso beträgt die Verdunstung von der freien Flußwasserfläche zwischen Titograd und Botun nur $< 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$, so daß zu schließen ist, daß in den Monaten August und September zwischen Titograd und Botun ca. $10 \text{ m}^3/\text{s}$ versickern. Die gleiche Menge errechnet sich aus der Differenz des Sommer-MNQ der Jahresreihe 1956/1968 (Titograd ca. $16 \text{ m}^3/\text{s}$, Botun ca. $6 \text{ m}^3/\text{s}$). Für die niedrigsten in Titograd und Botun festgestellten Abflußmengen des Meßzeitraumes ergeben sich etwas andere Werte:

Datum	30. 9. 1958	10. 11. 1965
Q Titograd	$10,8 \text{ m}^3/\text{s}$	$13,10 \text{ m}^3/\text{s}$
Q Botun	$4,8 \text{ m}^3/\text{s}$	$1,79 \text{ m}^3/\text{s}$
ΔQ	$6,0 \text{ m}^3/\text{s}$	$11,31 \text{ m}^3/\text{s}$

Zur Orientierung seien ferner genannt die bekannten NNQ längerer Meßperioden: Titograd (1951/1968): $7,30 \text{ m}^3/\text{s}$ (17. 12. 1953 und 1. 1. 1954), unterhalb Botun (langjährig): $0 \text{ m}^3/\text{s}$ (oft).

Somit kann die minimale Versickerungsmenge aus der Morača zwischen Titograd und Botun mit $6 \text{ m}^3/\text{s}$, die mittlere sommerliche Niedrigwasserversickerung mit $10 \text{ m}^3/\text{s}$ angegeben werden.

Aus den Grundwasserspiegelisohypsen (vgl. Fig. 11 und 13) kann indessen nicht abgeleitet werden, daß diese Versickerungsmengen zum unterirdischen Abfluß im quartären Aquifer südlich der Cijevna beitragen. Vielmehr ergibt sich, daß sie ihre

Vorflut im Karst am Westrand der Ebene finden und zum See Malo Blato abfließen. Das gleiche ist für die Versickerungsmengen aus der Morača zwischen Botun und Bištrica wahrscheinlich. Abflußmessungen liegen aus diesem Bereich nicht vor. Zwar nimmt das versickernde Flußwasser zum großen Teil seinen Weg über den quartären Aquifer, ehe es über den Karst zum Malo Blato abfließt, es ist aber nicht in der Lage, die westliche Abflußrichtung des Grundwassers umzukehren. Dies deutet auf die ausgezeichnete Durchlässigkeit der verkarsteten Karbonatgesteine im Vergleich zu den quartären Lockergesteinen hin. Die hohen Schüttungsmengen der vier größten Quellen am Ostufer des Malo Blato sind nur mit Beteiligung von Sickerwasser aus der Morača zu erklären. Die stärkste dieser Quellen ist die zweite von Norden. Ihre Schüttung wurde bei MW-Verhältnissen am 31. 7. 1970 nach einer längeren niederschlagsfreien Periode mit ca. $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$ bestimmt. Das Einzugsgebiet im Mesozoikum reicht hierfür selbst in niederschlagsreichen Perioden nicht im entferntesten aus; es würde nur eine Schüttung von ca. $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ gestatten.

Möglich ist jedoch, daß bei stärkeren Absenkungen des Grundwasserspiegels im quartären Aquifer des Projektgebietes eine Fließrichtungsumkehr nach Südosten eintritt und Sickerwasser aus der Morača erheblich zur Grundwasserneubildung im Projektgebiet beitragen kann. Bei Hochwasserführung der Morača ist das bereits ohne Grundwasserspiegelabsenkungen der Fall (s. u.).

Für die Cijevna ist ohne weiteres einsichtig, daß sie den quartären Aquifer des Projektgebietes speisen kann, fließt sie doch vom Eintritt in die Ebene beim Pegel Trgaj (Pegel-Null $+87,264 \text{ m NN}$) bis zur Mündung in die Morača (Pegel-Null Mahala $+16,97 \text{ m NN}$) hoch über dem Grundwasserspiegel. Zur Beurteilung der Versickerungsmengen stehen lediglich die Abflüsse am Pegel Trgaj (m^3/s) und die Wasserstände am Pegel Mahala (cm) zur Verfügung (vgl. Tab. 3). Die niedrigste in Trgaj gemessene Abflußmenge der Jahresreihe 1956/1968 beträgt $0,72 \text{ m}^3/\text{s}$ (10. 11. 1965), das Sommer-MNQ $2,45 \text{ m}^3/\text{s}$; in Mahala ist der entsprechende Abfluß jeweils $0 \text{ m}^3/\text{s}$: Die Cijevna versickert also völlig. Vom Pegel Mahala liegt nur eine Abflußmessung vor: Am 29. 12. 1955 wurde Q zu $3,3 \text{ m}^3/\text{s}$ bestimmt bei einem Wasserstand von $H = 106 \text{ cm}$. Am selben Tage wurde in Trgaj Q mit $20,8 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen; es versickern also 84%.

Aus diesen Beobachtungen und den Berechnungen für HW-Verhältnisse (s. u.) kann geschlossen werden, daß bei einem Abfluß in Trgaj von unter $10 \text{ m}^3/\text{s}$ alles Wasser der Cijevna versickert. Dies ist im Mittel der Monate Juli bis September der Fall. Aus den Niedrigwasserständen in Mahala ist ferner zu entnehmen, daß die Cijevna auch in den Monaten Oktober bis einschließlich März häufig versickert.

Es muß jedoch berücksichtigt werden, daß ein Teil des versickernden Wassers direkt unterhalb von Trgaj in den Karst abfließt. Wieviel und wann kann allerdings wegen der nur sporadischen Abflußmessungen der Quellen von Mileš nicht angegeben werden.

Unter Berücksichtigung aller Faktoren ist festzustellen, daß bei NW-Verhältnissen der quartäre Aquifer ganz überwiegend von Versickerungswässern der Cijevna ernährt wird, wobei die Einspeisungsmenge im Mittel mit etwa $2 \text{ m}^3/\text{s}$ angegeben werden kann, im Minimum mit weniger als $0,72 \text{ m}^3/\text{s}$.

Um die Versickerungsmengen aus den Flüssen auch bei HW-Verhältnissen zu erfassen, wurde der Versuch einer Bestimmung aus den stärksten Anstiegen des Grundwasserspiegels unternommen. Aus den gemessenen Anstiegen innerhalb von 10 Tagen wurde unter Annahme eines nutzbaren Porenraumes von $n_{\text{eff}} = 0,10, 0,15$ und $0,20$ auf die erforderliche Grundwasserneubildung geschlossen. Bei den Anstiegen konnte die Differenz zwischen Basis des Anstieges und verlängert gedachter Kurve des natürlichen Abfalls vernachlässigt werden, weil die meisten Werte ohne-

hin auf dem ansteigenden Ast des Grundwasserspiegels liegen, und bei dem Rest diese Differenz im Vergleich zum Gesamtanstieg unerheblich ist.

Zunächst wurde versucht, den Anstieg durch Grundwasserneubildung aus versickernden Niederschlägen zu erklären. Dies gelingt nur in den wenigsten Fällen, so daß alsdann das Versickerungswasser aus der Cijevna zur Erklärung der Fehlmenge herangezogen wurde. Bei Versickerungsmengen von maximal $16 \text{ m}^3/\text{s}$, entsprechend 20% der Cijevna-Wasserführung in Trgaj, kann der Anstieg in allen Brunnen des mittleren und östlichen Projektgebietes erklärt werden.

Es verbleiben jedoch Fehlbeträge bei allen Brunnen in einem Abstand von etwa $\leq 2 \text{ km}$ von der Morača. Es lag daher nahe, versickerndes Moračawasser zur Erklärung des Defizits heranzuziehen, was auch mit Versickerungsmengen bis maximal $13\text{--}14 \text{ m}^3/\text{s}$ bei $n_{eff} = 0,15$ gelang, entsprechend 23–24% der Wasserführung in Botun. Diese hohen Versickerungsmengen verlangen indessen eine bessere Permeabilität, als sie im Pumpversuch an Brunnen BA-1 festgestellt wurde. Einen Hinweis hierauf liefert der Pumpversuch Šušunja mit $k_f = 1,9 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ (vgl. Tab. 2).

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Grundwasserneubildung im Winterhalbjahr durch Niederschläge und versickerndes Flußwasser aus der Cijevna und im Westen des Projektgebietes aus der Morača erfolgt. Im Sommer findet Grundwasserneubildung nur aus den Flüssen statt, und zwar überwiegend aus der Cijevna, in Morača-Nähe auch aus der Morača.

4.1.10. Unterirdischer Abfluß

Der unterirdische Abfluß im quartären Aquifer wurde mittels der Kontinuitätsgleichung

$$Q = T \cdot B \cdot i$$

mit den in Abs. 4.1.4., 4.1.7. und 4.1.8.2. gefundenen Werten längs der Querschnitte 1–4 ermittelt, und zwar für hohen, mittleren und niedrigen Grundwasserspiegel:

HW (20. 12. 1952):

Schnitt	T (m^2/s)	B (m)	i (l)	Au (m^3/s)
1	0,16	12.640	$1,2 \cdot 10^{-3}$	2,43
2	0,20	11.930	$1,2 \cdot 10^{-3}$	2,86
3	0,20	12.140	$1,1 \cdot 10^{-3}$	2,67
4	0,23	11.580	$1,1 \cdot 10^{-3}$	2,93

MW (30. 6. 1956):

Schnitt	T (m^2/s)	B (m)	i (l)	Au (m^3/s)
1	0,15	12.640	$1,1 \cdot 10^{-3}$	2,09
2	0,19	11.930	$1,2 \cdot 10^{-3}$	2,72
3	0,19	12.140	$1,1 \cdot 10^{-3}$	2,54
4	0,22	11.580	$1,1 \cdot 10^{-3}$	2,80

NW (30. 12. 1953):

Schnitt	T (m^2/s)	B (m)	i (l)	Au (m^3/s)
1	0,14	12.640	$1,1 \cdot 10^{-3}$	1,95
2	0,18	11.930	$1,1 \cdot 10^{-3}$	2,36
3	0,18	12.140	$1,1 \cdot 10^{-3}$	2,40
4	0,21	11.580	$1,1 \cdot 10^{-3}$	2,67

Die Variationen von A_0 werden zeitlich durch die wechselnde Grundwassermächtigkeit bedingt, räumlich (Schnitte 1-4) durch Änderung der Permeabilität und der Durchflußquerschnitte.

Aus den relativ geringen Differenzen zwischen dem unterirdischen Abfluß bei Hoch- und Niedrigwasser, nämlich:

Schnitt 1: 0,48 m³/s
Schnitt 2: 0,50 m³/s
Schnitt 3: 0,27 m³/s
Schnitt 4: 0,26 m³/s

kann geschlossen werden, daß die viel höhere Differenz der Versickerungsmengen aus den Flüssen zwischen HW und NW nicht vom quartären Aquifer aufgenommen werden kann, sondern in den Karst abfließen muß.

Weiterhin folgt aus dem sprunghaften Abfall der A_0 -Differenzen zwischen den Schnitten 2 und 3 sowie aus dem hier zu verzeichnenden Abfall von A_0 bei MW und HW, daß zwischen diesen Schnitten die Abgabe von Grundwasser in den Karst am größten ist. Dies steht in Einklang mit den Grundwasserspiegelisohypsen, denn im genannten Bereich liegen die Absenkungszonen von Vuksan Lekić, Vladnja und z. T. von Mahala.

Insgesamt bestätigten die berechneten Abflußmengen die überragende Rolle der Versickerung aus der Cijevna bei der Ernährung des quartären Aquifers im Projektgebiet.

Eine gewisse Kontrolle der oben gefundenen Werte des unterirdischen Abflusses wäre möglich durch regelmäßige Abflußbeobachtungen an den zum Skadar-See entwässernden Fließchen Plavnica, Zetica, Gostiljska, Pjavnik, Svinaš, Mrka und Urelja, die ja Vorfluter für einen großen Teil des quartären Aquifers sind. Solche Messungen würden eine Vorstellung über Mindestwerte von A_0 geben, d. h. ohne Berücksichtigung der Abflüsse in den Karst.

Während einer Begehung bei MW-Verhältnissen Ende Juli 1970 wurde der Abfluß der Plavnica an der alten Bahnstation Plavnica zu ca. 1 m³/s und der Gostiljska nebst benachbarter Stauquellen westlich Gostilje zu ca. 1 m³/s bestimmt. Die anderen Fließchen waren trocken. Unter Berücksichtigung der Grundwasserabflüsse in den Karst (z. B. Bijelo Polje) steht dieser oberirdische Abfluß von ca. 2 m³/s im Einklang mit dem unterirdischen Mittelwasserabfluß von 2,80 m³/s (Schnitt 4).

Schließlich besteht die Möglichkeit, den unterirdischen Abfluß im Quartär der Zeta-Ebene aus einer hydrologischen Bilanz für das Einzugsgebiet des Skadar-Sees zu bestimmen. Diese Untersuchung geht über den Rahmen dieser Arbeit hinaus wegen der Größe des zu untersuchenden Einzugsgebietes, welches sich auch auf die albanischen Berge erstreckt. Die vorliegenden Meßwerte reichen nur zur folgenden groben Schätzung aus:

Oberirdische Zuflüsse zum Skadar-See:

Morača bei Botun (1956/1968)	MQ ca. 169 m ³ /s
Cijevna bei Trgaj (1956/1968)	MQ ca. 27 m ³ /s
Šitnica	MQ ca. 12 m ³ /s
Plavnica und Gostiljska	MQ ca. 2 m ³ /s
Karatuna	MQ ca. 7 m ³ /s
Crnojevića Rijeka	MQ ca. 7 m ³ /s
Crnica	MQ ca. 5 m ³ /s
Summe	MQ ca. 229 m ³ /s

Der Abfluß des Skadar-Sees bei Skadar hat ein MQ von ca. 300 m³/s. Es verbleibt also zwischen dem MQ der genannten oberirdischen Zuflüsse und des See-Abflusses eine Differenz von 71 m³/s, worin noch die oberirdischen Zuflüsse des Skadar-Sees

aus Albanien enthalten sind (größter Zufluß: Vraka). Der Rest sind Grundwasserzuflüsse, die sich über die ganze Küste und die mesozoischen Aufragungen innerhalb des Sees verteilen. Ihre untere Begrenzung bildet das NNQ des See-Abflusses von $45 \text{ m}^3/\text{s}$.

Bei der räumlichen Aufteilung dieser Grundwasserzuflüsse zum See kann man große Fehler begehen, da die Einspeisungszonen und ihre Permeabilitätsverhältnisse größtenteils unbekannt sind. Als sicher kann jedoch angenommen werden, daß die Hauptmenge der Grundwasserzuflüsse über die am besten durchlässigen Gesteine erfolgt, nämlich die verkarsteten Kalke und Dolomite, und nicht über Porengrundwasserleiter.

4.1.11. Grundwasserhöflichkeit

Zur Beurteilung der Grundwasserhöflichkeit im Projektgebiet stehen nur die Ergebnisse des Pumpversuches an Brunnen BA-1 zur Verfügung (vgl. Tab. 2).

Die Berechnung der optimal gewinnbaren Wassermenge und der zugehörigen op-

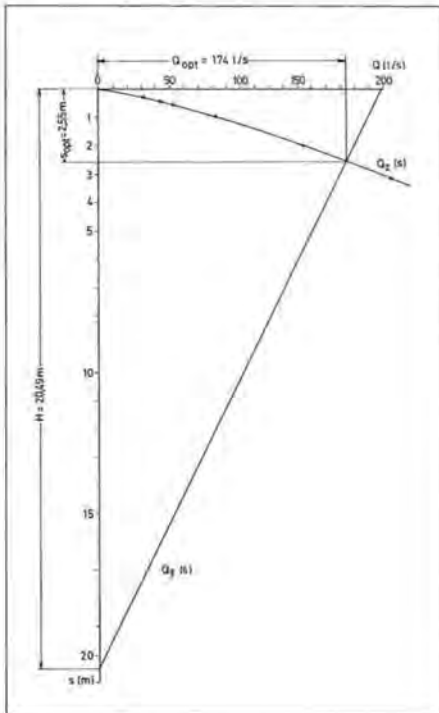


Fig. 14: Bestimmung der optimal gewinnbaren Wassermenge (Brunnen BA-1).

timalen Absenkung erfolgt nach den Gleichungen für den Wasserzulauf aus dem Grundwasserleiter:

$$Qz = \pi \cdot kt \cdot \frac{H^2 - h^2}{\ln \frac{R}{r}}$$

und für das Fassungsvermögen des Brunnens:

$$Q_F = \frac{2\pi}{15} \cdot r \cdot \sqrt{kt} \cdot h.$$

Es wurde zunächst der theoretische Wasserzulauf für die Absenkungsstufen während des Pumpversuches bestimmt und mit den tatsächlichen Fördermengen verglichen. Hierbei liegen die tatsächlichen Fördermengen um 13% höher als die berechneten, weshalb die letzteren bei der weiteren Berechnung auf 113% zu vergrößern sind. Nun erfolgte die Berechnung für höhere Absenkungsbeträge bis zum Schnitt mit der Q_F-Kurve. Aus der graphischen Auftragung der Q_Z- und der Q_F-Kurve (vgl. Fig. 14) ergibt sich im Schnittpunkt:

$$Q_{opt} = 174 \text{ l/s}$$

$$s_{opt} = 2,55 \text{ m}$$

Der zugehörige Radius der Absenkung nach SICHARDT ist:

$$R = 3000 \cdot 2,55 \cdot \sqrt{0,0037}$$

$$R = 523 \text{ m}$$

Es ist natürlich problematisch, aus dem gemessenen Verlauf der Q-s-Kurve bis ca. 50 l/s auf den weiteren Verlauf bis 175 l/s zu schließen. Eindeutige Ergebnisse können nur Pumpversuche mit entsprechend leistungsfähigen Pumpen, Wasserzählern und Ableitungssystemen liefern. Aus diesem Grunde wird für die Grundwasserhöflichkeit lediglich mit einem Q von 150 l/s gerechnet.

4.1.12. Grundwassergüte

Zur Beurteilung der chemischen Eigenschaften des Grundwassers liegen aus dem Projektgebiet vor:

- Analysenreihe am 24./25. 4. 1970 (hoher Grundwasserstand) von Grundwassern aus Schachtbrunnen (vgl. Tab. 4),
- Analysenwerte der Brunnenwässer BA-1 und BA-2, entnommen während der Pumpversuche 1967 (hoher Grundwasserstand).

Bis auf BA-2 sind die Analysen infolge unvollständiger Bestimmung der Inhaltsstoffe nicht in mval/l aufrechenbar. Sicher ist jedoch, daß es sich mit Ausnahme von BA-2 um Kalzium-Magnesium-Hydrogenkarbonatwasser handelt. Brunnen BA-2 liefert dagegen ein Kalzium-Hydrogenkarbonat-Chloridwasser, wobei der Magnesiumgehalt knapp unter und der Chloridgehalt knapp über der Deklarationsgrenze von 20 mval-% liegen.

Die untersuchten Wässer sind mittelhart bis auf die Brunnenwässer Vranj, Vladnja und Čemovsko Polje rings um den Inselberg Vranjska Gora, die als ziemlich hart zu bezeichnen sind. Alle untersuchten Wässer können aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung zur Bewässerung verwendet werden.

Unbekannt ist indessen der Chemismus der tieferen Grundwässer im Quartär. Es ist anzunehmen, daß sie höher mineralisiert sind aus folgenden Gründen: Mit der

Tiefe steigt die Lösungs-fähigkeit der Grundwasser infolge der höheren Temperaturen. Die längeren Kontaktzeiten bei stark herabgesetzter Fließgeschwindigkeit gestatten eine stärkere Beladung mit Ionen. Schließlich sind Austauschvorgänge möglich zwischen dem tieferen Grundwasser im Quartär und salinar beeinflussten Wässern aus dem unterlagernden Neogen.

Einen Hinweis hierauf liefern die Analysen der Wässer, die während des Pumpversuches aus Brunnen BA-2 des Aluminiumkombinates entnommen wurden:

Entnahmedatum	3. 3. 1967	4. 3. 1967	4. 3. 1967
Q (l/s)	102,90	127,50	166,30
Abdampf-Rückstand (mg/l)	220,0	232,0	254,0
Cl ⁻ (mg/l)	10,0	12,0	30,0
Ca ²⁺ (mg/l)	52,8	60,8	60,8
Mg ²⁺ (mg/l)	6,9	4,7	9,5
GH (° dH)	8,9	9,6	10,7

Besonders der Anstieg der Chloride bei stärkerer Absenkung und Entnahme ist bezeichnend, weil diese Konzentrationen nicht nur aus dem Rahmen der Quartär- und Karstwässer, sondern auch des Morača-Wassers fallen. Somit werden neue Tiefbohrungen auch zur hydrochemischen Erkundung tieferer Quartärwässer empfohlen.

Gegenüber dem Karstwasser weist das Grundwasser im quartären Aquifer keine bedeutenden chemischen Unterschiede auf. Daß Sulfat und Chlorid im Quartärgrundwasser stärker vertreten sind als im Karstwasser, ist wohl als anthropogener Einfluß in der Ebene zu erklären. Der Chemismus der Wässer von Morača und Skadar-See ist ebenfalls nicht grundsätzlich verschieden (19), wohl liegen Gesamt- und Karbonathärte etwas niedriger als bei den Quartärgrundwässern. Auch Fluß- und Seewasser sind vom chemischen Standpunkt aus für Bewässerungszwecke geeignet.

Tab. 4: Chemische Grundwasseranalysen aus Schachtbrunnen der Zeta-Ebene (Analysator: L. ŽARKO; Analysendatum: 24./25. 4. 1970).

Ort/Brunnen	HCO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Karbonat- härte ° dH	Gesamt- härte ° dH	pH
Botun/26	195,2	10,6	4,0	30,0	10,7	8,9	9,0	7,8
Cijevna/20	195,3	10,6	1,5	32,0	14,0	9,0	10,1	7,8
Goričani/12	195,3	10,6	3,0	33,0	11,9	8,9	9,5	7,8
Bijelo Polje/15	219,6	10,6	4,0	32,0	18,0	10,0	10,6	7,4
Čemovsko Polje/41	207,4	10,6	2,0	30,6	18,0	9,5	11,2	7,6
Daj-Babe/15	329,4	10,6	1,5	42,0	18,6	14,1	14,5	7,7
Kuće Rakica/19	183,0	14,2	4,0	24,0	11,7	8,4	10,6	7,8
Tuzi/18	183,2	10,6	2,0	26,0	10,4	8,5	9,5	7,8
Dušiči/19	183,1	10,6	2,0	22,0	10,2	8,4	9,5	7,6
Vranj/2	317,3	10,6	3,5	40,0	12,0	14,5	17,4	7,6
Vladnje/6	231,7	10,6	4,0	40,0	14,0	10,5	12,9	7,6
Ogledno Polje/30	219,6	14,2	3,0	30,0	15,0	10,0	12,8	7,5
Golubovci/15	219,5	14,0	2,0	34,0	14,4	10,0	11,2	7,8
Gošići/94	244,0	16,5	4,0	44,0	11,4	11,2	11,4	7,5

4.2. Folgerungen für das Bewässerungsprojekt

4.2.1. Nutzbarkeit des Grundwassers

4.2.1.1. Grundwasserdargebot

Für das Bewässerungsprojekt werden Sommer-MNQ-Verhältnisse zugrunde gelegt, während derer der Wasserbedarf der Kulturen am größten ist. Das Sommer-MNQ der Cijevna am Pegel Trgaj (Jahresreihe 1956/1968) beträgt 2,45 m³/s, wovon

ein Teil noch innerhalb der verkarsteten Karbonatgesteine am östlichen Rand der Ebene versickert (vgl. Abs. 4.1.2.3.). Aus der Berechnung nach der Kontinuitätsgleichung (vgl. Abs. 4.1.10.) ergibt sich bei niedrigem Grundwasserstand als Mittel aus den vier Schnitten ein unterirdischer Niedrigwasserabfluß von 2,35 m³/s.

Auf der Grundlage dieser Werte kann im Projektgebiet mit einem mittleren Grundwasserdargebot bei sommerlichen Niedrigwasserverhältnissen von rund 2 m³/s gerechnet werden.

4.2.1.2. Bewässerbare Flächen

Welche Flächen damit im Rahmen der klimatischen Voraussetzungen bewässert werden können, hängt für jede Bewässerungseinheit vom spezifischen Wasserbedarf der Kulturen sowie von Durchlässigkeit und Retentionsvermögen der Böden ab. Da hierüber noch keine detaillierten Angaben vorliegen, können zunächst nur Schätzungen der bewässerbaren Flächen auf der Grundlage des theoretischen Wasserbedarfes gegeben werden (vgl. Abs. 3.2.).

Nimmt man den Bewässerungsbedarf mit 3730 m³/ha je Vegetationsperiode an und die Wasserverluste bei sorgfältiger Bedienung und Überwachung mit ca. 10%, so verteilt sich der Bruttowasserbedarf wie folgt über die Monate:

Monat	Bruttowasserbedarf (m ³ /ha)	Bruttowasserbedarf bei 24 h Pumpzeit (l/s · ha)	Bewässerbare Fläche (ha)
Mai	297	0,110	18.400
Juni	1045	0,404	4.950
Juli	1518	0,567	3.530
August	1144	0,428	4.670
September	99	0,0382	52.400
Summe	4103		

Man kann also schließen, daß in den Monaten mit dem höchsten Wasserbedarf, Juni – Juli – August, ca. 4000 ha bewässert werden können. Dieser Wert stellt die Größenordnung der bewässerbaren Fläche dar und muß entsprechend den örtlich verschiedenen Bodenverhältnissen und Anbauplänen variiert werden.

4.2.2. Nutzungsweise

4.2.2.1. Art, Anzahl und Leistung der Brunnen

Ausgehend von den guten Erfahrungen mit den Brunnen BA-1 (11) und BA-2 (12) wird eine Grundwasserförderung durch unvollkommene Vertikalbohrbrunnen vorgeschlagen.

Um das Grundwasserdargebot von 2 m³/s in sechzehnständiger Pumpzeit pro Tag fördern zu können, sind Brunnenleistungen von insgesamt 3000 l/s erforderlich. Nach den Ergebnissen des Abs. 4.1.11. sind Brunneneinzelleistungen von 150 l/s zu erwarten, so daß das Grundwasserdargebot mit 20 Brunnen gefördert werden kann.

4.2.2.2. Lage der Brunnen

Die Lage dieser Brunnen ist Fig. 15 zu entnehmen. Sie wurde auf folgende Weise bestimmt: Die Grenzen des Gebietes, in dem die Brunnen anzuordnen sind, werden gegeben im Süden durch die Höhenlinie + 9 m NN (ungefähre Grenze des zeitweilig überschwemmten Uferbereiches), im Osten und Westen durch die 25-m-Linie der Grundwassermächtigkeit bei niedrigem Wasserspiegel und im Norden durch die 25-m-Flurabstandslinie des Grundwassers bei niedrigem Wasserspiegel.

Auf der verbleibenden Fläche wurden zunächst die Brunnen von vier festgelegten Pilotprojekten eingetragen: Brunnen 1 ist der bestehende Brunnen BA-1 auf dem Versuchsfeld des Agrokombinates, dessen Kapazität z. Z. nicht ausgelastet ist; die Brunnen 2, 3 und 4 wurden jeweils etwa im Zentrum der betreffenden Pilotgebiete angeordnet. Alle projektierten Brunnen liegen an befahrbaren Wegen, die Aufstellung eines Rotarybohrgerätes ist möglich und die Beschaffung von Bohrwasser aus nahe gelegenen Schachtbrunnen unproblematisch.

Von den Brunnen 1 bis 4 ausgehend, wurde sodann die Mittellinie für die Entnahmebreite B entgegen der Grundwasserfließrichtung entsprechend den Niedrigwasser-Isopyhsen eingetragen. Die Entnahmebreite wurde für Fördermengen bis 52 l/s aus dem Pumpversuch an Brunnen BA-1 abgeleitet nach den Formeln:

$$\ln x_0 = \frac{\pi \cdot kr \cdot (H-h) \cdot (H+h)}{Q} + \ln x$$

und

$$B = 2\pi \cdot x_0$$

Hierin bedeuten:

x_0 = Wirkungsradius (m)

H = erschlossene Grundwassermächtigkeit im Förderbrunnen (m)

h = abgesenkter Grundwasserstand im Piezometer (m)

x = Abstand des Piezometers vom Förderbrunnen (m)

Q = Fördermenge (m³/s)

B = Entnahmebreite (m)

Zur Berechnung der Entnahmebreiten bei höheren Fördermengen wurde zunächst die durchschnittliche Einheitsergiebigkeit q_s aus den Pumpversuchsdaten bestimmt nach der Formel:

$$q_s = \frac{1}{3} \left(\frac{Q_1}{B_1} + \frac{Q_2}{B_2} + \frac{Q_3}{B_3} \right)$$

$$q_s = \frac{1}{3} \left(\frac{0,031}{278,2} + \frac{0,045}{322,2} + \frac{0,052}{415,7} \right)$$

$$q_s = 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

und daraus die Entnahmebreite für die auf 24-h-Pumpzeit umgerechnete Brunnenleistung (100 l/s) errechnet:

$$B = \frac{Q}{q_s}$$

$$B = \frac{0,10}{1,26 \cdot 10^{-4}}$$

$$B = 794 \text{ m}$$

Läßt man eine Überschneidung der Entnahmebreiten von je $\frac{1}{3}$ im randlichen Bereich geringer Absenkungen zu, so ergibt sich die reduzierte Entnahmebreite zu 530 m.

Dieser Entnahmebreite pro Brunnen stehen folgende Breiten des Durchflußquerschnittes im quartären Aquifer oberstrom gegenüber:

- Zwischen Cijevna und der Grundwasserscheide, welche die Absenkungszone von Mahala nach Südosten begrenzt: 3560 m,

- zwischen dieser Grundwasserscheide und dem Inselberg Vranjska Gora: 2980 m,
 - zwischen dem Hügel nordöstlich Vranjska Gora und dem östlichen Rand der Ebene: 2870 m,
- zusammen also 9410 m.

Es können mithin 18 Brunnen angeordnet werden, und zwar 5 Brunnen südlich der Linie Vranjska Gora – Rand der Ebene (vgl. Fig. 15), 10 Brunnen zwischen Vranjska Gora und der oben erwähnten Wasserscheide und 3 Brunnen zwischen dieser Wasserscheide und der Cijevna. Die zwei restlichen Brunnen, die noch zur Abschöpfung des Grundwasserdargebotes erforderlich sind, wurden in Morača-Nähe plaziert, weil hier bei Absenkung des Grundwasserspiegels am ehesten eine Fließrichtungsumkehr und eine zusätzliche Einspeisung von Uferfiltrat zu erwarten sind.

Soweit möglich, wurden bei der Anordnung der Brunnen die Bereiche mit dem geringsten Flurabstand des Grundwasserspiegels bevorzugt, um Bohr- und Betriebskosten gering zu halten.

4.2.2.3. Tiefe und Ausbau der Brunnen

Alle Brunnen sollten eine Grundwassermächtigkeit von 25 m bei NW-Verhältnissen erschließen. Im einzelnen sind daher folgende Bohrtiefen geplant:

Brunnen	Tiefe	Brunnen	Tiefe	Brunnen	Tiefe	Brunnen	Tiefe
1	vorhanden	6	36 m	11	34 m	16	33 m
2	32 m	7	32 m	12	32 m	17	32 m
3	37 m	8	41 m	13	33 m	18	33 m
4	40 m	9	34 m	14	40 m	19	33 m
5	33 m	10	43 m	15	40 m	20	32 m

Hinsichtlich der Bohr- und Filterdurchmesser kann man sich an dem leistungsstarken Brunnen BA-2 orientieren (maximale Fördermenge im Pumpversuch: 166,3 l/s), wo 750 mm Bohr- und 600 mm Filterdurchmesser verwendet wurden. Tatsächlich erbringen nach H. SCHNEIDER (17) Brunnen von 600 mm Durchmesser bereits 94% der Leistung von Brunnen mit 1000 mm Durchmesser. Bei einer Dauerleistung von 150 l/s sind die notwendigen Bedingungen für die Eintrittsgeschwindigkeiten erfüllt.

Der Ausbau der Brunnen ist wie folgt vorgesehen:

0,5 m Kiesunterschüttung,

1,5 m Sunpfrohr mit Bodenkappe,

Filterrohre NW 600 bis 5–6 m unterhalb des Ruhewasserspiegels bei niedrigem Grundwasserstand,

5–6 m Aufsatzrohre unterhalb des Ruhewasserspiegels zur Aufnahme der Unterwasserpumpe bei der ermittelten optimalen Absenkung,

Aufsatzrohre NW 600 bis zur Geländeoberfläche.

Der Ringraum zwischen Filterrohren und Bohrlochwand kann mit einer einfachen Filterkiesschüttung verfüllt werden, deren Korngrößen-Abstufung dem erbohrten Gesteinsmaterial anzupassen sind. Oberhalb der Filterstrecke kann mit sauberem Bohrgut verfüllt werden. Eine Tondichtung ist überflüssig, da sie infolge der guten Permeabilität der Schichten über dem Grundwasserspiegel keine wirkungsvolle Abdichtung gegen verunreinigte Oberflächenwässer darstellen würde.

4.2.3. Voraussichtliche Auswirkungen der projektierten Grundwasserentnahmen

4.2.3.1. Auswirkungen auf die Grundwasserernährung

Wie in Abs. 4.1.9. dargestellt, erfolgt die Grundwasserneubildung während der Vegetationsperiode durch versickerndes Flußwasser aus der Cijevna, daneben aus der

Morača. Entnimmt man im Projektgebiet den unterirdischen Niedrigwasserabfluß, so sind zeitweilige Grundwasserspiegelabsenkungen die Folge.

Die Nachlieferung von versickerndem Flußwasser kann dadurch nicht erhöht werden, da die Flüsse über dem Grundwasserspiegel fließen und die Versickerungsmengen durch die Wasserführung der Flüsse und die Permeabilität des Flußbettes begrenzt werden. Mithin wird die Grundwasserneubildung durch die projektierten Entnahmen voraussichtlich nicht verändert werden.

4.2.3.2. Auswirkungen auf die Höhe des Grundwasserspiegels

Bei den vorgesehenen Grundwasserentnahmen von 150 l/s pro Brunnen treten Absenkungen der Brunnenwasserspiegel von ca. 2 m auf, mit Überlagerung durch den Einfluß benachbarter Brunnen möglicherweise 3 m. Die Reichweite der Absenkung nach SICHARDT beträgt hierbei über 500 m. Dies kann bei dem flachen natürlichen Grundwasserspiegelgefälle von 1‰ bereits zu Änderungen der Grundwasserfließrichtung führen. Die Bereiche der Absenkungszonen von Mahala, Bijelo Polje, Vladnja und Vuksan Lekić, deren Vorflut heute im Karst liegt, können dann teilweise zu den Brunnen hin entwässern. Da mit stärkeren Absenkungen eine Vergrößerung der Brunneneinzugsgebiete und des Grundwasserspiegelgefälles einhergehen, werden sich auch die Absenkungen in Grenzen halten.

Weiter haben künstliche Absenkungen zur Folge, daß die bestehenden Schachtbrunnen beeinträchtigt werden, welche der Trinkwasserversorgung und der Bewässerung dienen (vgl. Fig. 16). Diese Schachtbrunnen reichen meist 1-2 m unter den niedrigsten Grundwasserspiegel. In der Nähe der Bohrbrunnen werden sie trockenfallen, oder der Wasserstand im Brunnen wird so reduziert werden, daß Grundwasserentnahmen kaum noch möglich sind. Im Gebiet Mahala – Golubovci – Mataguži – Vranj – Kotrabudan wird die Grundwasserhebung aus den Schachtbrunnen auch



Fig. 16: Flacher Schachtbrunnen zur Furchen-Bewässerung (Foto: F. ISSERINKHUISEN).

durch die kritische Saughöhe der Pumpen begrenzt, so daß bei Grundwasserspiegelabsenkungen nicht nur Vertiefung der Schachtbrunnen, sondern auch Tieferlegen der Pumpenfundamente erforderlich würde.

Aus diesen Gründen sollte innerhalb der durch einen Bohrbrunnen bewässerten Fläche der gesamte, gegenüber dem Bewässerungsbedarf unbedeutende Trink- und Brauchwasserbedarf aus diesem Brunnen gedeckt werden. Eine Wasserförderung gleichzeitig aus tiefen Bohrbrunnen und flachen Schachtbrunnen in demselben Gebiet ist auf die Dauer nicht möglich. Für die Bevölkerung würde die Trinkwasserversorgung aus zentralen Bohrbrunnen eine große Verbesserung in hygienischer Hinsicht bedeuten, denn die bestehenden Schachtbrunnen liegen meist im überbauten Bereich in unmittelbarer Nachbarschaft von Verunreinigungsquellen.

4.2.4. Möglichkeiten zur Erhöhung des Grundwasserdargebotes

Da die Grundwasserentnahmen zur Bewässerung während der Vegetationsperiode auf dem fallenden Ast der Grundwasserspiegelganglinie liegen und eine Erhöhung der Grundwasserneubildung bei größeren Spiegelabsenkungen nicht eintritt, wird der Grundwasserspiegel bei Entnahmen zwangsläufig stärker fallen als ohne Entnahmen. Es ist zu untersuchen, ob diese Mehrabsenkung wettgemacht werden kann in den Wintermonaten, um zunehmende Grundwasserspiegelabsenkungen zu verhindern.

Die Cijevna ist in ihrem Verlauf durch die Ebene ein periodischer Fluß. Eine ständige Wasserführung am Pegel Mahala ist infolge des Schneeregimes nur in den Monaten April, Mai und Juni gegeben. Die höchsten Wasserstände treten infolge von Starkregen in den Monaten Oktober bis März auf. Hierbei fließen große Wassermengen ungenutzt in die Morača und den Skadar-See ab, die zur Grundwasseranreicherung verwendet werden könnten.

Daher wird vorgeschlagen, im Flußbett der Cijevna, welches über weite Strecken aus undurchlässigen, karbonatisch zementierten Konglomeraten besteht (vgl. Fig. 17), die Permeabilität künstlich zu vergrößern. Da die Zementation oft nur eine relativ geringmächtige Schicht an der Oberfläche erfaßt, sollte es möglich sein, mit Flachbohrungen, in die Sprengsätze eingebracht werden, das Cijevnabett streckenweise durch Sprengungen aufzulockern, um eine größere Versickerung zu bewirken. Diese könnte in den Monaten der ständigen Wasserführung, April bis Juni, die Grundwasserspiegelabsenkungen teilweise kompensieren und in den Wintermonaten Restabsenkungen der vergangenen Vegetationsperiode wieder auffüllen.

Die Frage, wo solche Versickerungsstrecken anzuordnen sind, ist nicht leicht zu beantworten. Erzielt man z. B. einen guten Versickerungseffekt schon kurz nach Eintritt der Cijevna in die Ebene, so wird das dem quartären Aquifer zwischen Vranjska Gora und dem östlichen Rand der Ebene zugute kommen, nicht aber dem Gebiet zwischen Morača und Vranjska Gora. Aus diesem Grunde sollte mit den Sprengungen zunächst in der Nähe der Eisenbahnbrücke bei Mahala begonnen und der Effekt auf den Grundwasserspiegel beobachtet werden. Sollten sich nur geringfügige Grundwasserspiegel-Erhöhungen ergeben, so können schrittweise oberstrom weitere Auflockerungsstrecken in der Nähe von Kuće Rakica vorgesehen werden. Während der Monate August und September ist die Cijevna unterhalb der Straßenbrücke Tito-grad-Tuzi ohnehin meist trocken, so daß die Versickerung dann durch die Auflockerungsstrecken nicht beeinflußt werden kann. Die vorhergehende Austrocknung findet zwar schneller statt als ohne Auflockerungsstrecken, der unterirdische Niedrigwasserabfluß kann indessen nicht beeinflußt werden, weil er auch in den Monaten August und September vorhanden ist, wenn die Cijevna im Bereich der vorgesehenen Auflockerungsstrecken trocken liegt.



Fig. 17: Canyon der Cijevna in karbonatisch zementierten Konglomeraten (Foto: F. IJSERINKHUISEN).

Auf keinen Fall sollte das Flußbett der Cijevna zu Beginn der Bewässerungsmaßnahmen an verschiedenen Stellen extensiv aufgelockert werden, sondern nur koordiniert mit der schrittweisen Einrichtung neuer Brunnen entsprechend den Veränderungen der Grundwasserspiegelhöhen.

4.2.5. Ausblick

Durch die vorliegende Arbeit konnte der ökonomisch aus Grundwasser (ca. $2 \text{ m}^3/\text{s}$) bewässerbare Teil der Zeta-Ebene abgegrenzt werden. Er liegt zwischen der Isohypse + 9 m NN und der 25-m-Flurabstandslinie des Grundwasserspiegels bei NW mit geringen Erweiterungsmöglichkeiten nach Norden. Er entspricht der Zone A auf Fig. 1.

Für die Zonen B 1 und B 2 ist eine Bewässerung mit Flußwasser der Morača (ca. $3 \text{ m}^3/\text{s}$) vorgesehen. Von einer Haltung unterhalb Titograds soll ein offener Bewässerungskanal entlang der Isohypse + 50 m NN geführt werden. Eine Bewässerung aus der Cijevna scheidet aus, da das NNQ mit $0,72 \text{ m}^3/\text{s}$ zu gering ist und außerdem eine ungünstige Beeinflussung des Grundwasserspiegels zu erwarten ist.

Bei der Nutzbarmachung der zeitweilig überschwemmten Uferzone des Skadar-Sees erscheint eine Kooperation mit Albanien notwendig.

Danksagung

Für fachlichen Rat und fördernde Diskussionen danke ich den Herren: Dipl.-Ing. BOHM (OECD, Paris), Dipl.-Ing. CHARPIN (SATEC, Paris), Dipl.-Ing. COUGET (SATEC, Paris), Dipl.-Ing. DRAGOVIĆ (Wasserwirtschaftsinstitut Zeta, Titograd), Dipl.-Ing. FLACH (AHT, Essen), Prof. Dr. GRIMM (Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie der Universität München), Dr. HOFFMANN (AHT, Essen), Dipl.-Ing. LISERINKHUSEN (AHT, Essen), Dipl.-Ing. IVEZIC (Hydrometeorologischer Dienst, Titograd), Dipl.-Ing. KABANOFF (FAO, Rom), Dipl.-Ing. PEROVIĆ (Geozavod, Titograd), Prof. DE RAVEL D'ESCLAPON (Institut für Mediterrane Kulturen, Antibes), Dipl.-Ing. SORDOLLET (SATEC, Paris). Meiner hilfsbereiten Dolmetscherin, Fräulein Gordana LEKOVIĆ, danke ich für die präzise Übersetzung der Fachausdrücke.

Zusammenfassung

Im überwiegend gebirgigen Montenegro ist die Karst-Depression der Zeta-Ebene von besonderer Bedeutung für die Landwirtschaft. Bei einer Breite von 10 bis 20 km erstreckt sie sich über 20 km zwischen Titograd und dem Skadar-See dicht an der jugoslawisch-albanischen Grenze. Für die Bewässerung dieser Ebene wurden im Rahmen eines OECD-Programms der Technischen Hilfe die wasserwirtschaftlichen Grundlagen untersucht.

Während die bis zu 100 m mächtige quartäre Füllung der Ebene aus karbonatischen Sanden, Kiesen und Steinen besteht, wird der Rahmen der Ebene aus verkarsteten mesozoischen Kalken und Dolomiten aufgebaut, die infolge eines Paläoreliefs auch in einigen Inselbergen innerhalb der Ebene zutage treten.

Die quartären Lockergesteine stellen mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $3 \cdot 10^{-3}$ bis 10^{-3} m/s, einer mittleren Grundwassermächtigkeit von 50 m und einem Grundwasserspiegelgefälle von 1‰ einen guten Grundwasserleiter dar, in dem Brunnenleistungen von 150 l/s möglich sind. Chemisch handelt es sich um mittelharte bis ziemlich harte Kalzium-Magnesium-Hydrogenkarbonatwässer, die für Bewässerungszwecke geeignet sind.

Die mesozoischen Festgesteine der Umrahmung sind lokal durch ausgezeichnete Wasserwegsamkeit in Karsthohlräumen gekennzeichnet, während benachbarte Gebirgsbereiche praktisch grundwasserfrei sind.

Die Ernährung des quartären Aquifers erfolgt ganzjährig durch versickerndes Flußwasser aus der Cijevna, daneben aus der Morača. Im Winterhalbjahr kommt eine Grundwasserneubildung durch versickernde Niederschläge und Karstwasserzuflüsse aus dem mesozoischen Rahmen hinzu.

Seine Vorflut findet dieses Grundwasser im Skadar-See, und zwar über kleine Flüsse direkt nach Süden, außerdem nach Südosten und Südwesten auf dem Umweg über den Karst des gebirgigen Rahmens.

Da für die Zeta-Ebene ausgeprägte winterliche Naßzeiten, sommerliche Trockenzeiten und jährliche Schwankungen des Grundwasserspiegels um 3–6 m kennzeichnend sind, ferner die projektierten Grundwasserentnahmen im Sommer während fallenden Grundwasserspiegels erfolgen sollen, wird die nutzbare Grundwassermenge durch den mittleren unterirdischen Sommer-Niedrigwasserabfluß von ca. 2 m³/s begrenzt.

Zur Förderung dieser Wassermenge sind 20 Brunnen von 30 bis 40 m Tiefe erforderlich, deren Lage entsprechend den hydrogeologischen Verhältnissen angegeben wird. Aus ihnen können während der Hauptvegetationsperiode ca. 4000 ha bewässert werden.

Um Grundwasserspiegelabsenkungen infolge der Bewässerungsmaßnahmen zu kompensieren, wird empfohlen, durch kontrollierte schrittweise Zerstörung der zementierten Konglomerate im Cijevna-Flußbett die Grundwasserneubildung zu erhöhen.

Die Untersuchungen zeigen, wie in einem Karstgebiet mit arider Vegetationsperiode selbst bei lückenhaften Meßdaten durch die Anwendung sich gegenseitig kontrollierender Berechnungsmethoden wasserwirtschaftliche Lösungen gefunden werden können.

Literatur

- (1) Agrokombinat „13. Jul“, Titograd: Rezultati osmatranja nivoa podzemnih voda u Zetskoj ravnici. – 45 S., Titograd 1969.
- (2) ASANOVIC, D. et al.: Čemovsko polje i priobalna zona Skadarskog jezera. – 185 S., Titograd 1959.
- (3) BAARS, I. C.: Calculation of the advisable capacity of sprinkler installations, based on meteorological data. – 54 S., Research and Advisory Institute for Field Crop and Grassland Husbandry (PAW), Wageningen, the Netherlands 1966.
- (4) BEŠIĆ, Z.: Geotektonska struktura severne Crne Gore. – Glasnik Prirodnačkog muzeja Srpske zemlje, serija A-1, Belgrad 1948.
- (5) BEŠIĆ, Z.: Položaj antiklinale Vojnika i Prekornice u geotektonskoj strukturi Crne Gore. – Vesnik Zavoda za geološka i geofizička istraživanja Srbije, knj. XII, Belgrad 1956.
- (6) BEŠIĆ, Z.: Geološki vodič kroz Narodnu Republiku Crnu Goru. – 559 S., Titograd 1959.
- (7) BOURCAST, J.: Observations nouvelles sur la tectonique de l'Albanie moyenne. – Bull. Soc. géol. d'Acad. d. Sciences, t. 183, Paris 1925.
- (8) CVILIC, J.: Glacijalne i morfološke studije u planinama Bosne, Hercegovine i Crne Gore. – Glas Srpske akademije nauka, knj. 57, Belgrad 1899.
- (9) CVILIC, J.: Die dinarisch-albanesische Scharung. – Sitzungsberichte d. K. Akad. d. Wiss. in Wien, Math.-nat. Klasse, Bd. CX, Wien 1901.
- (10) „Geofizika“ Zagreb (M. MLADENOVIC, St. KOVACEVIC, Z. KRULC): Geoelektrična ispitivanja Zetska ravnica, 1956–1967. – 17 S., 7 Profile, 2 Karten 1 : 25.000, Zagreb 1967.
- (11) „Hidroprojekt“ Zagreb (A. DELEZ, Č. PLAZEK): Elaborat izvedbe I testiranja pokusnog bunara BA-1, Čemovsko Polje SRCG. – 15 S., 12 Tafeln, Zagreb 1967.
- (12) „Hidroprojekt“ Zagreb (A. DELEZ, Č. PLAZEK): Elaborat izvedbe I testiranja bunara B-2, Aluminijski Kombinat Titograd. – 9 S., 14 Tafeln, Zagreb 1967.
- (13) Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ (V. DIDIĆ, D. ČUZOVIĆ): Čemovsko Polje. Izvorišta i mogućnosti navodnjavanja. – 85 S., 37 Tab., 7 Karten 1 : 25.000, Belgrad 1970.
- (14) KOSSMAT, F.: Geologie der zentralen Balkanhalbinsel. – Die Kriegsschauplätze 1914–1918, Heft 12, Berlin 1924.
- (15) MILORKVIC, M.: Idejni projekat vodovoda grada Titograda, II. varijanta, zahvatanje podzemne vode. – 206 S., Titograd 1969.
- (16) NOPCSA, F.: Zur Stratigraphie und Tektonik des Vilayets Skutari in Nordalbanien. – Jb. d. geol. R. A., Bd. 55, Wien 1911.
- (17) SCHNEIDER, H.: Die Wassererschließung. – 885 S., Vulkan-Verlag, Essen 1973.
- (18) Socijalistička Republika Crna Gora, Republički Hidrometeorološki Zavod, Agrometeorološka služba: Klima Titograda obradeni Klimatološki podaci sa stanica Titograd i Golubovco. – 12 S., 12 Tafeln, Titograd 1969.
- (19) Socijalistička Republika Crna Gora, Republički Hidrometeorološki Zavod, Hidrološka služba: Rezultati mjerenja kvantitativnih i kvalitativnih promjena voda na rijeci Morači i Skadarskom jezeru izvršena 1966, 1967, 1968 i 1969. g. – 9 Tab., Titograd 1969.
- (20) Socijalistička Republika Crna Gora, Republički Hidrometeorološki Zavod: Hidrološka obrada Morače, Cijevne i Skadarskog Jezera za period 1956–1968. – 16 S., 89 Tafeln, Titograd 1970.
- (21) Socijalistička Republika Crna Gora, Republički Hidrometeorološki Zavod, Agrometeorološka služba: Evapotranspirometer Titograd, Messungen der Evaporation 1960–1961, 1964–1968 und der Evapotranspiration 1965–1968. – 2 S., Titograd 1970.
- (22) Zavod za geološka istraživanja, Titograd: Geološka karta sekcija Tuzi i Podum 1 : 25.000.
- (23) Zavod za geološka i geofizička istraživanja, Belgrad & Zavod za geološka istraživanja, Titograd (B. MILOŠEVIĆ, M. KOMATIĆ): Studija hidroloških i hidrogeoloških uslova Zetsko-Skadarske ravnice – Potencijalni vodni resursi za racionalno navodnjavanje Čemovskog Polja. – 44 S., 3 Karten 1 : 100.000, 1 Profiltafel 1 : 500, Belgrad – Titograd 1968.

Summary

Investigations on Integrated River Basin Development in the Karst Area of Montenegro

In predominantly mountainous Montenegro the karst-depression of the Zeta Plain is of special importance to agriculture. 10 to 20 km wide, it extends over 20 km from Titograd to Lake Skadar close to the Yugoslavian-Albanian border. For the irrigation of this plain basic investigations on integrated river basin development were executed within an OECD-programme of Technical Aid.

Whilst the quaternary filling of the plain consists of calcareous sand, gravel and boulders up to 100 m thick, the frame of the plain is built up of karstified mesozoic limestone and dolomite occurring also in some island hills within the plain due to a palaeorelief.

With a permeability coefficient of $3-4 \cdot 10^{-3}$ m/s, a mean groundwater thickness of 50 m and a groundwater gradient of 1‰, the quaternary loose sediments form a good aquifer out of which water yields of wells up to 150 l/s are possible. With respect to chemical composition we find medium hard to rather hard calcium-magnesia-hydrogencarbonate water which is suitable for irrigation purposes.

The mesozoic bedrock of the frame is locally characterized by extraordinary permeability within karst cavities, whereas neighbouring rock areas are practically aquicludes.

The quaternary aquifer is fed throughout the year by seepage out of the Cijevna river and to a certain extent out of the Morača river. In addition, there is the groundwater recharge by infiltrating precipitation and by supply out of the karstified mesozoic frame during the winter months.

Recipient of this groundwater is Lake Skadar, fed by small streams from the north as well as via karst cavities of the mountainous frame from northeast and northwest.

As the Zeta Plain is characterized by pronounced wet winter seasons, dry summer seasons and annual variations of the groundwater level of 3-6 m, as furthermore groundwater extraction is planned during the summer season when the groundwater level is descending, the quantity of groundwater to be utilized is limited by the mean subterranean low water runoff during the summer months of circa 2 m³/s.

For the extraction of this quantity 20 wells of 30 to 40 m depth are necessary. Their location is chosen according to the hydrogeological conditions. By these wells circa 4000 ha can be irrigated during the main vegetation period.

In order to compensate for groundwater lowering due to the irrigation project, it is recommended to increase groundwater recharge by controlled stepwise destruction of the cemented conglomerates of the Cijevna bed.

The investigations demonstrate how to find solutions for integrated river basin development in a karst area with arid vegetation period in spite of incomplete measuring data by application of calculation methods controlling each other.