

Einleitung.

Im Herbst 1908 bildete sich in Fiume ein Konsortium unter der Firma «Società littorale Baron Sessler u. Co.» mit der Absicht, die Gefällsstufe zwischen den am Ostrand des kroatischen Küstengebirges verschwindenden Gačkafluß einerseits und dem Meeresspiegel andererseits auszubauen. Verfasser wurde im Jänner 1909 von dem Konsortium beauftragt, die Vorerhebungen für diesen Wasserbau einzuleiten, zu organisieren und durchzuführen. Diese Vorarbeiten umfaßten die tachymetrische Aufnahme des Flusses und der Ufergelände, Spiegelnivellements bei verschiedenen Wasserständen, Anlegen eines Pegelnetzes nebst täglicher Ablesung an den Hauptpegeln, die Durchführung zahlreicher Wassermessungen und das eingehende Studium der Abfluvorgänge. Durch diese Arbeiten wurde ein — wenn auch räumlich eng umschriebenes — Gebiet bis ins Detail bekannt, während die in der Literatur niedergelegten Anschauungen über die Abfluvorgänge im Karst und über die Entstehung der Hohlformen gewissermaßen auf summarischem Wege gewonnen wurden. Es zeigte sich nun, daß eine Reihe dieser gegenwärtig mehr oder weniger allgemein anerkannten Anschauungen den Resultaten der intensiv betriebenen Forschung nicht standhalten kann. Die Diskussion der sich ergebenden Widersprüche auf Grund der angestellten Beobachtungen bildet den Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Eine solche Diskussion ist sowohl für den Geologen als auch für den im Karst arbeitenden Wasserbauingenieur von weitgehendem Interesse.

1. Situation des Studienobjektes.

Die Arbeiten, welche die Grundlage für die vorliegende Studie lieferten, erstreckten sich über den südlichen und südöstlichen Teil des innerkroatischen Hochlandes u. zw. über das Gačkapolje, sowie über die angrenzenden Hochflächen und Uvalas. Das innerkroatische Hochland erscheint durch die Gebirgszüge Kapella und Plješivica im Nordosten und durch den Velebit und Senjskobilo im Südwesten orographisch und hydrographisch gegen die Nachbarländer abgeschlossen.

Durch randliche Aufbrüche undurchlässigen Gesteines stauen sie das Karstwasser hoch über das Grundwasser der Nachbargebiete auf und erzeugen dadurch eine selbständige hydrographische Einheit, deren Wasserzirkulation prinzipiell von der Wasserzirkulation der Nachbargebiete sich unterscheidet. Während die Korana, Una und Krka in tiefen Schluchten mit bedeutendem Gefälle das Terrain durchfließend die Nachbargebiete des Hochlandes teils nach der Save, teils nach dem adriatischen Meer obertägig entwässern, wobei sie zahlreiche Bäche und Nebenflüsse in sich aufnehmen, endigen die Flüsse des Hochlandes durchwegs blind in Ponorschlünden oder in periodischen Seen. Sie entspringen fertig in Vaclusequellen und fließen mit einer minimalen Geschwindigkeit, nur unbedeutend in den Poljenboden eingeschnitten. Sie empfangen in der Regel nicht nur keine Nebenflüsse, sondern sie verlieren sogar einen Teil ihres Wassers auf dem Weg von den Quellen zu den Ponoren. Die Randgebirge bestehen zum größten Teil aus triadischen Kalken, Dolomiten, Kalksandsteinen, Konglomeraten und Schiefeln. Am Ostfuß des Velebitgebirges besteht die Basis in 550 Meter Seehöhe sogar aus karbonischen Quarzkonglomeraten und Sandsteinen. Östlich von Zengg, unter dem Vratnikpass und westlich von Gospić, bei Ostaria, sind den triadischen Sedimenten Melaphyre eingelagert, welche von bedeutenden rostroten Tuffmassen und von Konglomeraten begleitet werden. Die Melaphyre von Zengg liegen auf hellblauen festen Kalken und sind durch Erosion auf zwei Quadratkilometer bloßgelegt. Die Melaphyre von Ostaria sind nur spärlich aufgeschlossen und scheinen Werfenerschiefer in Stöcken zu durch-

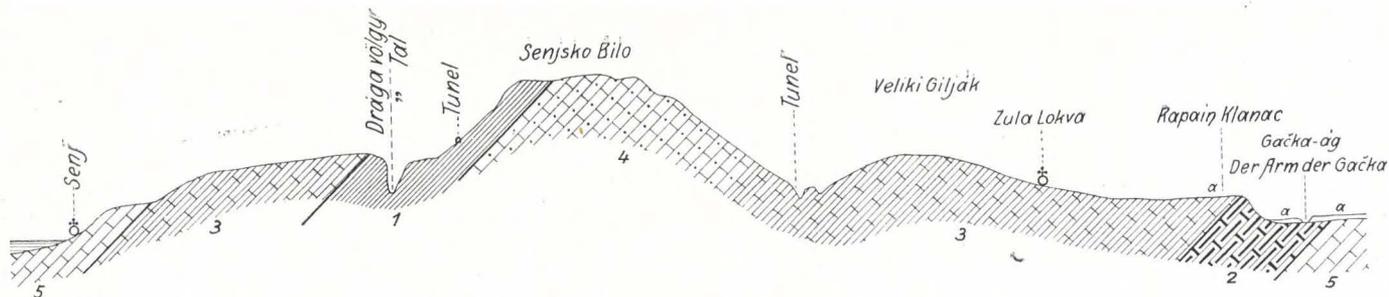


Fig. 1. Geologisches Profil von Brlog bis Senj nach Prof. Cvijić.

1. Werfener Schiefer und Sandstein mit Melaphyr. 2. Halstätter Kalk, 3. Guttensteiner Kalk, dem sich beim Veliki Giljak dünne, fast schieferige Kalksteinschichten einfügen. 4. Dolomit, gegen den Guttensteiner Kalk des Veliki Giljak zu sandig. 5. Kreidekalk.

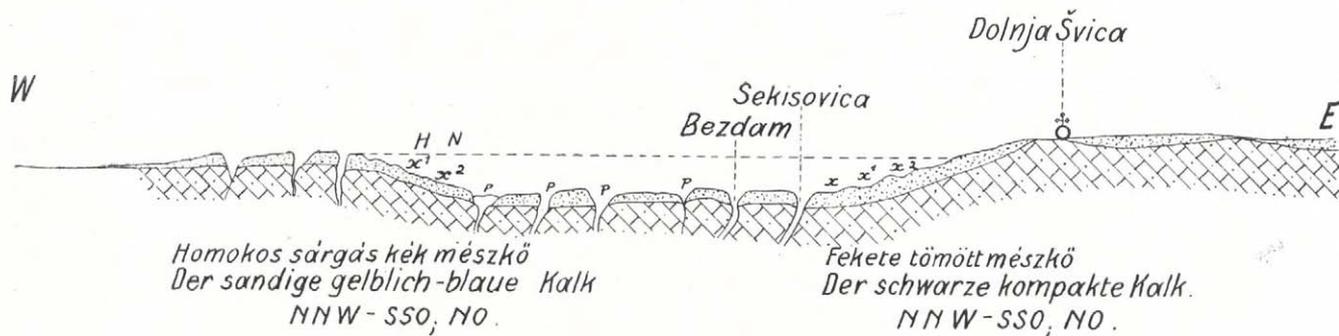


Fig. 2. Profil. durch den periodischen Švica-See nach Prof. Cvijić.

HN = die höchste Uferlinie des periodischen Švica-sees. x, x^1, x^2 = zahlreiche treppenförmige Uferlinien. p = Ponore; die Kalktuffe sind in der Regel 4–5 m dick, stellenweise 8–70 m.

brechen. Das Hochland selbst besteht fast ausschließlich aus reinen oder dolomitischen Kalken der Kreideformation. Ganz isoliert treten auch triadische Gesteine zutage: Guttensteiner und Hallstätterkalke östlich vom Senjsko Bilo, grüne Werfenerschiefer zu beiden Seiten des Bilopolje, am Südostrand des Lika- und des Kravapolje. Von

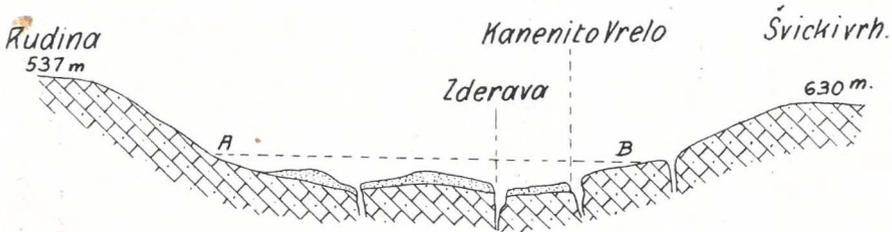


Fig. 3. Konjsko Jezero.
Profil nach Prof. CVIJIĆ.

höchstem Interesse ist das auf einen einzigen, schmalen Streifen lokalisierte Vorkommen tertiärer Sedimente in einem schluchtartigen Tal parallel zum Hauptstreichen des Kapellagebirges. Eingeklemmt zwischen zwei steil aufgerichtete, gleichsinnig unter 45 bis 55° nach

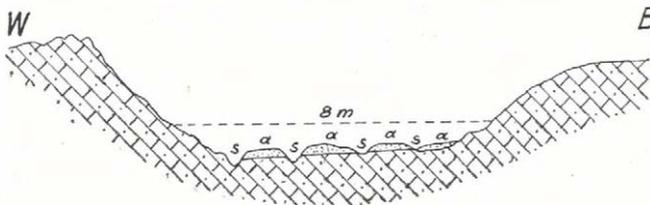


Fig. 4. Kosmačevo Jezero.
Profil nach Prof. CVIJIĆ.

aa = gelber Ton ohne Kalkuff. *ss* = in dolomitischem Kalke bis 10 m.

NWN einfallende Gebirgsschollen treten auf der Sohle des Tales, am Fuß der felsigen, 500 bis 600 Meter hohen Hänge Nummulitenkalke, eozäne,¹ gelbliche Kalkmergel und grüne Tegel auf. Der Ausbiß eozäner, mergeliger Sedimente ist etwa 80 Meter breit und 9 Kilometer lang, wird jedoch ungefähr in der Mitte von einem Nummulitenkalkrücken unter einem spitzen Winkel durchschnitten. Das Tal mit den steilen

¹ Nach der HAUERSchen geol. Übersichtskarte der öst. Monarchie. Die von mir aufgesammelten Petrefakten sind noch nicht aufgearbeitet.

Kreidekalkhängen und den blaßgrünen Mergeln auf der Sohle erinnert lebhaft an das Längstal, welche die kroatische Küste von Fiume bis Novi begleitet und dessen [eozäne Sedimente ebenfalls von älteren Querrippen unterbrochen werden. Die Eozänmergel von Bunić haben sich bei der Auffaltung, Berstung und Überschiebung, welche die Bildung des innerkroatischen Hochlandes zur Folge hatte, so tief ins Erdinnere verloren, daß sie als die einzigen von allen Eozänkeilen den nachmaligen Karstwasserspiegel unterteuften und so vor dem Schicksal des spurlosen Verschwindens bewahrt wurden. Sie liefern den Beweis, daß die Aufwölbung des innerkroatischen Hochlandes mindestens posteozänen Datums ist.

Durch bewaldete Gebirgskämme, deren Gesteine größtenteils der Kreideformation angehören und welche nur in einzelnen Gipfeln die Meereshöhe von 1000 Metern überschreiten, wird das Hochland etwa parallel zum Hauptstreichen des Kapellagebirges in eine Serie von abflußlosen Becken geteilt. (Siehe Fig. 5.) Den Mittelpunkt eines jeden Beckens bildet ein «Polje». Der Poljenboden ist stets unbewaldet, in manchen Poljen felsig, in manchen mit Süßwassersedimenten bedeckt, ständig trocken oder wie im Popovopolje oder im Zirknitzersee periodisch inundiert. Er stößt scharf an den gebirgigen Umrandungen ab. Seine Höhenlage schwankt in engen Grenzen von wenigen Metern und er durchschneidet den felsigen Gebirgskörper ganz ohne Rücksicht auf Schichtenbau wie eine Abrasionsfläche. Doch ist das Auftreten von Poljen ebenso wie das Auftreten von Dolinen an stark dislozierte Kalkgebirge gebunden. Die Poljen östlich von dem Höhenzug Planina (Brinje W), Ljutica (Udbina NW) sind isoliert und kommunizieren mit den Nachbarpoljen bloß durch die Klüftung der trennenden Kalkmassen. Die Poljen des Westens sind untereinander durch kurze Quertäler verbunden und durch das südwestliche Randgebirge des Gačkapoljes in zwei große Gruppen geschieden, in die Lika- und in die Gačkagruppe, wenn man die Gruppen nach ihren Hauptflüssen benennt. Die Hauptflüsse durchziehen die Poljen in gewundenen und mehrere Meter tief in den felsigen Grund eingeschnittenen Erosionsrinnen. Durch die Anwesenheit dieser in den Kalkfels eingetieften, perennierenden Flüsse unterscheiden sich die Poljen der beiden westlichen Gruppen prinzipiell von den Poljen des Ostens.

Die Höhenlage der Poljen schwankt zwischen 640 Metern im äußersten Osten des Hochlandes (Koreničkopolje am Westfuß der Plješevica Planina) und 420 Metern im Vlaškopolje im Nordwesten, am Ostfuß des Senjsko Bilo. Das Koreničkopolje liegt somit etwa 420 Meter über der nur 9 Kilometer Luftlinie entfernten Ebene von Bihać, Vlaš-

kopolje 420 Meter über dem 16 Kilometer entfernten adriatischen Meer. Wenn man bedenkt, daß sämtliche Poljen des Hochlandes aus zirkulierendem Kluftwasser oberirdisch bewässert werden, so kann man die gewaltige stauende Wirkung der Randgebirge ermessen und begreift die hydrographische Unabhängigkeit Innerkroatiens von den hydrographischen Ereignissen in den Nachbargebieten. Diese Isolierung

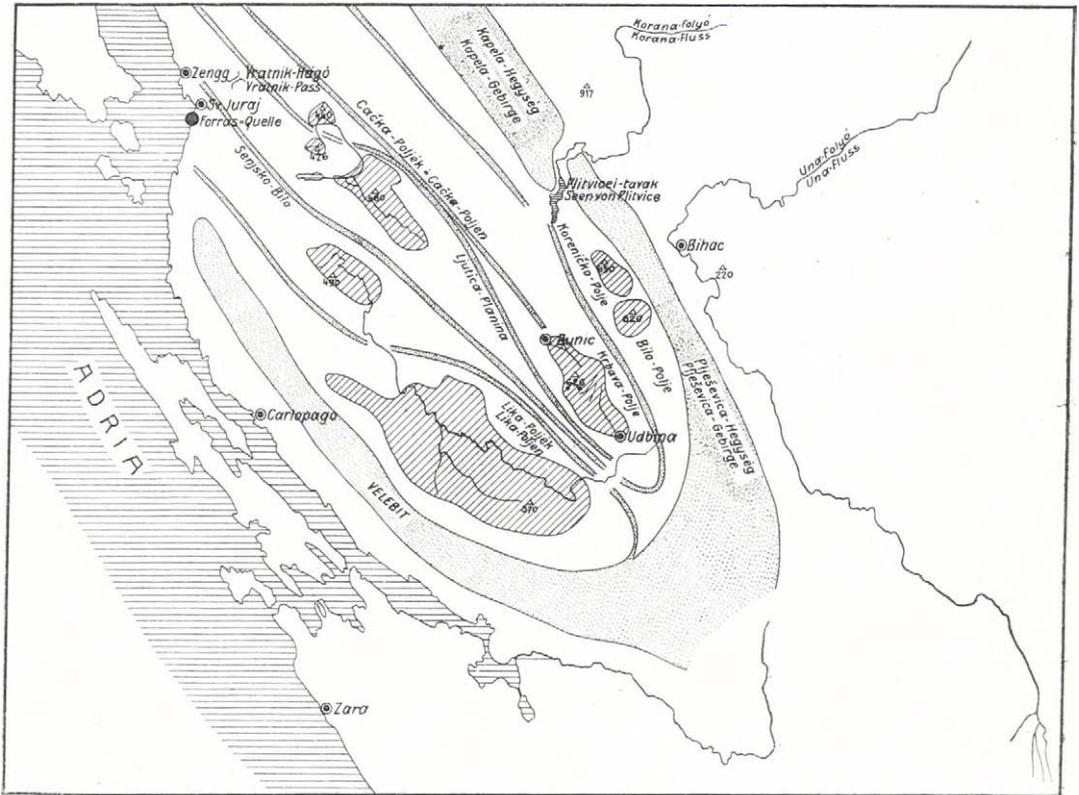


Fig. 5. Orographische Übersicht über das innerkroatische Hochland.

bringt es auch mit sich, daß hier die Eigentümlichkeiten abflußloser Karstgebiete besonders typisch zur Ausbildung gekommen sind.

Wenn man nun die Kartenskizze Innerkroatiens betrachtet (Fig. 5.), so bemerkt man, daß die Gebirgszüge ungefähr dem Hauptstreichen der Kapella parallel laufen. Die Meeresküste läuft von Carlopago bis Jablanac ebenfalls ungefähr parallel zur Hauptstreichrichtung, biegt aber in Jablanac nordwärts und schneidet das Velebitgebirge schräg zum Streichen ab und wendet sich erst bei Zeng wieder nach dem NWN. Es ist zum mindesten sehr wahrscheinlich, daß die Zirkulation

ringere Bewegungswiderstände vorfindet als senkrecht zu derselben. Wenn parallele Kettengebirge von der Meeresküste schräg geschnitten werden, so dürfte das Staugrundwasser zwischen ihnen nach dem Meer zu überlaufen. Wir finden diese Vermutung durch die zahlreichen Süßwasserquellen bei St. Juraj, zwischen Zengg und Jablanac bestätigt.

Die nördliche von den westlichen Poljengruppen, das Gačkapolje mit seinem perennierenden Hauptfluß, bildete nebst dem Quellgebiet von St. Juraj das Studienobjekt während der Vorerhebungen.

2. Orographie des Gačkapoljes.

Wenn man den Komplex von Ebenen, welchen ich unter dem Namen «Gačko-Polje» zusammengefaßt habe und seine gebirgige Umrandung aus der Vogelperspektive sehen könnte, so würde man bemerken, daß die Randgebirge mit ihren geschlossenen, unzertalten und wenig gebogenen Hängen an den beiden Enden des langgestreckten Poljenkomplexes in einer Entfernung von wenigen Kilometern einander parallel laufen, in der Mitte jedoch auf etwa 16 Kilometer auseinandertreten und so der Entwicklung eines recht komplizierten Systems von Senken Raum geben, zwischen welchen die Reste von niedrigeren Berggruppen und Bergketten stehen geblieben sind. Am Fuß des nordöstlichen Randgebirges zieht ein 22 Kilometer langer und etwa 2 Kilometer breiter, ebener Streifen (Tal der nördlichen Gačka). In den Kamm, welcher jenseits dieser Grabensenke (südwestl. derselben) dem Randgebirge parallel läuft, sind vier große Breschen geschlagen und zerlegen den Kamm in isolierte Bergmassen, von welchen die höchste, der Um, wie eine Insel aus der Ebene ragt. Die beiden südlichen Breschen verbinden den langgestreckten, schmalen Graben mit dem eigentlichen Gačkapolje, einer Ebene von etwa 15 Kilometer Länge und 5 Kilometer Breite, ungefähr in der Verlängerung der schmalen Zone eozäner Mergel von Bunić. Während wir jedoch in dem Randgebirge des Nordostens ein sehr ausgesprochenes Hauptstreichen der Kämme wahrnehmen, sehen wir jenseits des Südwestrandes ein richtungsloses Bergland mit abflußlosen Mulden und unregelmäßig begrenzte Bergformen. Erst im eigentlichen Randgebirge des Poljenkomplexes zeigen die Bergkämme wieder eine ausgesprochene Orientierung, doch verläuft hier das Hauptstreichen unter einem Winkel von etwa 30 Graden gegen die Längsachse des Poljes. Gewissermassen eine Fortsetzung des orientierungslosen Berglandes bilden die isolierten

des Stauwassers in der Hauptstreichrichtung der Kettengebirge gekügelte Prozor, Spilnik etc., welche im Westen unvermittelt aus der Ebene steigen. Das breite Gačkopolje und der schmälere Graben des Nordostens in Verbindung mit den vier Breschen bilden das Hauptgerippe des Poljenkomplexes. Sie senden jedoch zwei Apophysen nach dem Westen bis beinahe an den Fuß des Senjsko Bilo. Die südliche von ihnen nimmt bei Otočac ihren Anfang und besitzt bis Švica mit ihrem ebenen Boden und mit den scharf ausgeprägten Rändern echten Poljencharakter. Über Švica hinaus setzt sie sich in ostwestlicher Richtung als eine Reihe von tiefen, abflußlosen Mulden fort. Es sind dies die Švicaseen, welche im Hochsommer trocken liegen, im Winter und Frühjahr hingegen unter einer Seefläche von nahezu 5 Kilometer Länge verschwinden. Die Apophyse von Vlaškopolje streicht nach dem SW und setzt in der Richtung die 60 Meter höher gelegene Bresche von Dubrava fort. Auch sie besitzt in ihrem ersten Teil Poljencharakter und setzt sich in mehreren Mulden fort. Diese Mulden sind hingegen nicht inundiert und wurden erst künstlich durch einen Stollen mit dem Vlaškopolje verbunden, um die schädlich lange Inundationsdauer zu reduzieren. Die Räume zwischen diesen Apophysen einerseits, den Poljenrändern und dem Senjsko Bilo-Gebirge andererseits erfüllen Bergmassen ohne vorherrschende Streichrichtung,

Die Hohlformen, welche von den Randgebirgen und den Berggruppen des Inneren umschlossen werden, haben zwar im großen Ganzen die Lage tektonisch vorgezeichneter Längstäler, unterscheiden sich jedoch von Erosionstälern prinzipiell. Die Sohlenbreite ist im Verhältnis zur Sohlenlänge sehr bedeutend. Trotzdem sie von einem Hauptfluß durchflossen werden, überwiegt das Quergefälle das Längsgefälle um ein Vielfaches. Dabei sind die Hänge der Randgebirge beinahe unzertalt und steigen unvermittelt aus der schwach geneigten Muldensohle empor. Sand- und Schottervorkommnisse beschränken sich auf einige isolierte, wenig mächtige Deponien. Im übrigen liegt der Fels noch zu Tage. Bloß die Muldenböden und die Zwischenräume zwischen den felsigen Partien sind mit lehmigen Verwitterungsprodukten bedeckt. Hingegen lagern auf den tiefsten Teilen der Hohlformen mächtige Schichten von lehmig-kalkigen Sedimenten. Besonders charakteristisch und von tiefster Bedeutung ist jedoch folgendes: Während dichte, schöne Waldungen die Randgebirge und die Berggruppen des Innern bedecken, sind sämtliche Ebenen verkarstet. Die lehmbedeckten Partien besitzen, sofern sie nicht bebaut sind, Steppencharakter. Dieser tiefgreifende Unterschied zwischen Polje und Bergland wurde nicht erst durch den Menschen künstlich geschaffen. Das beweisen die Löß-

lager von Šumecica.¹ Wohl aber wurden die Grenzen zwischen Wald und Steppe durch den Menschen verwischt. Auf dem heute noch oberflächlich bewässerten, und z. T. regelmäßig inundierten, jüngeren Poljenböden von Otočac, Brlog und Vlaškopolje sind Dolinenbildungen recht selten. Der wechselnden Beschaffenheit des Poljenbodens entspricht auch die Verteilung der Ortschaften und Gehöfte. Im Quellgebiet ist die Mitte des Poljenbodens etwas versumpft, daher liegen die Dörfer nahe den Bergrändern und rings um die Mühlen, welche von den hochgestauten Quellen getrieben werden. Die gesammelten Quellbäche verlassen als Gačkafluß das feuchte Quellgebiet und wir finden Gehöft an Gehöft, in kleinen Obstgärten und zwischen Feldern längs beiden Ufern in langer Zeile. Die breite Fläche des Gačkopoljes ist verkarstet. Die Häuser umsäumen daher in schmäler Zone den Fuß des Umberges, wo die angewehten und eingeschwemmten lehmigen Sedimente die Anlage bescheidener Gärten ermöglicht hatten. Das magere Vieh weidet in dem spärlichen Gestrüppe der flachen Karstmulden. Eine mächtigere Lehmschichte begleitet auch den Nordostrand der Grabensenke Skare-Klanac und veranlaßte die Besiedelung, während die breite Talsohle unbewohnt und verlassen ist. Nur die Lehmauffüllung im eigentlichen Erosionsgraben des Gačkaflusses durchzieht als grasbewachsener, zum Teil bebauter, wertvoller Streifen die Senke. Doch konnten hier Ortschaften wegen der periodischen Inundationen nicht entstehen. Aus dem Erosionsgraben tritt die Gačka bei Dubrava in eines der fruchtbarsten Gebiete des ganzen Gačkapoljes, in die kalkig-lehmige Sohlenauffüllung des alten Poljensees von Klanac. Getreide und viele Gemüsesorten gedeihen hier auf das Beste. Die Ortschaften liegen jedoch am Berghang, jenseits des kostbaren Ackerbodens inmitten von Obstgärten. Obstgärten sind anspruchsloser. Auch Brlog bildet eine schmale Zeile von gartenumgebenen Gehöften am Fuß der verkarsteten Hochterrasse im Norden des fruchtbaren Brlogerpoljes. In der Schlucht beim Eingang in das Polje von Brlog besitzt der Gačkafluß ein etwas stärkeres Gefälle und treibt fünf Mühlen. Im Vlaškopolje und in der Ebene von Poljice sind die Ortschaften wohl durch die regelmäßigen Überschwemmungen an den Berghang gewiesen. Nur Otočac liegt mitten im Inundationsgebiet. Doch wurde diese Lage aus strategischen Gesichtspunkten gewählt. Die Stadt (Otočac kommt von

¹ BALLIF zeigt in seinen «Römerstrassen in Bosnien u. Herzegowina», daß die Poljen schon damals verkarstet gewesen sind. In den späteren Kapiteln wird dargetan, daß diese Verkarstung mit der Poljenbildung in engstem Zusammenhang steht.

Otok = Insel) lag seinerzeit zwischen zwei Flußarmen, welche in Verbindung mit dem befestigten Schloßberg und den Stadtmauern jenseits des Wassers die Angriffsmanöver des Feindes sehr erschwerten. Das Industriezentrum des Gačkapoljes bildet das Dorf Švica zu beiden Seiten des Wasserfalles. Zwischen dem Obersee und dem periodischen Švicasee liegen an dreißig Sägen, Mühlen und Tuchwalken mit ungefähr 600, äußerst konservativen Besitzern. Die Einrichtung der Betriebe ist denkbarst primitiv. In den Seebecken selbst liegen die besten und teuersten Wiesen der Gegend. Das Bergland, welches die Senken umgibt, ist nur schwach besiedelt. Die alte Grenzverwaltung hatte die Wälder geschont. Den zahlreichen Flüchtlingen, welche aus dem Balkan kommend, das Recht hatten auf Schutz und Boden, wurden die Wohnplätze ausschließlich in den unbewaldeten Poljen angewiesen.

3. Quellen, Talweg und Ponore des Gačkaflusses.

In der Südostecke des Gačkapoljes vereinigen sich die bewaldeten Randgebirge und umschließen eine weite, in eine flache Spitze auslaufende Bucht. Felder und saftige Wiesen bedecken den ebenen, dolinenlosen, lehmigen, nur in der Mitte etwas versumpften Boden. Am Fuß der unvermittelt und steil emporsteigenden, fast unzertalten und im Nordosten geschlossenen Waldhänge, dringen klar und lautlos die fünf Vaclusequellen des Gačkaflusses aus der Tiefe, umgeben von Gehöften und freundlichen Obstgärten. Durch primitive Dämme wurden die Quellwässer hochgestaut und treiben gleich nach dem Verlassen der Teiche zahlreiche Mühlen und Tuchwalken. An der Hauptquelle sind nicht weniger als sieben Triebwerke hart neben einander. Die Durchmesser der Quellteiche betragen 20 bis 40 Meter. Die Höhenkoten der Wasserspiegel differieren nur um wenige Meter. Am höchsten liegt die Hauptquelle (Tonkovič vrelo) im innersten Winkel der Bucht. Ich maß die Seehöhe ihres Wasserspiegels im April 1909 mit 455.9 m. Das Wasser drang damals an zahlreichen Stellen rings um den Quellteich unter zerklüfteten Felspartien und zwischen den zahllosen Felstrümmern hervor, welche den Strand bedecken. Die nördlichste Quelle des rechten Poljenhanges, die Majerovska vrelo, ist von der Tonkovičquelle ca. drei Kilometer weit entfernt und vom steilen Berghang durch einen sanft ansteigenden Terrainstreifen von etwa 50 Metern Breite getrennt. Ihr gegenüber, am linken Poljenhang, liegt der Quellsee der Pečinaquelle, am Fuß einer nahezu senkrechten, zerrissenen Felsstufe in einer Nische. Bei der Majerovska- und bei der Pečinaquelle fallen schon von weitem die roten, eisenschüssigen Breccien

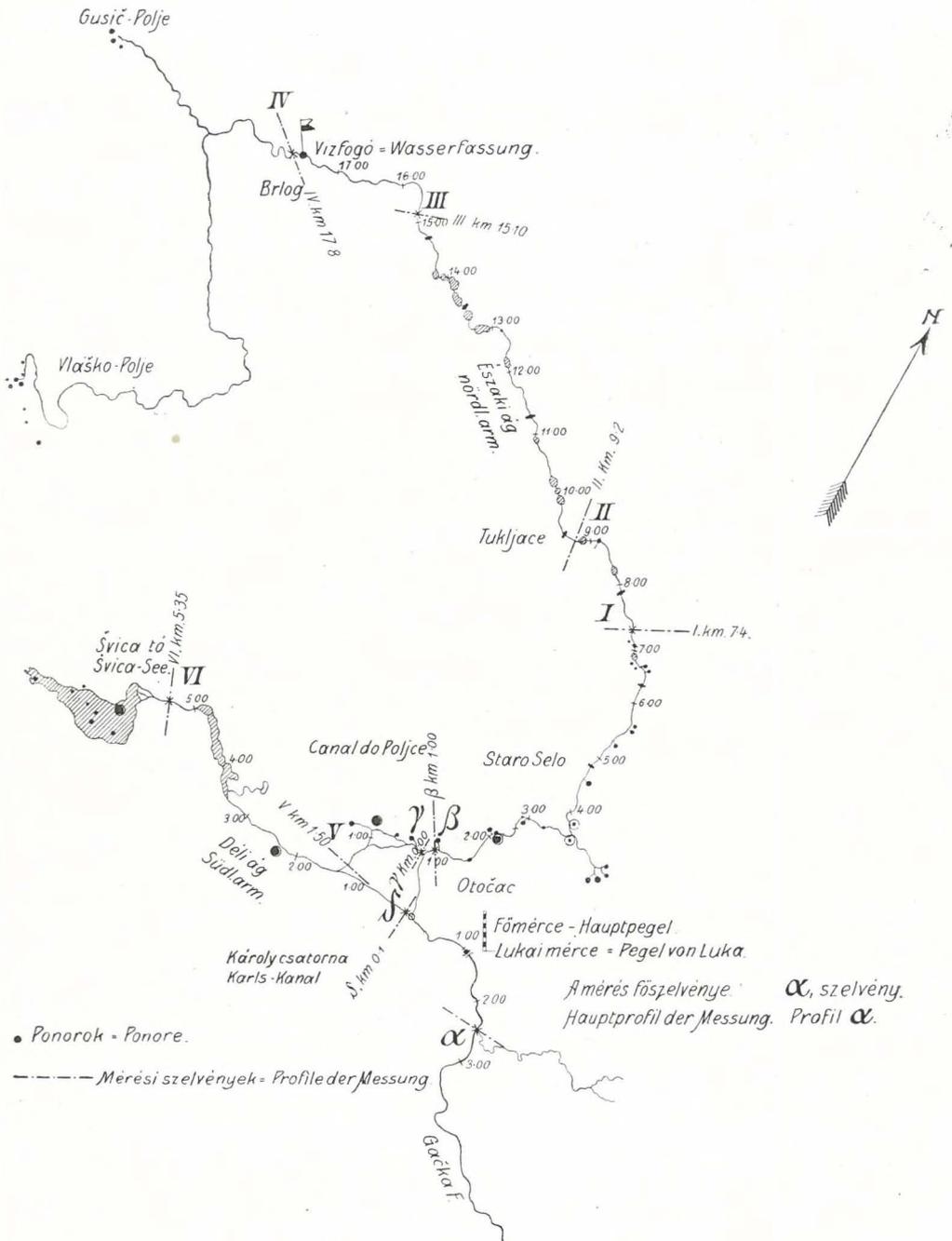


Fig. 6. Übersicht über die im Gačka-Gebiet auftretenden Schluckschlünde.

auf, welche die Felspartien der Ufer regellos durchsetzen. In der Breccie der Pečinaquelle fand ich einige Hohlräume, teilweise mit terra rossa ausgefüllt. Die terra rossa enthielt Knochenreste und Zähne, offenbar diluvialen Alters. Das aufgesammelte Material liegt in der kgl. ung. geologischen Reichsanstalt. Systematisch betriebene Ausgrabungen dürften

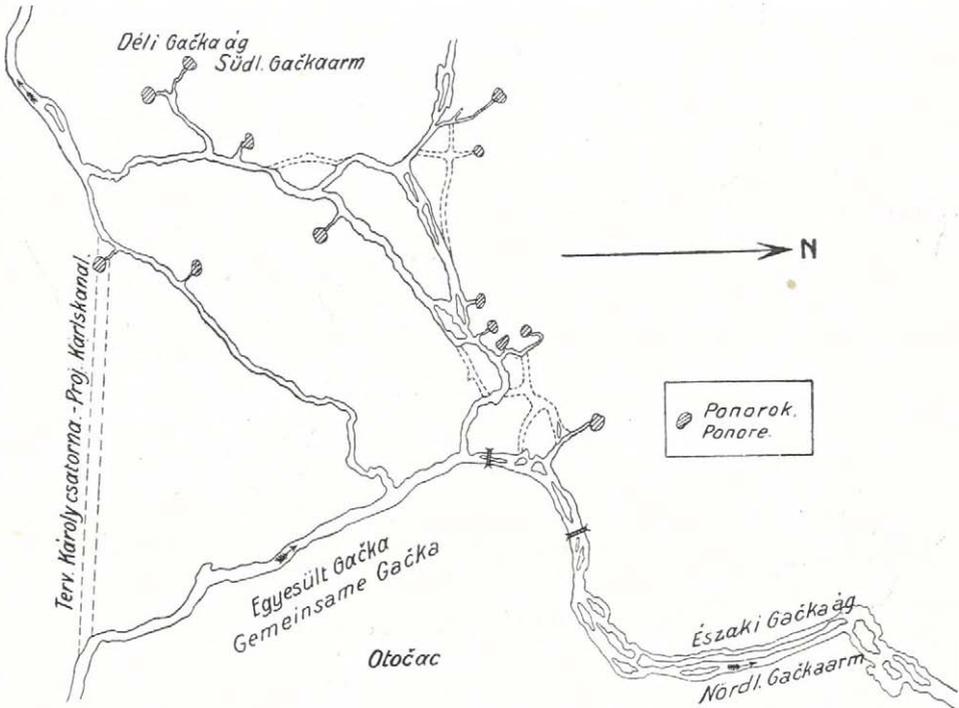


Fig. 7. Das Überströmungsgebiet von Otočac.

Nach den Plänen des k. k. Seebauingenieurs J. EISINGER im April 1870.

noch manchen interessanten Fund zutage fördern. Die Pečinaquelle soll zur Zeit der Likawässer trüb laufen, während die anderen Quellen klar bleiben. Die Likaponore von Kossinj befinden sich sechs Kilometer südwestlich, etwa auf der Verbindungslinie Majerovska vrela—Pečine vrela und liegen rund 70 Meter über den Gačkaquellen.

Die vereinigten Quellbäche folgen nun in vielfach gewundenem Lauf der freundlichen, fruchtbaren Senke, welche den Südwesthang des Poljes begleitet. Die Lauflänge beträgt von der Tonkovičquelle bis zur ersten Gabelung von Otočac (Abzweigung des Karlskanales) 15·8 Kilometer auf 13·1 Kilometer Luftliniendistanz zwischen Anfangs- und Endpunkt der Flußstrecke. Bis Prozor mit ziemlicher Geschwin-

digkeit in einer flachen, relativ schmalen Rinne auf dem Poljenlehm fließend, wird der Fluß immer träger und nimmt in den letzten Kilometern vor Otočac den Charakter eines langgestreckten Flußsees an. Bei einer Flußbreite von 20 bis 40 Metern bei Niedrigwasser besitzt er eine mittlere Profilgeschwindigkeit von kaum 5 cm in der Sekunde und schlängelt sich in weiten Windungen zwischen den flach ansteigenden, teils grasbewachsenen und bebauten, teils schneeweißen, felsigen und zerklüfteten Ufern hindurch. Der Grund ist so schlammig, daß die Peilgewichte tief versinken. Wasserpflanzen haben einen Teil des Flußprofils verlegt. Die flutenden grünen Massen sind in steter, schwingender Bewegung. Von ihren primitiven Einbäumen aus mähen die Uferbewohner diese unterseeischen Wiesen mit Sensen von mehreren Metern Länge und füttern mit dem getrockneten Kraut ihr Vieh. Im Herbst und im Winter liegen beständig dichte Nebel über dem wärmeren Wasser. Die Hochfluten kommen geräuschlos, ohne Wellenschlag und inundieren oft in wenigen Stunden weite Flächen. Fremdartig wie der Fluß selbst sind auch die hohen, wundervoll regelmäßigen, dunkelbewaldeten Kegelberge, welche ohne Übergang aus der fruchtbaren Ebene steigen und den Fluß von dem Polje trennen.

Der Flußschlauch selbst ist mit Lehm vollkommen gedichtet und nur lokal konstatiert man bei den Sondierungen Felspartien, welche jedoch immer nur aus den ziemlich steilen Böschungen brechen. Der in den 70er Jahren künstlich geschaffene Karlskanaldurchstich in Km 15·8 ging Hand in Hand mit der Trockenlegung zahlreicher Flußarme, welche bei Otočac nach dem Osten abbogen und bezweckte die Beseitigung der Überschwemmungen, unter welchen die Ortschaft Jahr für Jahr zu leiden hatte. Dieses Gebiet, ich will es in Hinkunft das Überströmungsgebiet von Otočac nennen, trennt den gemeinsamen Hauptarm von den morphologisch und hydrographisch ganz anders gearteten Teilarmen von Brlog und Švica. (Fig. 7.) Ich behandle daher den Hauptarm km 0·00 bis 15·8 separat. Seine Wasserführung wurde in einem gereinigten und hergerichteten Meßprofil in km 13·9 erhoben. Der Hauptpegel war in km 14·6 am Mitteljoch der Brücke von Luka befestigt. Das Spiegelnivellement ergab im Hauptarm folgende Einzelgefälle:

km	0·00	—	2·40	=	0·266‰
„	2·40	—	5·00	=	0·215 „
„	5·00	—	5·70	=	0·210 „
„	5·70	—	7·80	=	0·196 „
„	7·80	—	9·10	=	0·194 „
„	9·10	—	10·90	=	0·100 „

km	10·90	—	12·70	=	0·106	‰
“	12·70	—	14·70	=	0·067	“
“	14·70	—	15·80	=	0·042	“
“	15·80	—	16·80	=	0·075	“

Das Gesamtgefälle beträgt somit auf der 15·80 Kilometer langen Flußstrecke 2·571 Meter und das mittlere kilometrische Wasserspiegelgefälle 0·162‰.

Wie die zur Aufsuchung einer geeigneten Wassermeßstelle unternommenen approximativen Peilungen ergeben haben, weicht das Sohlengefälle stark vom Wasserspiegelgefälle ab. Die mittlere maximale Wassertiefe beträgt bei einer mittleren Wasserführung von 10 m³/sec. insgesamt nahe den Hauptquellen 1·00 m und erreicht etwa bei der Abzweigung des Karlskanales ihr Maximum mit 6·00 m. Das Querprofil ist in der tiefen, fast stagnierenden Flußstrecke unterhalb der Brücke von Prozor trapezförmig. Die mittlere Breite ist ungefähr gleich der vierfachen Wassertiefe. Die Böschungen haben Neigungswinkel von 30 bis 45 Graden, die Sohle ist nahezu eben. Sinkstoffe führt der Fluß für gewöhnlich keine. Nur ein kleines, periodisches Seitenbächlein, P. Sv. Marko, mit 4 km Lauflänge und 22 m Gesamtgefälle (5·5‰), welches zur Zeit des Hochwassers im Poljenlehm erodiert, bringt suspendiertes Material in den Fluß. (Fig. 8—13.) Das Wasser hat aber nicht die Kraft, die Sinkstoffe weiterzuführen. Es bildet sich daher vor der Mündung des Baches eine Auflandung von ca. 190 Metern Länge und 3·5 m größter Mächtigkeit, welche also bei Mittelwasser die Flußtiefe von 5·8 auf 2·3 m reduziert. Die Möglichkeit der Entstehung einer derartigen Barriere charakterisiert den seeartigen Zustand des Hauptarmes am besten. Zwischen Prozor und Otočac weist der Flußschlauch stellenweise dolinenartige Ausbauchungen auf. Die Flußbreite, welche bei Mittelwasser im allgemeinen 20 bis 25 m beträgt, nimmt auf 40 bis 50 m zu und die Flußtiefe erreicht stellenweise 10 und mehr m. An solchen Stellen sind die Ufer steiler und die Kreidefelsen treten nackt und weiß zutage. In der Strecke Karlskanaleinlauf—Steinerne Brücke bei Otočac folgen die Ausweitungen dicht auf einander und der Boden ist mit feinstem, weichem Schlamm bedeckt, so daß präzise Peilungen fast unmöglich durchgeführt werden können. Östlich vom Dorf Sinac und nördlich vom Berg Spilnik sind Deponien von Sand und Schotter in künstlichen Gruben aufgeschlossen. Das Material besteht aus gemischtkörnigem Kalkschotter mit rötlichgelbem, lehmigem Zwischenmittel. Die Korngröße schwankt zwischen grobem Sandkorn und Nußgröße.

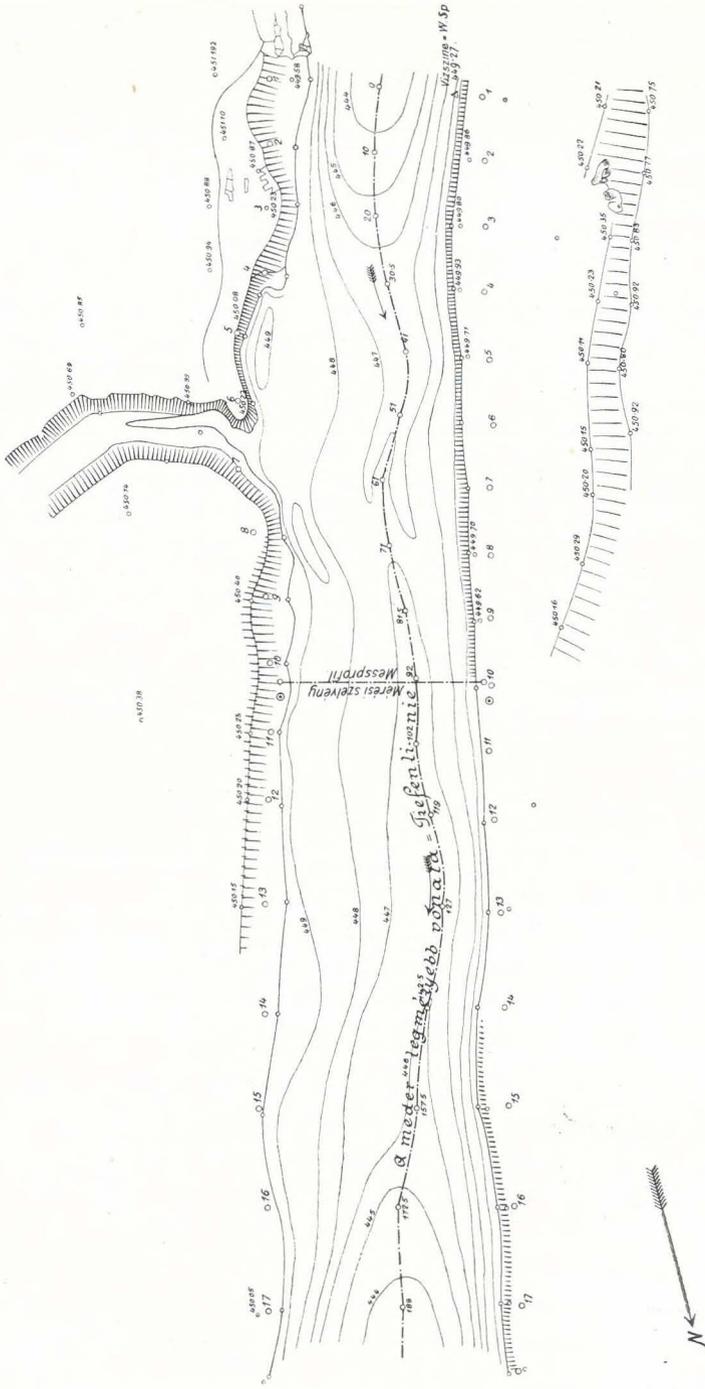


Fig. 8. Situation der Wassermeßstelle bei Prozor.
 Aufgenommen bei einem Pegelstand 47.50 (Pegel Luka).

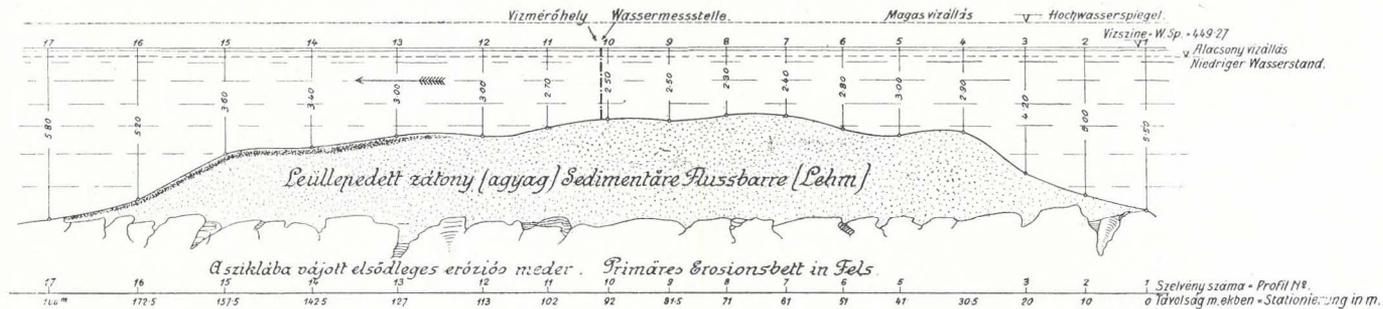


Fig. 9. Längenprofil nach der Tiefenlinie in Figur 8.
Längen 1 : 500. Tiefen 1 : 100.

Im Überströmungsgebiet bei Otočac wendet sich der Fluß in drei engen Schleifen nach dem Nordosten (km 0·00 bis km 3·7). Die Ufergelände unterscheiden sich von den Ufergeländen des Hauptarmes nur wenig. Flach ansteigende, stellenweise felsige Lehnen, welche allmählich in ein Flachland übergehen. Doch ist die weitere Umgebung des Flusses viel ebener und der felsige Untergrund scheint von einer mächtigen Lehmschicht überlagert zu sein. Das fruchtbare Terrain erstreckt sich über eine Fläche von mehr als einem Quadratkilometer. Das Querprofil des Flusses hat sich hingegen wesentlich verändert. Es ist zwar auch noch flach trapezförmig, besitzt aber nur den achten Teil der Querprofilfläche des Hauptarmes. (Fig. 15—16.) Die Fundierungsarbeiten bei den Otočaner Brücken haben gezeigt, daß sich der feste Fels, das heißt also die alte Flußsohle, in sehr großer Tiefe unter der gegenwärtigen Flußsohle befinden muß. Als Sohlenmaterial verzeichnet ein altes Längenprofil aus dem Jahr 1868 in dieser Flußstrecke «flüssigen Schlamm». Seinerzeit scheint das Flußbett unmittelbar nach dem Sohlengefällsbruch in km 1·00, bei der steinernen Brücke von Otočac, in welchem die Flußsohle um etwa 5 m auf 100 m emporsteigt, viel breiter, seichter und unregelmäßiger gewesen zu sein. (Fig. 7.) Doch haben die zahlreichen, im Laufe des letzten Jahrhunderts vorgenommenen Regulierungsarbeiten das ursprüngliche Bild verwischt. Die Wassertiefen sind stark wechselnd, wie aus dem Längenprofil ersichtlich, doch scheint man es hier nicht mit Dolinenbildungen zu tun zu haben, nachdem die Flußbreite beinahe konstant bleibt und 16 m im Mittel beträgt. Ausgezeichnet sind diese ersten 4 Flußkilometer durch das Auftreten von zahlreichen wohlentwickelten Ponoren. Acht Ponorgruppen finden sich auf einer Strecke von 2·8 km. Sieben von diesen Gruppen liegen in der Nähe der Kurvenscheiteln. Die Skizze (Fig. 17.) läßt ihre charakteristischen Eigenschaften klar erkennen. Der Zulauf zu den Ponoren zweigt ungefähr im rechten Winkel vom Fluß ab und verläuft meist parallel zur Flußachse, jedoch mit Gegengefälle. Die Ponore sind ziemlich unregelmäßig angeordnet, sehr verschieden groß, von 2 bis 15 m im Durchmesser, Trichter mit steilen lehmigen Hängen, der Boden mit verschlammten Felsblöcken und eingeschwemmtem Material bedeckt. Die Zulaufkanäle sind meist stark gewunden und haben ein beträchtliches Gefälle, so daß man schon von weitem das Rauschen des abströmenden Wassers vernimmt. Das Flußbett ist derartig verwachsen, daß bei Niederwasser ein Boot schwer passieren kann. Nur schmale Kanäle bleiben zwischen den grünen, hin und her flutenden Inseln offen. Das Spiegelgefälle wird durch diese Pflanzenbarren in einer Reihe von Stufen zerlegt,

welche jedoch im generellen Längenprofil nicht zum Ausdruck gebracht sind. Von km 1·00 bis km 2·6 ist das Gefälle 0·385%, also sehr groß, wohl bedingt durch die in den 70-er Jahren erfolgte Regulierung. Ab km 2·6 beträgt das Spiegelgefälle 0·178%.

In km 3·8 schwenkt der bestehende Flußlauf um ca. 120° ab und wendet sich direkt nach Norden. Ein altes totes Flußbett setzt jedoch die ostwestliche Flußstrecke auf 1 km Länge fort. In den ersten hundert Metern zerrissen und felsig enthält es einige unbedeutende Ponore, dann aber verzweigt es sich bald und endigt in zahlreichen dolinenartigen Mulden. Die Talsohle besteht aus einer mächtigen Lehmdecke und zeigt keine Erosionsspuren. Die Rolle, welche dieses blinde Tal in der Flußgeschichte gespielt hat, wird im dritten Abschnitt ausführlich erörtert werden. In der geraden, nördlich gerichteten Flußstrecke km 3·7 bis km 6·7 laufen die Hochufer ziemlich parallel in einem Abstand von 60 bis 100 m, sind teils flachere, teils steilere oder senkrechte, felsige, mit Buschwerk durchwachsene Hänge von 15 bis 20 m relativer Höhe über dem Talboden. Der Fluß schlängelt in flachen Kurven zwischen den Hochufern.

Zwei große Ponore öffnen sich am Fuß von steilen, zerklüfteten Felswänden des rechten Hochufers. Sie ähneln einander auffallend in Größe und Form. Ganze Ponorgruppen scheinen zusammengewachsen zu sein und bilden je einen großen Dolinenponor von unregelmäßiger Form und mit zahlreichen Saugstellen, welche sich als trichterförmige, mit Steinen und eingeschwemmten Holzabfällen zum Teil ausgefüllte Vertiefungen im Dolinenboden verraten. Den flacheren Hang und die tiefste Strecke des Zuleitungskanals bedeckt eine wahre Trümmerhalde; ein im Gačkapolje ungewohnter Anblick. Die Durchmesser der beiden Ponore betragen etwa 40 m. Die Zuleitungskanäle sind in engen Windungen tief in den felsigen Grund gerissen. An den Felswänden, welche am Steilufer aus der Tiefe des Ponors bis zur Hochterrasse empor steigen, sieht man die Hochwassermarke als Grenze eines schmutzig-braunen Belages gegen den weißen Fels. Wenn man im Winter das Tal von einem erhöhten Standpunkt, etwa von der Hochterrasse in km 6·5 aus, überblickt, sieht man den Fluß als schmalen, tief dunklen Streifen, welcher von Hochufer zu Hochufer quer durch die schneebedeckte, glänzend weiße Talsohle zieht. Die beiden Ponorgruppen jedoch erscheinen als schwarze Seen, welche die ganze Breite des Tales erfüllen.

In der folgenden Flußstrecke km 6·7 bis km 8·7 fließt der Gačkaarm nach NW. Die Hochufer sind nicht mehr parallel; es wechseln enge Stellen mit weiten Aussackungen des Talweges. Bedeutend-

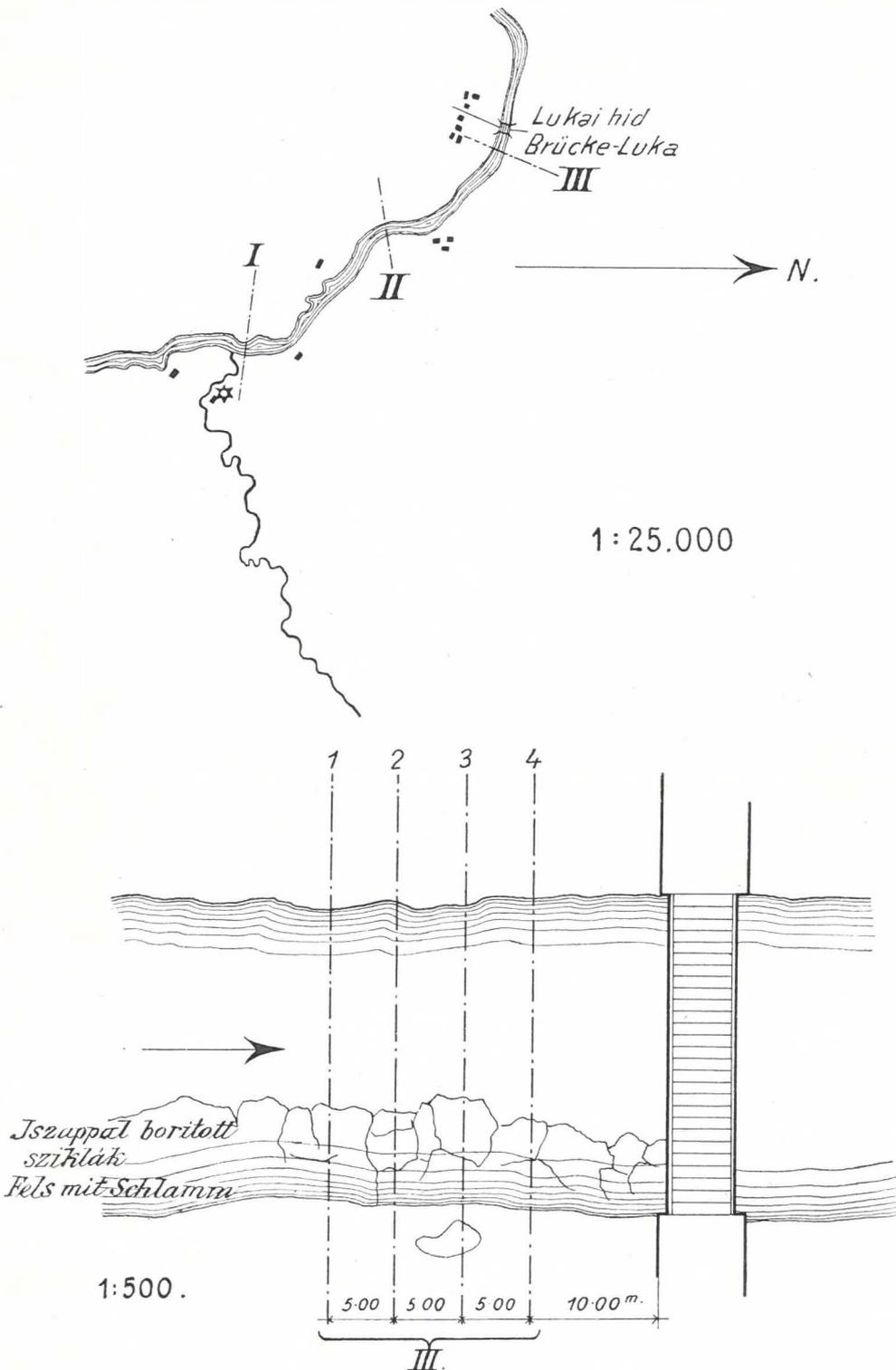


Fig. 10. Situation der am 30. Juli gepochten Querprofile (gemeinsame Gačka); Querprofile III oberhalb Luka-Brücke.

dere Ponore sind nicht vorhanden. Dafür zeigt die bestehende Erosionsrinne ein sehr wechselndes Sohlenlängenprofil. Die tiefsten Stellen, welche immer zugleich mit einer starken Ausweitung verbunden sind, treten fast immer an vorspringenden Felsnasen der Hochufer auf, so daß man sich verleitet fühlt, an Auskolkungen zu denken, welche das starre Hindernis zur Folge hatte, doch ist die Entstehung dieser den normalen Gerinnequerschnitt oft um das 20- und mehrfache über-treffenden Aussackungen durch Kolkung ausgeschlossen. Die felsigen Hänge zeigen außer den Hochwassermarken keine Spuren der Tätig-



Fig. 11. Querprofile zu Situationsskizze Figur 10.

keit fließenden Wassers, die ausbeißenden Schichtköpfe sind polster- und blockförmig abgerundet und zeigen die für den Karst eigentümlichen Riefungen und Rinnenbildungen nach der Fallinie. Das Gefälle beträgt 0·178—0·216%.

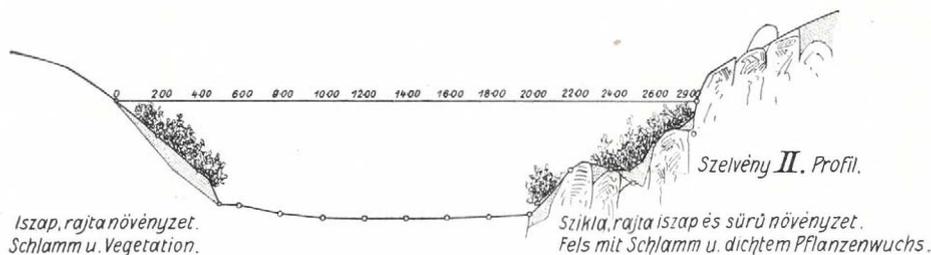


Fig. 12. Querprofil zur Situationsskizze Figur 10.

Die nun folgende Flußstrecke km 8·7—14·8 ist wohl die merkwürdigste.

Nur von zwei großen, halbkreisförmigen Kurven unterbrochen, fließt der Fluß in NW-licher Richtung und bildet in diesem 6·4 km langen Lauf 14 nahezu kreisförmige Seen von 69 bis 100 m Durchmesser. Die Seebecken sind regelmäßig geformt, schüsselförmig, bis 20 Meter tief und wie die Wassermessungen ergeben, nahezu vollkommen dicht. Die Gerinne zwischen den einzelnen Seen haben, wie aus der Tafel und Fig. 16. hervorgeht, sehr geringen Querschnitt und haben ein starkes Gefälle von im Mittel 0·350‰. Der Talboden be-

steht aus sandigem Lehm und weist nur ganz unbedeutende muldenförmige Ponore auf, welche mit dem Flußschlauch in keiner Verbindung stehen und nur zur Zeit der Inundation funktionieren dürften. An einer Stelle, u. zw. in km 7·2, sah ich in der lehmigen Böschung des Gerinnes einen halbverkohlten 59 cm starken Baumstamm durch Erosion bloßgelegt. In km 13·6 wird in einer Höhe von ca 7 m über

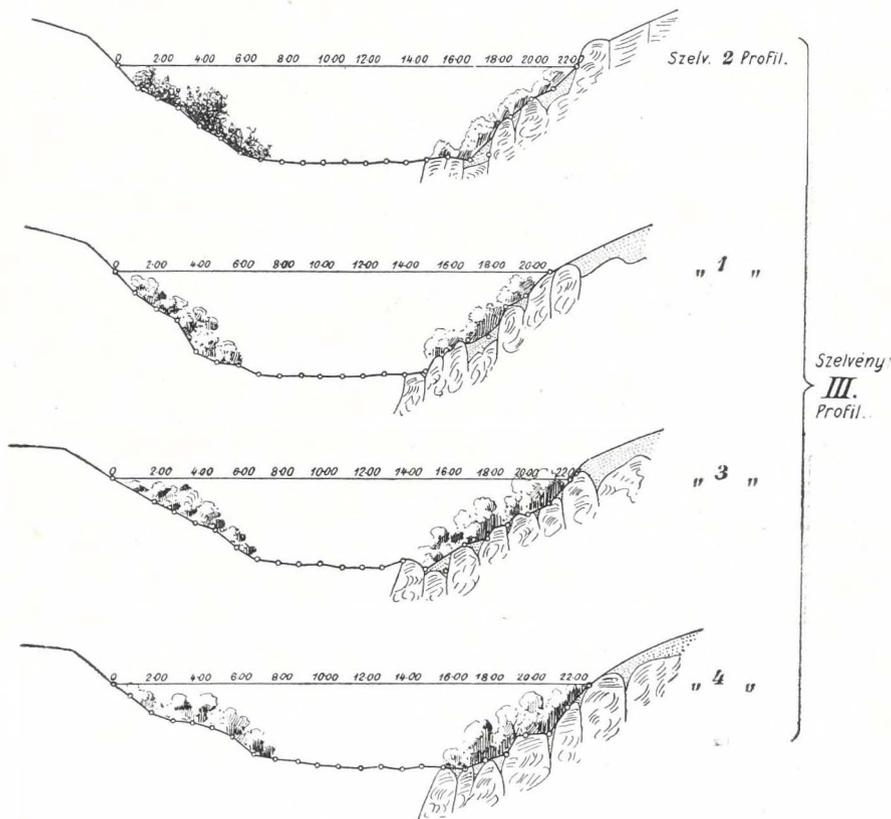


Fig. 13. Querprofil zur Situationskarte Figur 10.

dem bestehenden Wasserspiegel in einem Steinbruch Kalktuff gewonnen mit zahlreichen Blatt- und Stengelresten. Der Kalktuff lagert auf kalkhaltigem etwas sandigem Lehm. Der Kreidekalk, welcher bisher das rechte Hochufer gebildet hatte, scheint nach einer Linie quer über das Tal steil abzubrechen und verschwindet unter den Sedimenten. (Fig. 16.)

Der Fluß ist etwa 12 Meter tief in die Beckenauffüllung eingeschnitten. Die nun folgenden drei Seen besitzen zwar ungefähr ebenso flache Ufer, wie die ersten, sind jedoch unter einander durch ziemlich tiefe,

enge Erosionsrinnen mit steilen, lehmigen Böschungen verbunden. Die Felder, welche die Talsohle bedecken, sehen sehr gut aus und reichen bis hart an die Inundationsgrenze.

Figur 14. gibt eine Situation des Sees XI und des Kalktuff-Aufschlusses.

Vom letzten See in km 14.7 angefangen nimmt die Höhe der Böschungen rasch ab und beträgt kurz vor den Mühlen in km 17.2

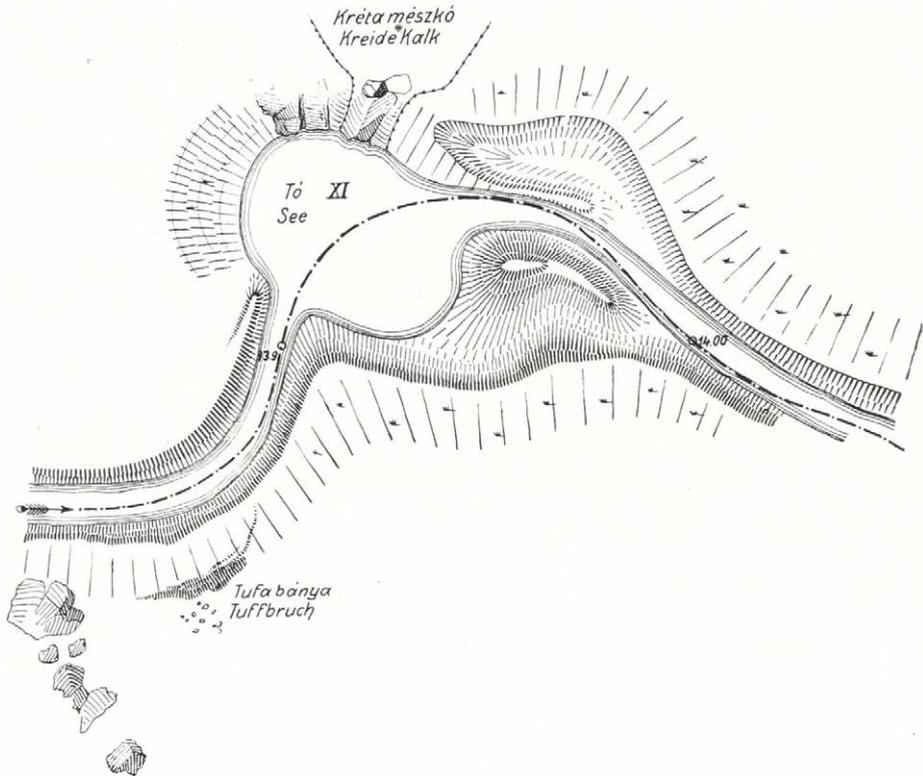


Fig. 14. Plan des Sees XI. in km 13.9.

kaum mehr einen Meter. Links vom Fluß steigt das Ufer, felsig und nur dürftig bewaldet, sanft zur Hochterrasse Dubrava empor. Rechts breitet sich eine weite fruchtbare Ebene, allmählich ansteigend, bis an den Fuß der Velika greda in wohlütigem Gegensatz zur verkarsteten Landschaft des Ostens. Der Osthang des Debelas schließt die Grabensenke ab und der nördliche Gačkaarm durchbricht den Nordoststrand der 485 m Terrasse in enger Schlucht unterhalb der Ortschaft Brlog. Das starke Gefälle, welches diesen Durchbruch begleitet, wird in einer

Staustufe von fünf Mühlen ausgenützt. Aus den Mühlenfludern betritt die Gačka einen engen Erosionsgraben in lehmig tuffiger Talauffüllung, welcher sehr große Ähnlichkeit mit dem bei See XI. geschilderten aufweist. Vielfach sich windend, zieht der Flußschlauch in westlicher Richtung. Die Böschungen sind anfangs sehr steil und nahezu 15 m hoch, werden jedoch rasch flacher und niedriger und bei Brlog fließt die Gačka bei Mittelwasser kaum einen Meter unter dem Terrain.

Bei Brlog gabelt sich der Fluß; ein Teil wendet sich nach dem NNW, strömt über den versumpften, etwa auf 435 m gelegenen Talboden des Gusičpolje, um westlich von der Ruine Gusič gradina zu verschwinden; der Rest fließt in SE-licher Richtung, in den Talboden nur unbedeutend eingetieft, durch eine Talverengung in das Vlaškopolje. Das orographische Bild des Poljes von Brlog ist auffallend genug. Nördlich und südlich vom heutigen Talboden sieht man je eine verkarstete Hochterrasse mit steilem Abbruch, etwa auf Kote 485, in gleicher Höhe mit der Hochfläche Dubrava, 45 m über dem bestehenden Wasserspiegel unterhalb Mühle Brlog und ca 30 m über der Hochfläche des Tales km 5—17 und ca 20 m hoch über den felsigen Partien des südlichen Gačkopoljes. Der aufgeschüttete Talboden hat von Brlog bis Gusičpolje ein mittleres Gefälle von 4·5‰ im Gegensatz zur Flußsohle mit nur 1·5‰. Die Poljensohle ist eben, furchtbar und weist keine Ponore auf.

Der nach Vlaškopolje führende Arm der nördlichen Gačka wendet sich etwa 3·8 km SE-lich von Brlog stacije nach dem Westen, durchzieht in weiten Schleifen eine muldenförmige Eintiefung von sehr wechselnder Breite im Poljenboden, ist in die Talauffüllung nur unbedeutend eingeschnitten und verschwindet am westlichen Poljenende in zahlreichen, unregelmäßig geformten Ponoren.

Die hochgelegenen Teile des Poljenbodens sind fruchtbar und mit Gemüse und Getreide bepflanzt. Das Gebiet rings um die Ponore hingegen ist unfruchtbar und mit den verwesenen, übelriechenden Resten von Wasserpflanzen bedeckt. Die Ponore sind sämtlich Dolinenponore. Regellos über den Muldenboden verteilt, sind sie untereinander durch seichte Rinnen verbunden. Die kleineren Ponormulden sind flach, die größeren besitzen Durchmesser bis zu 25 m und scharfe Bruchränder. Einige von ihnen wurden reguliert, um die Entwässerung des Poljes zu beschleunigen. Offenbar in der Hoffnung, einen Hohlraum anzufahren, wurden kreisrunde Schächte von etwa 6 m Tiefe niedergebracht und vollständig ausgemauert. Selbstverständlich fand man weder einen Hohlraum, noch erzielte man eine nennenswerte Beschleunigung des Wasserabflusses. Man entschloß sich daher, das Inundationswasser

durch einen Kanal in eine westlich vom Polje gelegene und von diesem durch einen Sattel getrennte, mit Lehm ziemlich vollkommen ausgekleidete Karstmulde zu leiten.

Der offene Kanal im Polje durchschneidet eine mächtige Lehmschicht. Der Stollen durchörtert jedoch in den Sattel eine äußerst brüchige eisenschüssige Gangauffüllung, eine noch nicht erhärtete grobe Breccie, was zur Folge hatte, daß die Stollensohle stellenweise um Beträge bis zu 1 m niedersackte. Das Wasser, welches man aus dem Vlaskopolje abführt, versetzt sich demnach schon z. T. im Stollen selbst, der Rest gelangt in einen Ponor hinter dem Sattel. Dieser Ponor befindet sich in einer Mulde von ca 200 m. Er selbst ist länglich, mißt ca 25 m nach der Längsaxe und hat sehr steile Lehmböschungen mit scharfem Rand. Zur Zeit meines Besuches (10. April 1909) floß ca 1 m³, sec aus dem Stollen. Der Ponor war bis etwa 4 m unter dem oberen Rand mit Wasser gefüllt. Der Wasserspiegel befand sich somit ca. 8 m unter dem Wasserspiegel im Inundationsgebiet des Vlaškopolje. Fallen der gut gebankten Kalke im Hintergrund der Mulde 12^h, 15°, am Ostende des Vlaškopolje hingegen, an der Straße, östlich von Kote 633 F. 7^h, 35°.

Wie schon eingangs erwähnt, gabelt sich der Gačkafluß bei Otočac, etwa 16 Kilometer unterhalb der Tonkovičquelle. Der in Figur 7. wiedergegebene Plan aus dem Jahr 1870 gibt ein Bild von der Abzweigung, wie sie seinerzeit bestanden hat. Eine Anzahl von wilden, seichten, vielfach gespaltenen Armen, welche in dem lehmigen Talgrund nur unbedeutend eingetieft sind. Bloß die kurzen, blinden Gräben, welche nach den Ponoren führen, sind tief in die Lehmdecke und zum Teil in den felsigen Untergrund gerissen. Man zählt auf dem alten Plan etwa 12 Ponore auf einer Strecke von kaum einem Kilometer. Zur Zeit der Herbst- und Frühjahrshochwässer war dieses Gabelungsgebiet wochenlang vollständig inundiert, so daß man zur Beschleunigung des Wasserabflusses einen Durchstich vornahm und den Hauptarm mit einem Punkt des südlichen Armes jenseits des Überströmungsgebietes direkt durch den 1.4 km langen, z. T. in die Lehmdecke gegrabenen, zum Teil durch den liegenden Fels gesprengten Karlskanal verband. Die meisten Arme wurden verschüttet; bloß der nördlichste, der Arm von Poljice, wurde belassen. Die sumpfige Einöde des Überströmungsgebietes wurde durch den Karlskanal radikal melioriert und bildet heute eine der fruchtbarsten Partien des Gačkapoljes. Mit den Flußarmen wurden auch die Ponore größtenteils zugeschüttet. Nur die drei Hauptponore wurden belassen und nehmen heute den größten Teil des in den Poljicearm eintretenden Wassers

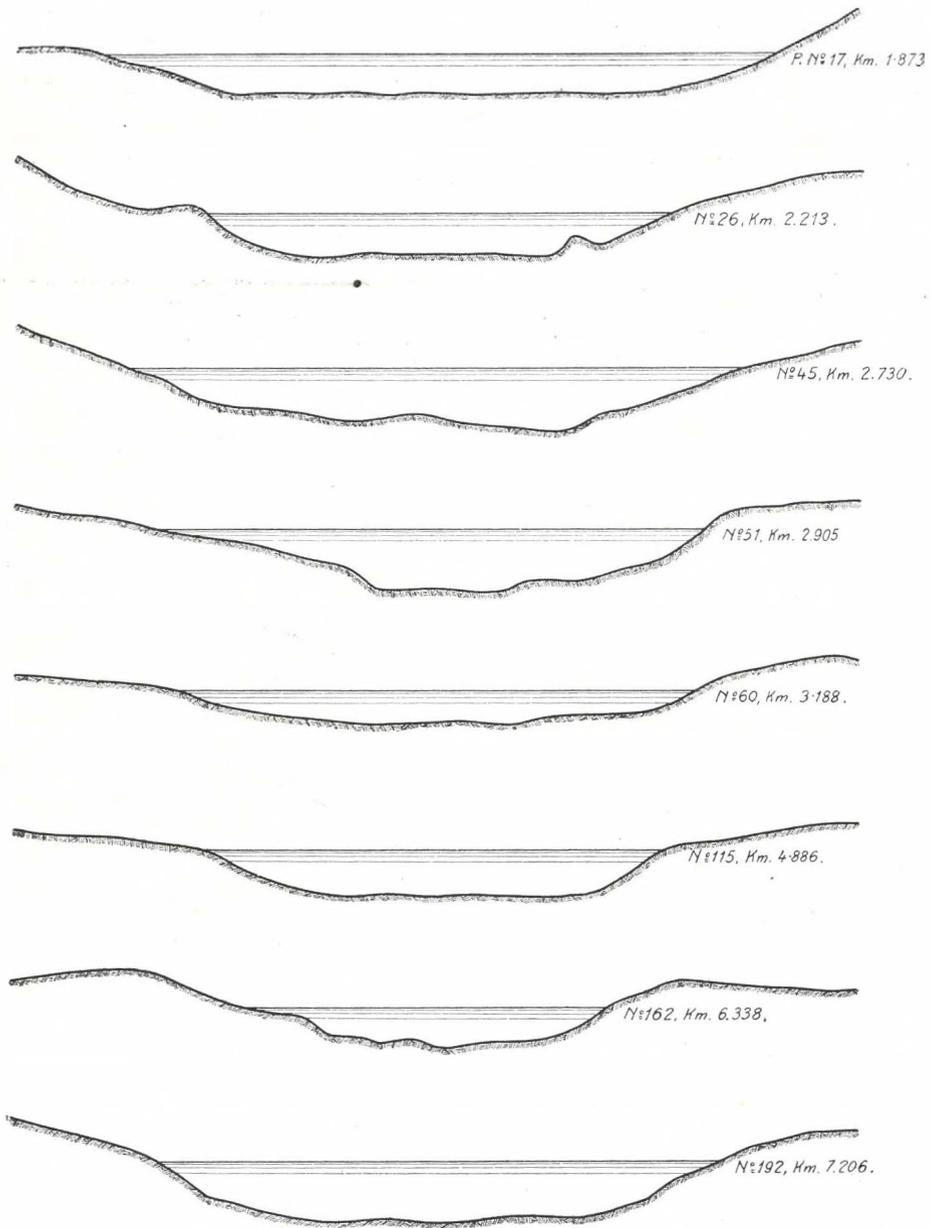


Fig. 15. Charakteristische Querprofile des nördlichen Gačkaarmes. Bezogen auf Mittelwasser I. ($10 \text{ m}^3/\text{sec sec}$ gemeinsamer Arm). Maßstab 1 : 200.

auf. Von den drei Ponoren sind der nördliche und der südliche Dolinenponore, Reihen von tiefen Mulden mit steilen Böschungen, untereinander und mit dem Poljicearm durch einen Kanal verbunden. Die Muldenböden sind mit Gesteinstrümmern bedeckt. Der mittlere Ponor hin-

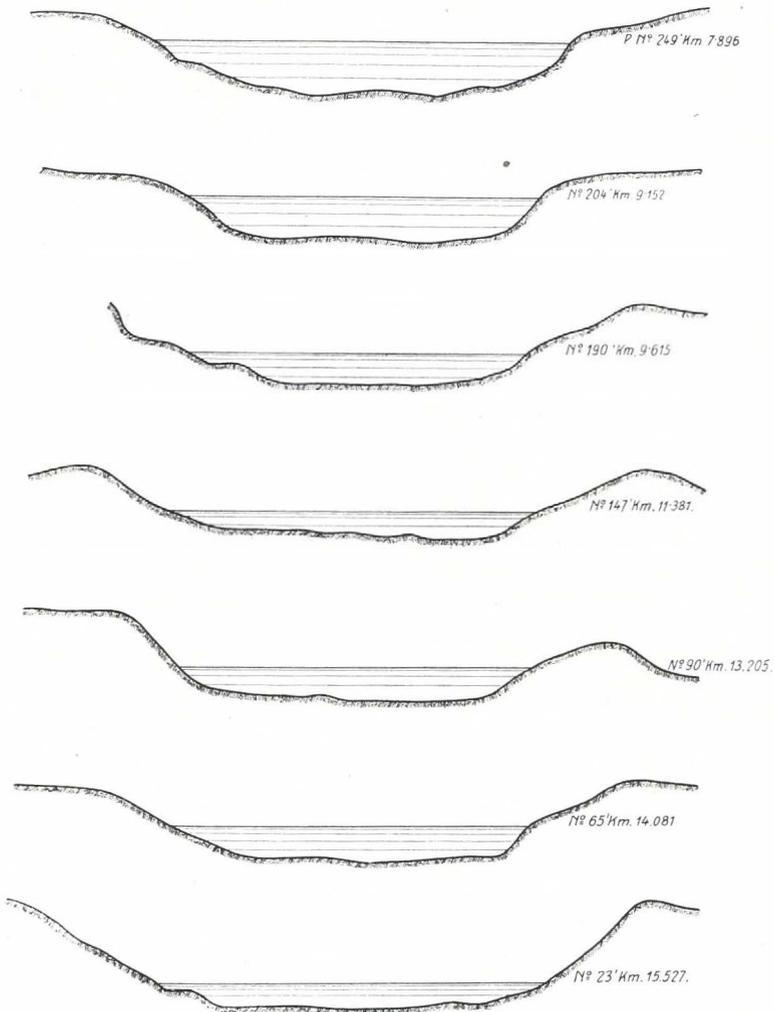


Fig. 15. Charakteristische Querprofile des nördlichen Gackaarmes. Bezogen auf Mittelwasser II. ($10 \text{ m}^3/\text{sec}$ gemeinsamer Arm). Maßstab 1 : 200.

gegen, unweit von der Kirche Poljice, an der Strassenabzweigung nach Svica, ist ein typischer Schachtponor. Ein enger, tief in den verwitterten Kalkfels des Untergrundes gerissener Graben, welcher gegenwärtig von einer Mühle teilweise überbaut ist, führt in einen senk-

rechten Schlot zwischen hochragenden, vertikal gegliederten Felsklötzen. Die Köpfe dieser Felsklötze ragen etwa einen Meter über die Lehmdecke des flachen Bergfußes empor. In den Schlund stürzt das Wasser in freiem Fall.

Östlich von der Mündung des Karlskanales in den südlichen Arm wird in einem flachen Hügel Lehm gewonnen und zu schlechten Ziegeln verarbeitet. Der Lehm ist beinahe sandfrei und umschließt zahlreiche Planorbisgehäuse. Das Lehmlager lehnt sich an den Berghang. Ungewöhnliche Mächtigkeit, Lagerung und Materialbeschaffenheit deuten auf äolische Entstehung dieser Ablagerung. Auch bei Prozor sollen solche Lößhügel auftreten und werden ebenfalls zur Ziegelfabrikation verwendet; doch habe ich dieses Vorkommen nie besucht. Von der Mündung des Karlskanals fließt der Gačkaarm in östlicher Richtung hart am Südrand des Poljes, ungefähr zwei Meter in die Lehmdecke eingeschnitten. Das Gefälle ist nicht unbedeutend. Es beträgt im Mittel 0.7‰ , doch der Pflanzenwuchs im Flußbett ist mindestens ebenso kräftig wie im nördlichen Arm. Stellenweise ist das Wasser durch die dicke Vegetation gestaut und flutet über die dichten Pflanzenbüschel in breiten Wellen hinweg, wie ein Wildbach über Felsblöcke.

Die Bewohner erhalten von der Landesverwaltung für das Mähen dieser unerwünschten Wiesen Prämien. Selbst im Karlskanal, dessen mittlere Geschwindigkeit bei niederem Wasserstand 25 cm sec. beträgt und bis auf einen halben Meter zunimmt, haben sich Wasserpflanzen angesiedelt. Die Zusammensetzung dieser Sohlenvegetation ist in verschiedenen Flußstrecken eine verschiedene. Es scheinen die einzelnen Spezies an bestimmte Geschwindigkeitsverhältnisse gebunden zu sein. Im Dorf Šumecica zweigt ein seichter Graben ab und führt zu einem Schachtponor zwischen steilen Felsen hart am Nordfuß des Šumečicki vrh. Dieser Ponor soll ebenso wie die Pečinaquelle zur Zeit der Likahochwässer trübes Wasser liefern. Nach etwa 4 km langem Lauf betritt der Flußarm den etwas versumpften Westwinkel der im übrigen mit schönen Wiesen bedeckten Ebene von Poljice und verbreitet sich zu einem etwa 1 km langen, 60 m breiten und im Mittel 8 m tiefen Flußsee, indem er den Boden einer flachen lehmbedeckten Mulde überstaut. Der Boden des Flußsees ist dicht, wie mehrere Wassermessungen ergeben haben. Die Ufer sind lehmig, flach und fruchtbar. Am Nordwestende hatte der Fluß seinerzeit die Mulde in mehreren seichten, verwachsenen und versumpften Armen verlassen und hatte sich erst jenseits des Sattels in einer tiefen Erosionsrinne mit starkem Gefälle gesammelt. Die Folge waren Inun-

dationen der Seeufer. Mit einem kurzen Durchstich wurde den lästigen Überschwemmungen abgeholfen. Kurz vor Švica wird der Erosionsgraben von einer steinernen Brücke übersetzt. Im Flußbett liegen zahlreiche Felsblöcke von Faustgröße bis zu einem halben Kubikmeter Inhalt. Eine sehr auffallende Erscheinung, wenn man die unzertalten Berghänge einerseits und das Klärbecken des Obersees andererseits beachtet. Am Haus des Gemischtwarenhändlers Pavelič ist eine alte Hochwassermarke zu sehen. Sie liegt etwa auf Kote 450, somit über dem Normalwasser im Gačkafluß bei Otočac und in der Höhe der Ebene von Poljice. Sie dürfte wohl dem höchsten möglichen Wasserstand des Švicasees entsprechen. Durch das Schützenwehr von Švica betritt der Gačkafluß eine neue Serie von Hohlformen.

Etwa einen Kilometer südlich von Švica streichen drei langgestreckte Bergrücken, Zabrado, Lumbardenik und Čeplist in einer Linie nach Westen und schließen im stumpfen Winkel an den Senjsko Bilo. Am Nordfuß dieser Bergreihe liegen drei längliche, tiefe Mulden und bilden eine Senke, welche von Švica bis an den Senjsko Bilo zieht und dann, parallel zu diesem Gebirgszug nach Nordwesten in eine Reihe von weiten dolinenarmen Niederungen übergeht. Flache Sättel von kaum dreißig Metern relativer Höhe trennen die Mulden von einander. (Vergl. die Tafel und die Fig. 18—19.) Der dichte, dunkle Fichtenwald welcher den Nordabhang des Lumbardenik bedeckt, wird nach einer wagerechten Linie vom Weideboden der Senke abgelöst. Eine mächtige geschlossene Lehmschicht überzieht Hang und Sohle und gibt in weichen, weiten Rundungen alle Unebenheiten des Untergrundes wieder. Besonders klar erkennt man diese für den See charakteristischen Rundungen, wenn sich im Dezember das tief dunkle Wasser des halbgefüllten Sees vom weißen Schnee der glatten Lehne hebt. Die wunderbar ruhig verlaufende Uferlinie als scharfe Kontur der weißen Decke, der unzertalte Hang des Lumbardenik und die geschlossene Masse des Senjsko Bilo vereinigen sich zu einem fremdartigen Bild von grandioser Einfachheit. Wenn im Frühjahr der Wasserspiegel gesunken ist, leuchtet eine Zone von 50 Meter Breite am Nordhang in tiefstem, reinstem Violett über dem Saftgrün der tiefer gelegenen Wiesen. Sie rührt von einer nahrhaften Wickenart, welche in dieser Zone besonders gut und massenhaft gedeiht. Bei leerem Seebecken erkennt man klar die Wirkung der Inundationsdauer auf die Vegetation. Die am längsten inundierte Teile des Beckens sind unfruchtbar und im Hochsommer von einer Schicht verwesender, übelriechender Kryptogamen bedeckt. Spärlicher Graswuchs vermittelt den Übergang zu den prachtvollen, saftigen Wiesen, welche die Hänge bis einige Meter unter

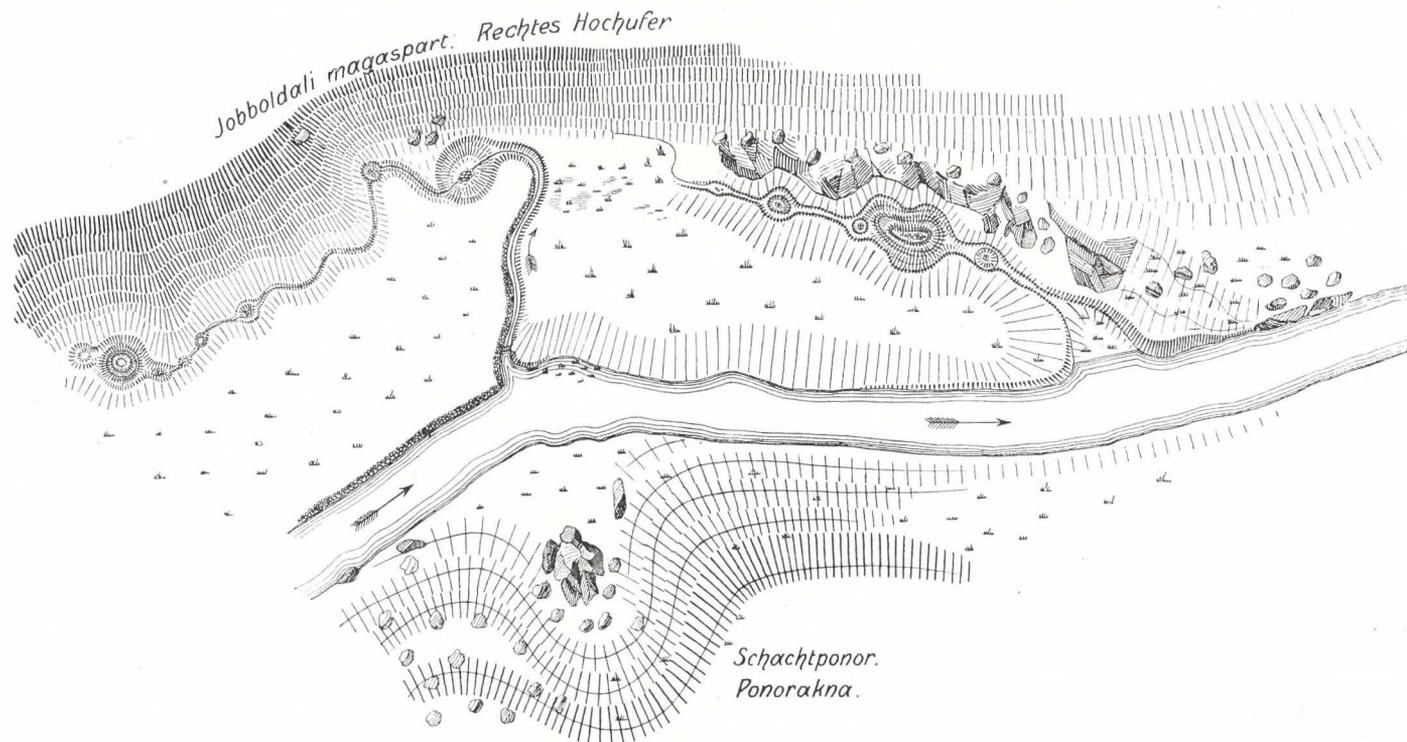


Fig. 17. Ponorlandschaft in km 2·5 des nördlichen Gačkaarmes.

die Inundationsgrenze bedecken. Dann wird der Graswuchs spärlicher und mit der Lehmgrenze beginnt am Südhang verkarstetes Terrain mit trockenen grauen, aromatischen Kräutern und verkrüppeltem Wachholderbusch. Der Nordhang besitzt diese scharfen Grenzen nicht; er ist steiler, felsig und über der Inundationsgrenze mit Fichten bestanden. Wenn man die Senke in halb inundierte Zustand sieht, hält man sie mit ihren geschlossenen, mit Lehm verkleideten und wohlgerundeten Hängen für ein auf künstlichem Weg vorzüglich abgedichtetes Reservoir. Erst wenn das Wasser die Sohle freigibt, erkennt man die zahlreichen Ponore, welche als kleine und größere Dolinen mit trümmerbedecktem, felsigem Boden die Kommunikation mit dem Karstwasser vermitteln. In der nordöstlichsten Ecke läuft der Vordersee in eine spitze Bucht aus, weitet sich aber dann zu einer aus runden, glatten dichten Dolinen zusammengewachsenen Mulde. In merkwürdigem Gegensatz zu der glatten, muschelförmig ausgerundeten, einfarbigen Westhälfte steht die formen- und farbenreiche Ostseite. Mühle steht über Mühle, dazwischen Obstbäume und uralte Weiden. Das Wasser des südlichen Gačkaarmes fließt, nachdem es das Schützenwehr von Švica passiert hat, aus einem Fluder in das andere und stürzt dann, durch dichtbewachsene, pfeilerartige Travertinrippen vielfach zerspalten, in zwei Gruppen von herrlichen Kaskaden in einen gemeinsamen Kessel. Die Fallhöhe beträgt, vom Schützenwehr an gemessen, rund 30 m. Von dem Kessel zieht eine breite, durch die mehrere Meter mächtige Lehmauskleidung des Beckens bis auf den felsigen Untergrund geschnittene Erosionsrinne mit steilen Rändern und starkem Sohlengefälle nach Norden und wendet sich dort, wo sie die gemeinsame Längsachse der Seebecken schneidet, in weiten, immer enger werdenden Windungen durch das Ponorgebiet nach den tiefsten Partien des Seebodens und mündet in eine, selbst den Hochsommer überdauernde Lacke. Kurz vor dem Abschnellen nach Westen ist der Fluß durch eine Trockenmauer abgedämmt und ein tiefer künstlicher Graben führt das gesamte Mittel- und Niedrigwasser nach dem sogenannten Stefanieponor. Der Zweck dieser Abdämmung war, durch Ableitung des Mittelwassers in den absorptionsfähigsten Ponor das Freiwerden des fruchtbaren Seebodens zu beschleunigen. Der Stefanieponor ist ein echter Schachtponor. Sein oberster, scharfer Rand ist kreisförmig und mißt etwa 25 Meter im Durchmesser. Die Wände bestehen aus sehr widerstandsfähigem, kalkdurchsetztem Lehm und sind nahezu senkrecht, wie aus der Seeanfüllung gestanzt. Etwa 8 m unter diesem Rand brechen aus dem Lehm dicke Kalkbänke hervor. Sie sind dort wo sie gut sichtbar sind, relativ schwach zerklüftet und verengen den

Schlund. Das Wasser stürzt aus dem Kunstgerinne in einem starken Wasserfall in die Tiefe. Anfang Februar 1909 verriet mir bei halbvollem See ein Wirbel von etwa 20 cm Durchmesser mit einem in feiner Spitze auslaufenden Trichter die Stelle des Ponors und bewies seine noch bestehende, wenn auch abgeschwächte Schluckfähigkeit. Gegen die Mitte des Monats März war der Wirbel verschwunden. Aus dem See strömte ein Bach in die benachbarte, trockenliegende Mulde. Eisdecken jedoch, welche in viereckige Schollen zerbrochen, die sanften Böschungen der großen Dolinenponore bedeckten, verrieten einen vorübergegangenen Hochstand des Seespiegels. Am 10. April bedeckte der See mit 5 km Länge alle drei Mulden. Sein Spiegel stand etwa auf Kote 430. Gegen Ende Mai war der Vordersee nur mehr halb voll. Der Stefanieponor lag frei, doch stand das Wasser in seinem Schacht etwa 7 m unter dem Rand. Die zweite Mulde war ebenfalls halbvoll und wurde vom Vordersee durch einen Bach gespeist. Im Hochsommer lagen sämtliche Mulden trocken und in den letzten Novembertagen war die Füllung des Vordersees etwa bis Kote 420 gediehen und der Hauptponor war nicht mehr sichtbar. Der zweite See war noch trocken. Eine Begehung des Stefanieponors durch den Bezirksingenieur Herrn ZVETKO WURSTER erbrachte den Beweis, daß der Ponor mit keinem unterirdischen Flußlauf durch eine Höhle kommuniziert. Der Ponorschacht geht etwa 20 m senkrecht in die Tiefe, setzt sich in einer schrägen Höhle fort und löst sich in zahlreiche schmale Klüfte auf. Am Grund des Ponors soll aus einer Spalte in der Felswand ein starker Wasserstrom gekommen sein, welcher sich jedoch mit der Höhle im Gestein verlor. Die Lehmschicht

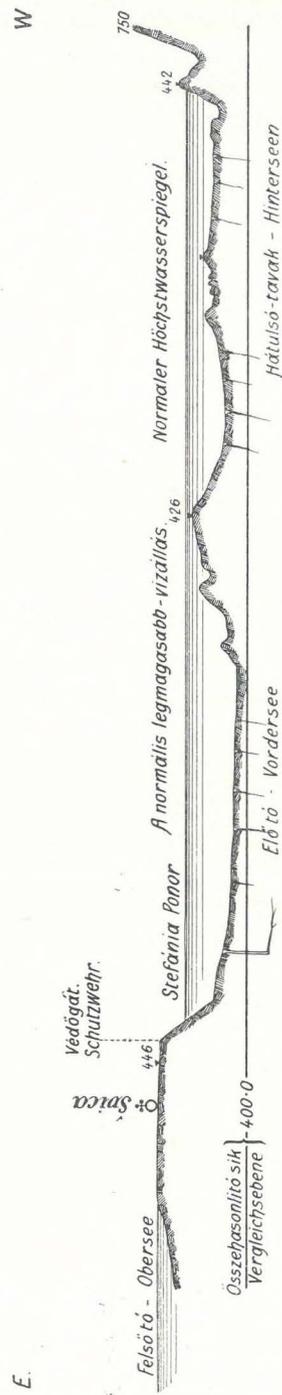
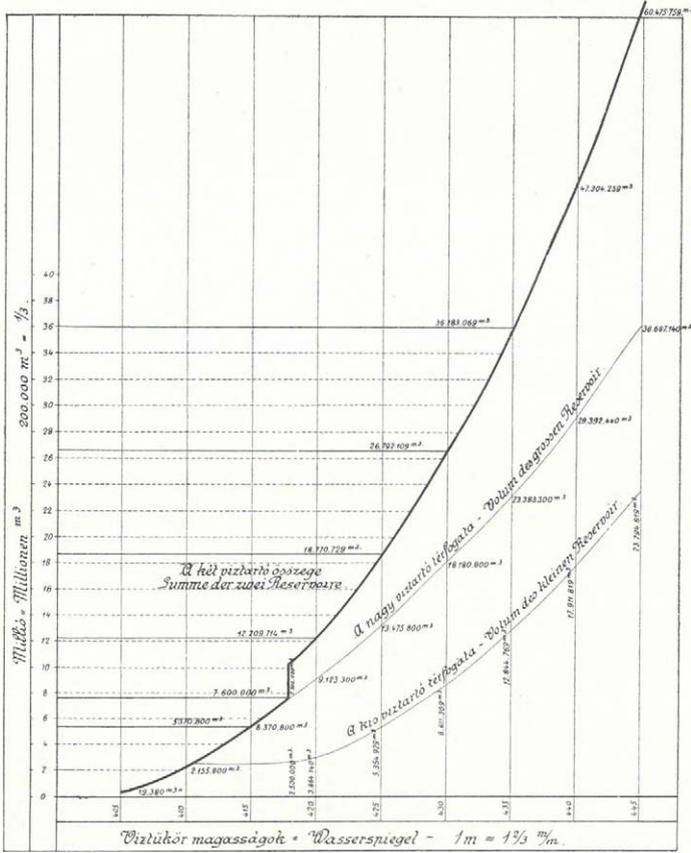


Fig. 18. Längenschnitt durch den Svicasee; Länge zur Höhe: 10:1.

bedeckt den felsigen Untergrund des Seebeckens in einer Mächtigkeit, welche zwischen einem und zehn Metern schwankt. Sie setzt etwa an der Schichtenlinie 425 ab und weist nach mehreren Schichtenlinien tieferer Niveaus unbedeutende Absätze auf. Die Ponore, welche am Boden des Vordersees auftreten, sind größere und kleinere Dolinenponore mit



in gebogenen Mulden ist weit weniger auffallend, dafür sind oft mehrere Dolinen zu einer gemeinsamen, tiefen Senke zusammengewachsen. Die Saugstellen am Grund dieser Senke sind durch Lehmschwellen oder Lehmrippen getrennt und verraten sich durch eine lose Anhäufung von mehr oder weniger kantigen Gesteinstrümmern. Die Dolinenränder sind teils flach, teils scharf. Die Lehmauffüllung der Hinterseen unterscheidet sich von der hellgelben, festen kalkhaltigen Auskleidung des Vordersees durch ihre bröselige, weniger widerstandsfähige Beschaffenheit und durch ihre rötlichgelbe Farbe. Die ersten beiden Mulden sind durch einen quer durch den trennenden Sattel gesprengten künstlichen Kanal mit einander verbunden. Das Gestein, welches an den Kanalwänden ansteht, ist auffallend eisenschüssig und brüchig. Vor der Ausführung dieses Durchstiches füllte sich die zweite Mulde erst durch Überströmung des auf Kote 426 liegenden Sattels.

Mit der Mulde von Švica durch kein oberirdisches Gerinne verbunden, liegt etwa zwei Kilometer nördlich vom Mühlendorf ein kleines Becken von etwa 700 m Länge und 300 m Breite, der Kojnsko jezero. Durch seine glatten lehmbedeckten Formen und durch seinen grasbewachsenen Boden hebt sich das Becken scharf von den etwas felsigen und nadelwaldbedeckten Hängen. Die Sohle wird von einer vielfach gewundenen, tiefen und breiten, langgestreckten Mulde durchzogen. Am Grund dieser Mulde finden sich genau so wie in den Hinterseen des Švicabeckens zahlreiche Dolinenponore. Die Höhenlage des Beckenbodens dürfte zwischen 421 und 400 schwanken. Ebensowenig wie in den Hinterseen, konnte ich im Kojnsko jezero Schachtponore entdecken. Ungefähr zur Zeit des Švicasee-Höchststandes wird das Becken durch Ponorwasser inundiert. Interessant ist die Tatsache, daß in dem periodischen See eine kleine dunkle Fischgattung auftritt, welche die Lika bevölkert, dem Flußgebiet der Gačka hingegen und wahrscheinlich auch dem Švicasee fehlt. Dieser Fisch wird von den Bewohnern der Umgebung im Frühjahr in großen Mengen gefangen.

4. Wasserführung des Gačkaflusses.

Zur Feststellung der Wasserführung des Gačkaflusses wurden in den Monaten August bis Dezember 1909 teils vom Verfasser, teils von seinem Assistenten Herrn Ing. STELZER in acht verschiedenen Flußprofilen insgesamt 38 Wassermengenmessungen vorgenommen. Die Messungen erfolgten bei Niedrigwasser mit dem Ganserschen Taschenflügel, bei Hochwasser mit einem größeren, von Ort in Kempton gelieferten Flügel, beide mit elektrischer Zeichengebung. Der Flußlauf

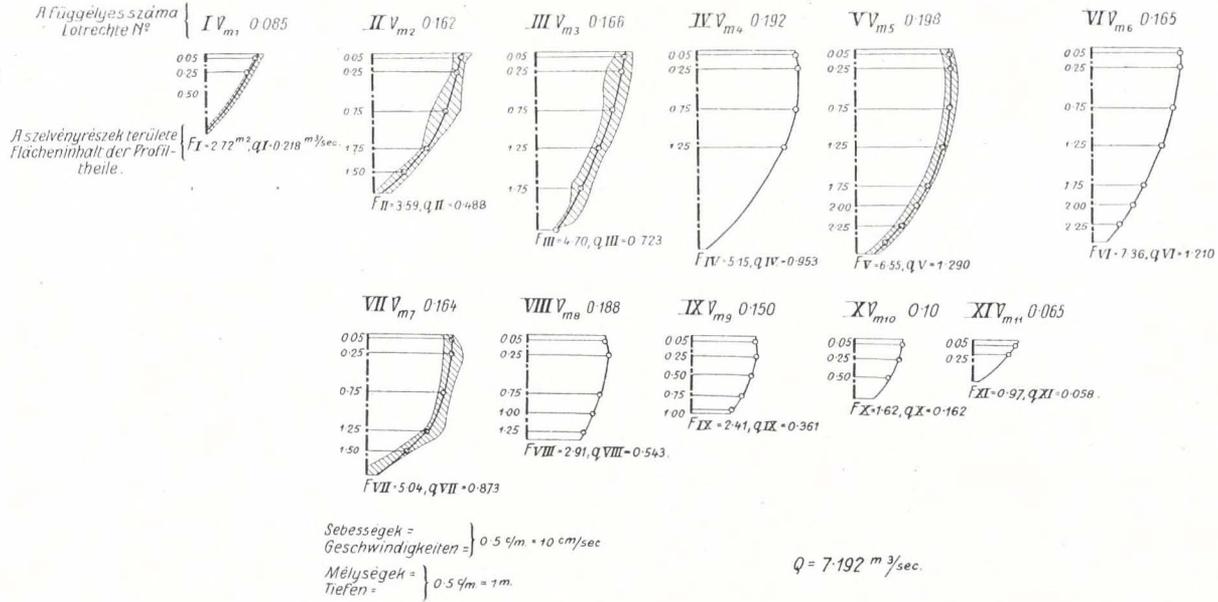


Fig. 20. Wassermessung No 16 Prozor, Meßprofil α , September 1909, Pegel Luka : 50.5.

wurde zu beiden Seiten des Meßprofils auf einer Strecke von je 5 m von Pflanzen und Steinen gesäubert. Je nach der Profilsgröße wurde die Wassergeschwindigkeit in fünf bis elf Vertikalen zu vier bis acht

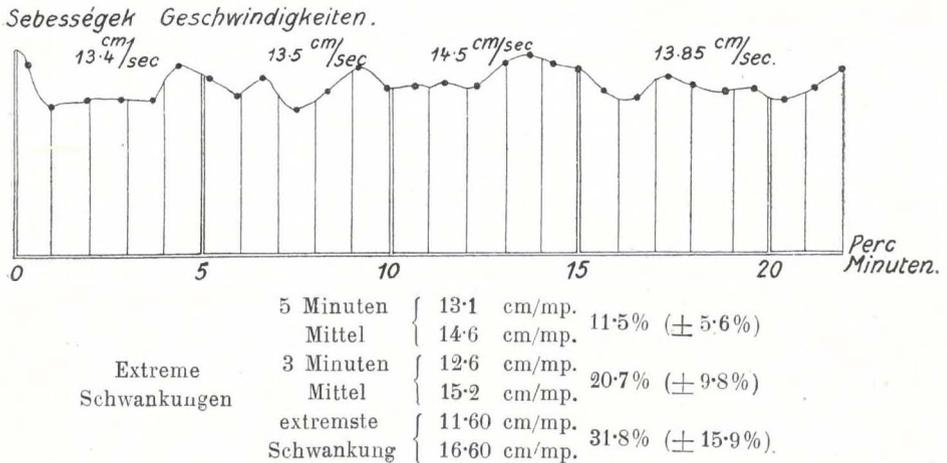


Fig. 21. Schwankungen der Wassergeschwindigkeit während eines Zeitraumes von 22 Minuten. 26. September Nördlicher Arm.

Punkten gemessen. Schwierigkeiten bereiteten der Kalkgehalt des Wassers, ferner die besonders bei Niedrigwasser minimale Geschwin-

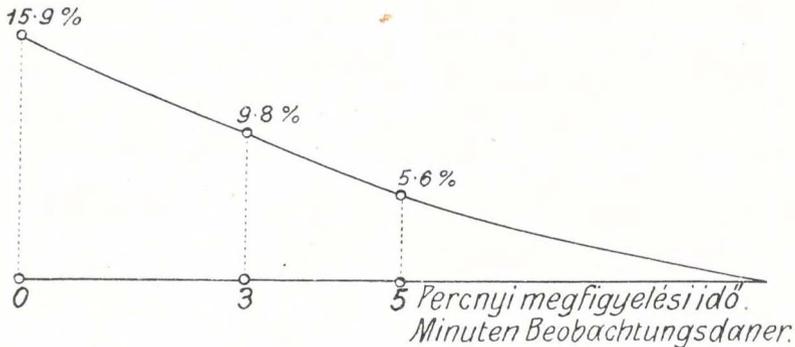


Fig. 22. Genauigkeit der Beobachtungsergebnisse bei verschiedener Beobachtungsdauer.

digkeit sowie das außergewöhnlich starke Variieren der Geschwindigkeit in einem und demselben Profilsunkt, drei Umstände, welche für träge Poljenflüsse charakteristisch sind. (Fig. 20—22) Die Geschwindigkeitsschwankungen selbst sind fast unberechenbar, wie aus dem Graphikon

ersichtlich. Ich erkläre sie mir als eine Resonanzerscheinung u. zw. aus der Verstärkung der normalen Pulsationen durch die geschlossenen Pflanzenmassen, welche als mehr oder weniger isolierte Partien, rhythmisch schwingend, wulstartig in den strömenden Wasserkörper eingreifen. Durch die hydrometrischen Erhebungen wurden erstens die Zusammenhänge zwischen den Pegelständen im Hauptarm und der Wasserführung und zweitens die Wasserverluste festgestellt. (Fig. 23.) Die Konsumtionskurve des gemeinsamen Armes in Verbindung mit dem seit Oktober 1907 an einem Pegel neben der Brücke Švica, seit Sommer 1908 auch an einem Hauptpegel an der Brücke Luka in der gemeinsamen Gačka Tag für Tag vorgenommenen Pegelablesungen ergeben ein klares und interessantes Bild des Flußregimes. Die vom kgl. ungar. meteorologischen Institut in Agram eingeholten Daten dienen dem Vergleich zwischen den Niederschlagsmengen und zwischen den oberflächlich zum Abfluß gelangenden Wasserquantitäten. Wichtig war die Auswahl der Ombrometerstationen. Es kommen für den Vergleich nur solche des mutmaßlichen Einzugsgebietes in Betracht. Das Einzugsgebiet kann nur zwischen den drei Stationen Gospić im Likapolje, Udbina im Krbavapolje und Otočac im Gačkapolje liegen. Die Beobachtungsdaten dieser drei Stationen dürften hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit etwa gleichwertig sein. Sie sind die Grenzen, zwischen welchen die wahren Werte liegen. In den Figuren 24 und 25 findet man die Abflußmengen und Niederschlagsgraphikons. In folgender Tabelle hingegen sind die jahreszeitlichen Mittel für 1908 übersichtlich nebeneinander gestellt.

1908	Mittlere Monatsniederschläge in			Mittlerer Monatsniederschlag im Einzugsgebiet	Mittlere sekundliche Abflußmenge in m ³
	Otočac	Gospić	Udbina		
Frühling ---	93·7	151·5	179·3	141·5	15·06
Sommer ---	71·8	92·3	87·2	84·8	7·38
Herbst ---	49·4	76·6	76·4	67·5	3·96
Winter ...	—	180·0	—	180·0	8·85

Wasserverluste wurden weder im Hauptarm noch im südlichen Teilarm konstatiert. (Der kleine Kanal, welcher bei Šumecica abzweigt und nach einer Ponormühle führt, war infolge von Renovierungsarbeiten am Mühlengebäude abgesperrt.) Das Meßprofil im S-lichen Arm befand sich beim Einlauf des Karlskanales. Die Parallelmessungen im südlichen

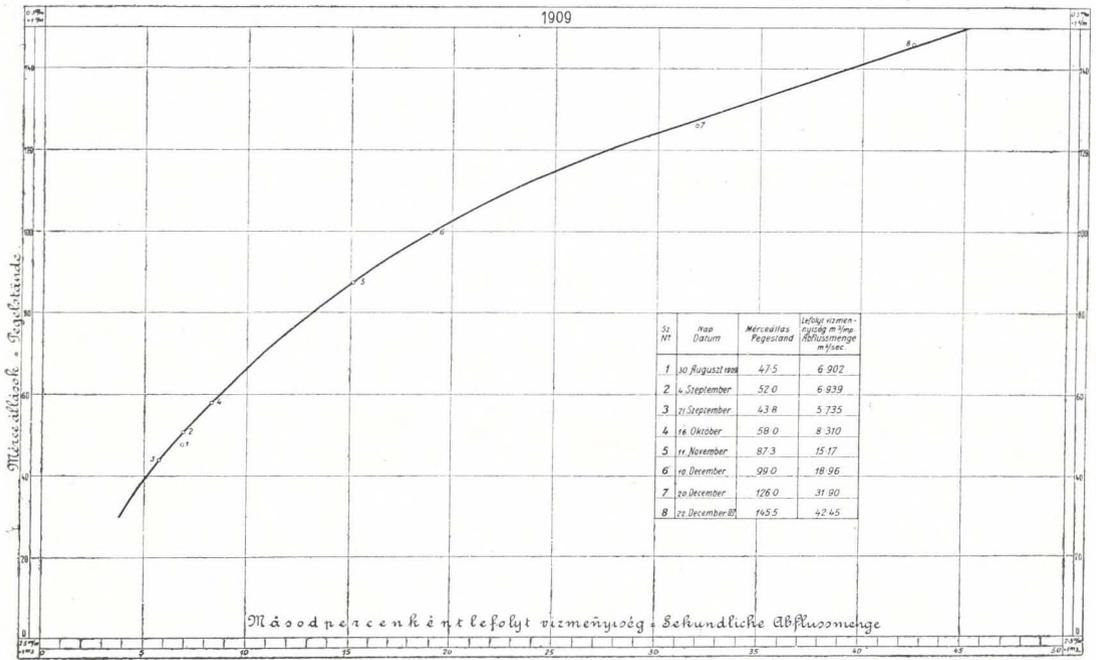


Fig. 23. Konsumtionskurve für den Gačkafluß bezogen auf Pegel Luka.

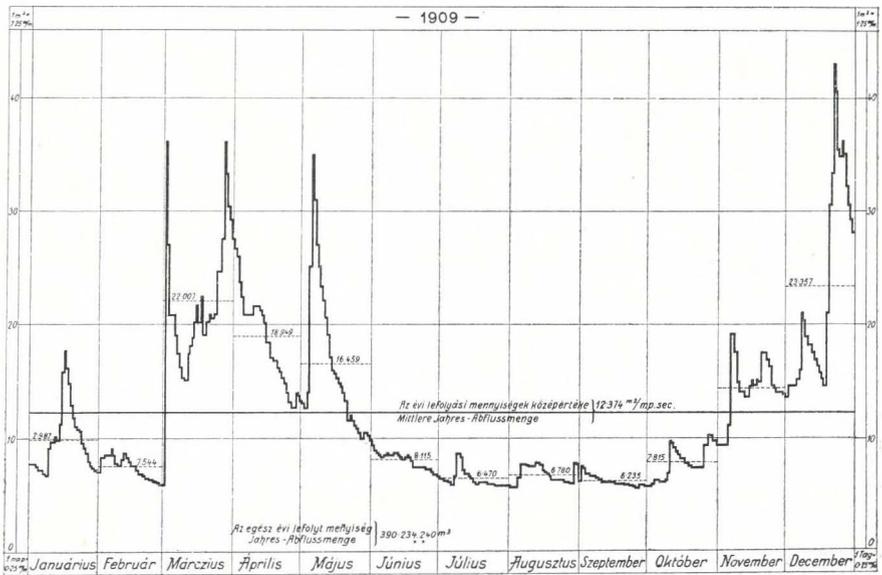


Fig. 24. Wasserführung des Gačka-Flußes.

Arm wurden hart an der steinernen Brücke von Švica durchgeführt und erbrachten einen Beweis für die Dichtigkeit des Obersees. Hingegen sind die Wasserverluste im nördlichen Arm sehr bedeutend, In nachfolgender Tabelle bedeuten: q die in den Arm eintretende Wassermenge, q_1 den Verlust in m^3 sec, q_2 den Verlust in Prozenten von q .

q m^3/sec	q_1 m^3/sec	q_2 %
1.3	0.8	62
3	1.0	33
5	1.4	28

Die erste der angeführten Messungen wurde Anfang September durchgeführt, die letzte Mitte Dezember, unmittelbar vor dem ersten großen Hochwasser. Die Zunahme der absoluten Wasserverluste ist auf die Überstauung von Ponoren zurückzuführen, welche bei Niedrigwasser mit dem Flußschlauch nicht kommunizieren, ferner auf den größeren Wasserdruck, unter welchem die Sohlen der noch absorptionsfähigen Ponore stehen. Die Verluste beschränken sich jedoch beinahe ausschließlich auf die ersten 7.2 km des Flußarmes (von der Abzweigung des Karlskanals an gerechnet). Ab km 7.2 ist der Flußschlauch und mithin auch die unter hohem Wasserdruck stehenden Flußdolenen dicht.

5. Das Quellgebiet von Sv.-Juraj.

Auf der kurzen Küstenlinie von Sv.-Juraj bis Ždralova, also etwa dort, wo die Verlängerung des Likatales von Kosinj die Meeresküste schneidet, am Ausgang der Senke, in welcher die Straße von Sv.-Juraj in südöstlicher Richtung nach Krasno zieht, brechen zahlreiche Süßwasserquellen teils am Ufer, teils im Meer hart an der Küste aus dem Gebirgsfuß hervor. Die Zahl und außergewöhnliche Mächtigkeit der Quellen deuten auf unterirdische Wasseradern, welche einen Landstrich von sehr bedeutender Ausdehnung entwässern. Bei dem größtenteils submarinen Charakter der Quellen läßt sich die gesamte Wasserführung nicht einmal annähernd schätzen. Wohl aber ist die Küste Sv.-Juraj-Ždralova das einzige zusammenhängende Quellgebiet von Bedeutung (wenn man von einzelnen Ausnahmen Jablanac etc absieht),

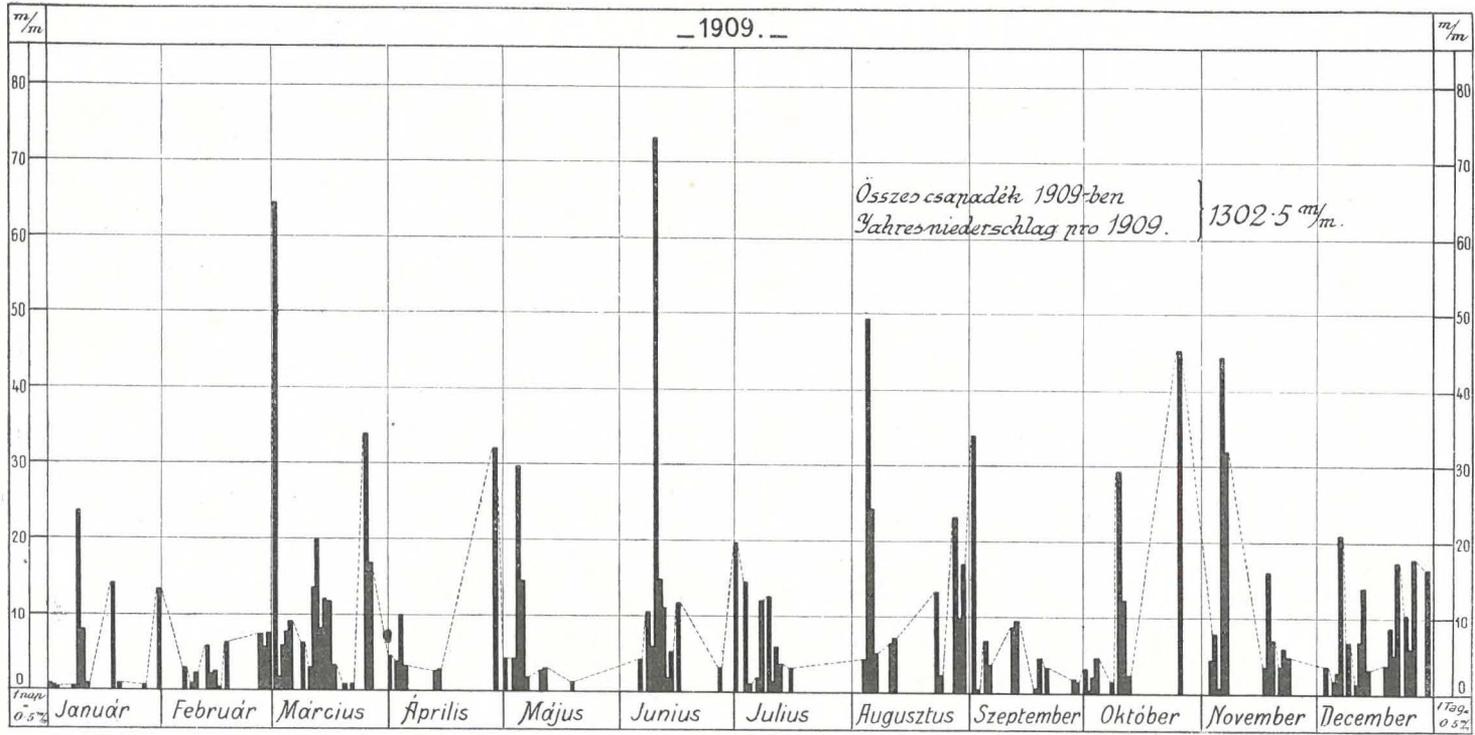


Fig. 25. Atmosphärische Niederschläge in der Ombrometerstation Otočac.

längs der Küste, welche neben dem Gačka- und dem Likapolje von Kossinj verläuft.

Schon auf der Dampferfahrt Novi-Zengg fiel mir auf, daß der orographische Charakter der Berglandschaft in der Gegend von Sv.-Juraj sich plötzlich ändert. Von Novi bis Sv.-Juraj das Bild einer kahlen Steilküste mit ziemlich einförmigem und wenig gegliedertem Hinterland. Südlich von Sv.-Juraj hingegen schiebt sich kulissenartig nach dem Velebitkamm ansteigend, Berg hinter Berg. Das häufige Auftreten von Rückfallkuppen charakterisiert geradezu den Küstenstrich. Eine tief eingeschnittene Torrente mündet bei Sv.-Juraj, ein Längstal bei Valle Moling; die Hänge sind vielfach zerschnitten und gegliedert. Dieser Anblick in Verbindung mit dem mir bekannten Auftreten von Süßwasserquellen veranlaßten mich damals, meine Begehung des Arbeitsgebietes bei Sv.-Juraj zu beginnen. Im Strassenanschnitt von Zengg bis nach Sv.-Juraj findet sich ein dichter hellgrauer Kalk. Bei Zengg deutlich geschichtet (F. 16^h, 35°), stellenweise geborsten und sehr eisenschüssig (Steinbruch unweit Schloß Nehaj); zwischen Zengg und Valle Spasovac vielfach weiß geädert. In Valle Spasovac Einlagerungen von Kalkschiefer. Fallen 19^h, 30°. Bei Valle Ujča setzt die sonst sehr deutliche Schichtung aus. Das Gestein an der Steilküste ist zum Unterschied von dem gesunden Fels bei Valle Spasovac brüchig, eisenschüssig, das Ufer von der Brandung vielfach unterspült. 400 m südlich davon unweit vom Ufer eine Süßwasserquelle. Vor Grabova setzt die Schichtung wieder deutlich ein, Wechsellagerung von grauem und gelbem feinkristallinem Kalk. Auf dem Berghang von Zengg bis Sv.-Juraj zwischen den Kalkköpfen und Kippen Schutt und Grus. Die HAUERSche Karte verzeichnet von Zengg bis Sv.-Juraj Kreidekalk, Prof. CVIJIČ in seinem Begehungsbericht vom Jahr 1908 von Zengg bis zum östlichsten Punkt der Küste (Straßenkote 9) Kreidekalk, von dort bis Sv.-Juraj Hallstätterkalk, von Sv.-Juraj an weiße Kreidekalke. In Sv.-Juraj ändert sich die Gesteinsbeschaffenheit vollständig, an die Stelle des grauen, homogenen Kalkmaterials tritt ein hellgelber, fein rot geädertes Fels, der stellenweise den Charakter einer Kalkbreccie annimmt. Dieses Gestein dürfte mit großer Wahrscheinlichkeit der jüngeren Kreide angehören. Schutt und Grus fehlen dem Berghang, die aus den Hängen brechenden Felspartien sind massig, die Oberflächen sind nach der Falllinie fein gerieft. Auf der kleinen Halbinsel 400 m südl. Sv.-Juraj ist das Gestein, ein dunkelgrauer einfärbiger Kalk, derart in feinste messerscharfe Kämme und Grate zerschnitten, daß ein Passieren beinahe unmöglich ist. An der Grenze zwischen den beiden petrographisch verschiedenen Gebieten liegen die nördlichsten Quellen, die

«Brunnen» von Sv.-Juraj, 3 gefaßte Küstenquellen von geringer Ergiebigkeit und etwa 5 unterseeische Ergüsse unweit von den Brunnen. Von Sv.-Juraj erstreckt sich das Quellgebiet etwa 4 km weit nach dem Süden. 300 m südlich von den Brunnen, in der Bucht bei der oben erwähnten, kleinen, karrenbedeckten Halbinsel 4 unterseeische Quellen. Sie erscheinen bei leicht bewegter See als ölglatte Flecken. Eine davon, die Kola, ist so mächtig, daß sie von einem Ruderboot nicht durchfahren kann. Sie maß zur Zeit meiner Begehung etwa 6 m im Durchmesser. Ferner das «Voda Stergatušta», ein zwischen dem Strandgeröll einer kleinen Bucht hart an der Küste hervorsprudelndes kleines Gewässer. Dann die Quellen des «Valle Molini». Valle Molini ist ein Längstal, welches die Küste unter spitzem Winkel schneidet und in eine tief eingeschnittene Meeresbucht ausläuft. Etwa 200 m von der Küste entfernt entspringt aus einer ponorartigen Vertiefung eine Quelle, deren Wasser mit ca 2 m Gefälle ein Vollgatter und 3 Mühlsteine treibt. Ich schätze ihre Wasserführung auf 1 m³ sec. Von weit größerer Bedeutung sind hingegen die im Meer entspringenden Quellen. Ich zählte 14—16, deren Kreise sich gegenseitig verschneiden und zu einem Süßwassersee von unregelmäßiger Form verbinden. Der Durchmesser der stärksten Quelle beträgt etwa 20 m, die Tiefe nannte man mir mit 15 m. Diese Angaben lassen auf eine sehr bedeutende Mächtigkeit der Quellen des Valle Molini schließen. Weitere Quellen brechen hervor im Valle Dumboka und in Valle Ždralova. Die Quelle von Dumboka entspringt landeinwärts und ihr unbedeutendes Wasser fließt träge in einem algenverwachsenen Kanal in die Bucht. Die seinerzeit in das Gerinne eingebaute Mühle ist bereits aufgelassen. Von größter Bedeutung für die Beurteilung der Natur des unterirdischen Süßwasserstromes, welchem die Quellen ihre Entstehung verdanken, sind einige Angaben, welche ich dem Herrn v. KRAJACZ in Zengg, sowie dem Mühlenbesitzer Herrn WIDMAR aus Sv.-Juraj verdanke. Das Minimum der Wasserführung ist gegen das Eintreten der Trockenheit in den Poljen um etwa 6 Wochen verschoben, umgekehrt machen sich die Hochwässer der Lika erst 6 Wochen später in der Wasserlieferung der Quellen geltend. Das Versiegen der Quellen schreitet von Sv.-Juraj nach dem Süden fort, in der entgegengesetzten Reihenfolge treten die Quellen wieder in Tätigkeit. Die Quellen von Valle Molini und von Dumboka (diese trotz ihrer Schwäche) versiegen nie.

6. Entstehung des Gačkopoljes.

GRUND unterscheidet in seiner «Karsthydrographie» drei Sorten von «Poljen»: Tektonische Poljen, Ausräumungspoljen und Aufschüttungspoljen und wendet sich in seiner Abhandlung sehr entschieden gegen die Auffassung des Herrn Prof. Cvijić,¹ welcher auch den großen Karstpoljen nur eine tektonische *Veranlagung* in Form *einer* Bruchlinie zugestehen will und im übrigen nebst der chemischen Abtragung und der mechanischen Einebnungstätigkeit der Flüsse, welche nach Ablauf des ursprünglich die Hohlform erfüllenden Sees entstehen, eine wichtige, wenn nicht sogar die entscheidende Rolle zuschreibt. Während also GRUND die Poljen als Bruchstücke einer alten, vor der Senkung durch die Tätigkeit von Flußläufen erzeugten, großen Einebnungsfläche betrachtet, führt Cvijić die Poljen ebenfalls auf Flußwirkung, jedoch in der bereits orographisch vorgezeichneten Hohlform zurück.

Daß das Gačkopolje tektonisch im Terrain vorgezeichnet ist, läßt schon ein Blick auf die Karte vermuten. Man sieht, daß die Hohlform gerade dort auftritt, wo das SSE-lich streichende Senjskobilo, dessen Kammstreichen übrigens mit dem Schichtstreichen beinahe zusammenfällt, in zahlreiche Käme, Malikosa, Velikikosa, Kuterevskakosa, sich auflöst und nach ESE, im Lumbardenik sogar nach E abbiegt. An den Rändern des Gačkopoljes sind ferner zahlreiche Verwerfungen nachweisbar, u. zw. eine E—W-liche über Otočac—Švica-Ponore, eine N—S-liche über Staro selo und Westfuß des Berges Prozor, mehrere in NW—SE-licher Richtung am Westfuß der Krekovaca ungefähr parallel zum Tale des nördlichen Gačkaarmes, welches Tal die Poljen von Otočac und Brlog verbindet. Die bedeutendste Verwerfung scheint jedoch die Poljen in nahezu gerader Linie in einer Erstreckung von 30 km von der Tonkovič-Quelle bis Rapaindol zu durchziehen, wobei sie jedoch die Hügelkette von Prozor vom eigentlichen Polje trennt. Nach dieser Verwerfung grenzen bei Rapaindol die meerwärts fallenden dunklen, Guttensteinerkalke an die lichten, wahrscheinlich der Kreideformation angehörenden Kalke der Terrasse von Brlog. Eine Verwerfung scheint ferner senkrecht zur Längsachse des Poljes die Pečine-Quelle und die Majerovskavrelo zu verbinden und verrät sich an den beiden Quellen durch eine große, lockere eisenschüssige Gangbreccie, wie ich sie so oft an den jüngeren Verwerfungen im Dragatal beobachten konnte. Eine ebenfalls mit Breccien ausgefüllte Verwerfung

¹ «Das Karstphänomen.»

durchschneidet etwa in E—W-licher Richtung das Srbsko Kompolje und trifft die westliche Umrandung am Südfuß des Vodenjak, wo sie sich beim Vortrieb des Entwässerungsstollens so unangenehm bemerkbar gemacht hat. Längs einer Verwerfungskluft senkrecht zur Tonkovič-Rapaindol-Linie stoßen nördlich von Gusič gradina die dolomitischen Hallstädter Kalke an den dunklen Guttensteiner Kalken ab. Eingehende Untersuchungen würden wahrscheinlich noch zahlreiche Verwerfungen nachweisen, welche, wie obige Zusammenstellung zeigt, teils die Ränder des Poljes begleiten, teils das Polje queren. Ihre netzförmige Anordnung, sowie die Tatsache, daß das durch die Lehmbedeckung konservierte Polje¹ wesentlich tiefer liegt, als die bergige denudierte Umgebung, läßt es zumindest als sehr wahrscheinlich erscheinen, daß man es mit einem Senkungsfeld zu tun hat.

Unabhängig davon wirft sich jedoch die Frage auf nach der Entstehung des ebenen, nur ganz lokal von Sedimenten überlagerten Poljenbodens. Wenn man, etwa von der Spitze des Berges Prozor, das Polje überblickt, so gewinnt man unwillkürlich den Eindruck, als habe man es mit einem Bergland zu tun, welches durch Akkumulation eingeebnet wurde, so daß nur die höchsten Spitzen aus dem Schwemmland ragen. Besonders charakteristisch sind die Umrandungen des Beckens. Obzwar sie sich scharf aus der Ebene heben, zeigen sie nirgends die Spuren von Erosionsarbeit, welche auf einen Poljenfluß zurückgeführt werden könnte. Der Grundriß des Poljes ist die Schichtenlinie eines stark denudierten Berglandes. Wenn man in der Karte 1:75,000 die 500 m Schichtenlinie durch Farbe hervorhebt, erkennt man diese Tatsache sehr klar, wengleich sie sich im Bild, welches man von einem erhöhten Standpunkt aus empfängt, noch handgreiflicher aufdrängt.

Daß man es im gegebenen Fall mit dem tiefgesunkenen Rest einer alten Einebnungsfläche zu tun hat, ist ganz ausgeschlossen. Es müßten die Bruchränder des Senkungsfeldes genau mit den Rändern einer alten Talweitung koinzidiert haben. Die ganze Umgebung des Gačkapoljes ist ein Bergland, in welchem relative Höhen von 200, 300, 600 Metern mit ganz unregelmäßig verteilten Mulden und Tälern wechseln. Die Annahme, daß die stehen gebliebene Einebnungsfläche auf das Ärgste zerstört wurde, während der abgesunkene Teil eben blieb, ist ebenfalls unhaltbar. GRUND hebt die konservierende Eigenschaft der flächenhaft wirkenden Denudation hervor. Warum soll sie nur im Polje flächenhaft gewirkt haben? Der Poljenboden war niemals

¹ Siehe S. 108 u. ff.

durch limnische Ablagerungen bedeutenden Umfanges derart bedeckt, daß man dieser Zuschüttung die Konservierung einer primären Ebene zuschreiben könnte. Es bleibt somit nur die Möglichkeit einer Einebnung des Poljenbodens durch Ausräumung.

Professor Cvijić, der Schöpfer der Ausräumungstheorie, führt die Einebnung des Poljenbodens auf die mechanische Tätigkeit der Flußläufe zurück. Ich muß gestehen, daß ich zum mindesten in dem von mir studierten Poljengebiet der erosiven Tätigkeit der Flüsse nicht einmal eine untergeordnete Rolle zuschreiben kann.¹ Man muß bedenken, daß dem Karstfluß, ein solcher müßte das erodierende Gewässer wohl gewesen sein, die beiden wichtigsten Faktoren zur mechanischen Tätigkeit fehlen, das Gefälle und die Geschiebeführung. Es fehlt dem Karstfluß die Dreiteilung in Oberlauf, Mittellauf und Unterlauf, welche jeder aktive Fluß, wenn auch zuweilen in mehrfacher Wiederholung aufweist und aufweisen muß, nachdem sich drei Abschnitte wechselseitig bedingen. Eine mechanische Ausräumung von solch gewaltigem Umfang wie eine Poljenausräumung würde erstens eine bedeutende Schuttanreicherung im Gewässer des Quellgebietes erfordern und zweitens eine Deponie von bedeutender Ausdehnung für das in Schutt zerfallene abgetragene Gebirge. Davon ist keine Spur. Das Wasser kommt filtriert in den Vaucluse-Quellen zum Vorschein und hat niemals Schotter abgesetzt, nachdem es infolge eines minimalen Gefälles nie Schotter führen konnte. Die ganz lokal auftretenden Schotterlager, welche durch die Gruben von Sinac und Podum aufgeschlossen sind, wurden offenbar im Diluvium von Torrenten aus dem Randgebirge gebracht. Das bedeutende Quergefälle des Poljes gestattet diese Annahme. Die gegenwärtigen klimatischen Verhältnisse lassen im Randgebirge keine mächtige Schneedecke zustande kommen, daher auch keine bedeutenden Wildbachhochwässer infolge Schneeschmelze; die Einwanderung von Schotter in das Polje hat infolgedessen aufgehört. Die Abhänge des Veljun vrh und des Vučjak vrh nördlich vom Quellgebiet der Gačka lassen schluchtartige, steile Wasserrisse erscheinen, welche heute niemals Wasser führen und deren Entstehung nur durch das rasche Auftreten von Wassermengen erklärt werden kann, welche selbst der poröse Kalkfels nicht verschluckt, Wassermengen, wie sie etwa durch das rasche Schmelzen von bedeutenden Schneedecken hervorgebracht werden. Die Schotterdeponien von Sinac und Podom sind aber auch die einzigen im ganzen Polje.

Wenn aber einem Fluß sowohl zugeführter als auch selbst-

¹ Siehe auch die eingehende Behandlung der Erosion im 8. Kapitel.

erzeugter Schotter fehlt, so fehlt ihm jeder plausible Grund zum Verlegen seines Flußbettes, zum Mäandern. Das Mäandern wird bedingt durch Auflandung von Sinkstoffen in den Konkaven. Wenn das Material zur Auflandung fehlt, so wird der Fluß sein Bett beibehalten und im besten Fall eine Erosionsschlucht¹ bilden, wie man dies an der Korana, an der Reka, an der Una und an vielen anderen Karstflüssen beobachten kann. Das Ausräumen weiter Poljen würde eine immerwährende und bedeutende Verlegung des Flußbettes involvieren. Das kann aber der Fluß aus den oben angeführten Gründen nicht. Wenn man das Längenprofil des Likaflusses betrachtet, so sieht man, daß er auf einer Lauflänge von 20 km im freien Polje auf der Strecke zwischen Bilaj und Kaludjerova ein Gefälle von insgesamt 6 m aufweist. Auf dem 12 km langen Lauf quer durch das nördliche Randgebirge des Likapoljes senkt sich sein Wasserspiegel um 64 m, sein Lauf durch das Polje von Kossinj weist auf 14 km ein Gefälle von 5 m auf. Man sieht aber, daß der Fluß gerade dort, wo er eine gewaltige Erosionsarbeit geleistet haben soll, ein minimales Gefälle besitzt und in der Durchbruchsstrecke durch das Randgebirge mit dem Gefälle von 64 m fließt er in einem bescheidenen Erosionstal, welches auch nicht eine einzige poljenartige Erweiterung aufweisen kann. Und doch erfolgt beim Übertritt des Flusses aus dem Polje in das Erosionstal kein nennenswerter Wechsel in der Gesteinsbeschaffenheit des durchströmten Gebietes. Wenn man ferner das Längenprofil des Gačakflusses studiert, so kommt man ebenfalls zur klaren Überzeugung, daß man es mit einem Gewässer zu tun hat, welches sich gegebenen orographischen Verhältnissen anpaßt, so gut es eben ging und welches kaum imstande ist, in der einen Akkumulation zu erodieren.

Eine Reihe von Erscheinungen beweist dies sehr deutlich. Zunächst im gemeinsamen Arm die Flußbarre bei der Einmündung des P. Sv. Marka (Fig. 8—9.) welche die Flußtiefe nahezu auf ein Drittel reduziert, ohne angegriffen zu werden. Ferner das Überströmungsgebiet von Otočac. Die Flußtiefe nimmt auf der kurzen Strecke von kaum 200 m von 6 m auf 1 m ab u. zw. infolge Ablagerung lehmiger und schlammiger Sedimente, während zahlreiche, kaum in das Terrain eingeschnittene Arme nach W abzweigen. Diese hochinteressante Erscheinung im Sohlenlängenprofil, welche auf die geologische Geschichte

¹ Ich verwende hier und auch an späteren Stellen den Ausdruck «Erosionsschlucht» etc. in Ermangelung eines besseren Ausdruckes; werde jedoch zeigen, daß eigentliche «Erosion» nicht stattgefunden hat, sondern bloß chemische Auslaugung.

des Flußes ein helles Licht wirft, werde ich an späterer Stelle sehr ausführlich behandeln. Daß man es tatsächlich mit Sedimenten und nicht mit einer Abdämmung durch Verwerfung zu tun hat, wurde beim Bau der steinernen Brücke in Otočac in den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts schmerzlich empfunden. Die Brückenwiderlager wurden, trotzdem der Fels im Nachbargelände ansteht, unter großen Schwierigkeiten 5 m in Schlamm niedergebracht, weitere 6 m wurden pilotiert. Trotz dieser tiefen Fundierung stürzte die Brücke kurz nach Fertigstellung infolge Nachgebens der Widerlager ein. Auch die Piloten der Spitalsbrückenjoche haben den Fels nicht erreicht.

Das nach Švica hin abfließende Wasser sammelt sich vor dem Dorf im sogenannten «Obersee», durchbricht den in SE—NW-licher Richtung streichenden Bergrücken und stürzt eine etwa 35 m hohe Steilstufe in das Seebecken hinab, bewegt sich also durchwegs in Hohlformen, deren Entstehung man sich wohl kaum durch die Tätigkeit fließender Gewässer erklären kann. Dagegen fließt die nördliche Gačka, ganz analog der Durchbruchsstrecke des Likaflusses in einem typischen, 50 bis 100 m breiten Erosionsgraben, weist etwa das 3·7-fache Gefälle der Poljenstrecke Quelle bis Otočac auf (die Gefällstufe Brlog ist künstlich erzeugt) und hatte die Kraft, die im Poljenboden des Längstales höchstwahrscheinlich durch tektonische Verschiebungen hervorgerufenen Gefällsbrüche durch Eintiefung zu überwinden und ein einheitliches Längenprofil zu erzielen. Auf solche Gefällsbrüche deuten die mächtigen, porösen, mit Stengel- und Blattresten reichlich durchsetzten Tuffablagerungen auf dem tuffigen Lehm zwischen Zakule und Brlog. Trotzdem aber sieht man, wie das Längsprofil durch die Gefällsverhältnisse des primären Senkungstales bedingt wurde. Es nimmt nämlich das Flußgefälle von Otočac aus gegen Brlog allmählich zu, wobei das Tal von Otočac bis Brlog durchwegs im Kreidekalk verläuft und keine wesentlichen Schwankungen in der Gesteinsbeschaffenheit aufweist.

Wenn nun die mechanische Erosion die «Erosionsrinnen» und ihre Entstehung nicht erklären kann, muß man die chemische Erosion, die Auslaugung, heranziehen. Eine ganze Reihe von Beobachtungen spricht zu Gunsten dieser Annahme.

In der Flußstrecke von Tukljace bis Brlog durchfließt, wie schon eingangs erwähnt wurde, der nördliche Gačkaarm eine lange Reihe kreisrunder Seebecken, welche nur als Dolinen gedeutet werden können. In der ganzen Gegend findet man kaum eine einzige Doline von so bedeutenden Abmessungen, wie sie von den so zahlreichen Flußdolinolen aufgewiesen wird. Die Dolinen sind offenbar im Poljenboden

schon vorhanden gewesen bevor sie noch vom Fluße durchströmt wurden und gleichzeitig mit der Auslaugung des Talweges erfolgte auch die Niedertiefung und Ausweitung der Dolinen. Einfurchung des Talweges durch mechanische Erosion hätte Geschiebeführung bedingt. Terrainsenken von den bedeutenden Abmessungen der Flußdolinien hätten als Klärbecken gewirkt und wären unbedingt verlandet worden. Nach Verlandung der Dolinen wäre Akkumulation von Sand und Schotter im nächsttieferen Polje erfolgt. Statt dessen finden wir ausgeweitete Dolinen, Tuffablagerungen, kalkhaltigen Lehm, und Löß und weder im Gusićpolje noch im Vlaškopolje konnte ich Deponien von Sand und Schotter entdecken. Die Annahme einer Eintiefung der Talfurche auf chemischem Wege könnte trotzdem etwas unwahrscheinlich wirken, wenn nicht die direkte Beobachtung sehr zu ihren Gunsten sprechen würde. Bei den zahlreichen Wassermessungen, welche ich mit dem Ganserschen Flügel im Gačakfluß vornahm, konnte ich sehr zu meinem Unbehagen bemerken, daß die tiefer gelegenen Wasserschichten mit Kalk gesättigt sind. Während bei den Geschwindigkeitsbeobachtungen in den oberen Wasserschichten das elektrische Lätwerk tadellos funktionierte, selbst bei halbstündiger Dauer der Signalgebung, mußte ich bei den Beobachtungen in den untersten Schichten, oft schon nach einer halben Minute, regelmäßig aber nach 3 Minuten, den Flügel hochziehen und reinigen. Die Kontaktfeder des Lätapparates inkrustierte sich derart mit Kalk, daß die Signale ausblieben und falsche Beobachtungsergebnisse waren oft die Folge. Diese Kalkanreicherung mußte im Flußlauf selbst erfolgen, denn nirgends konnte ich an den Quellen Tuffablagerungen finden, obzwar dort das Wasser über künstliche Stauwehre frei niederfällt. Wo hingegen der Fluß nach längerem Lauf eine Stufe passiert, bei den Wasserfällen in Švica, bei den längst verschwundenen Stufen von Zakule, an den Stauwehren sämtlicher Mühlen von Brlog, finden sich bedeutende, oft viele Meter mächtige Tufflager.

Eine wichtige Rolle bei dieser Auslaugungstätigkeit des Karstflusses dürfte die dichte Wasserpflanzenvegetation bilden, welche von den Quellen bis zu den Ponoren die Flußsohle bedeckt und zuweilen das Durchflußprofil auf die Hälfte reduziert und bei Niedrigwasser das Wasserspiegelgefälle des nördlichen Armes in eine Unzahl von Gefällsstufen zerlegt. Das Auftreten dieser reichen Vegetation ist einerseits durch das minimale Gefälle des Flusses bedingt, liefert aber andererseits durch die Verwesung Produkte, welche die Lösungsfähigkeit des Wassers erhöhen. Während das umliegende Terrain nur zur Zeit der atmosphärischen Niederschläge mit lösungsfähigem Wasser in

runge kommt, arbeitet das durch die Verwesungsprodukte und Säuren gesättigte Flußwasser ununterbrochen an der Abtragung. Auf diese Weise können im Kalk Erosionswirkungen hervorgebracht werden durch Gewässer, welche bei weitem nicht über so viel Gefälle verfügen, um eine mechanische Erosionsarbeit leisten zu können.

Es ist aber auch klar, daß ein solches chemisch erodierendes Gewässer weniger die Tendenz haben wird, in die Tiefe, als vielmehr bis zu einer gewissen Grenze in die Breite zu erodieren. Die Sohle wird nach Ablauf eines jeden Hochwassers verschlammt, mit Lehm gedichtet und der Fels wird der chemischen Einwirkung entzogen, während die Böschungen frei bleiben. Wir finden daher die Breite des nördlichen Gačkatales mit 50 bis 100 m bei relativ geringer Tiefe, wir sehen auch an den Hängen nirgends die sonst so charakteristischen Spuren mechanischer Erosion. Die Hochufer zeigen dort, wo sie steil und felsig sind, massige, runde, block-, polster- und wulstartige Formen, genau so, wie man sie etwa in den Dolinen der dichtbewaldeten «Uvala» bei Zútalokva vorbrechen sieht, welche letztere gewiß keiner mechanischen Erosion ihre Entstehung verdanken. Zur Zeit des diluvialen Rückganges der mittleren Jahrestemperatur werden wohl die Hochwässer infolge Schneeschmelze viel katastrophaler gewesen sein, als dies heute der Fall ist. Auch die Verdunstungsverluste, welche im Karst eine sehr bedeutende Rolle spielen, mußten stark hinter den heutigen zurückbleiben. Es konnte daher eine bedeutendere Wassermenge oberflächlich zum Abfluß kommen. Die Wassergeschwindigkeit war größer, der Talweg wurde freigehalten und das Wasser konnte sowohl auf der Sohle als auch an den Böschungen lösend wirken. Mit der Ausbildung der heute bestehenden Abflußverhältnisse ging auch die Wassergeschwindigkeit in der Erosionsrinne zurück und die Sohle des alten Talweges wurde durch Sedimentation von festem gelbem Lehm allmählich aufgehöhht. Eine Folge dieser sekundären Aufhöhung sind die merkwürdigen Querprofile im gemeinsamen Gačkaarm, wie sie Fig. 11—13 zeigt. Nahezu ebene Sohle von bedeutender Breite und steile, zum Teil felsige Böschungen. Die Profilsformen sind von außerordentlicher Regelmäßigkeit und ganz unabhängig von Kurven. Nur dort erweitert sich das Flußbett, wo die Rinne eine alte Doline passiert. Durch diese Lehmlage ist der Talweg derart gedichtet, daß meßbare Wasserverluste nicht auftreten.

Dem südlichen Gačkaarm, welcher, wie schon erwähnt, wahrscheinlich sehr jungen Datums ist, fehlen die charakteristischen Eigenschaften des gemeinsamen Hauptflusses. Der Talboden im Tal des nördlichen Gačkaarmes hingegen besteht vollkommen aus festem, gelbem

Lehm und der Fluß schlängelt in seinen eigenen Sedimenten von einem Ufer zum andern. Bei Zakule fließt er in mehreren Windungen in einer tiefen Erosionsrinne, wobei er die mächtige Tuffdecke bereits durchschnitten und in die lehmig-kalkigen Sedimente des Liegenden sein Bett gegraben hat. Während in den ersten 7 km seines Laufes zahlreiche Ponore auftreten, sind in den folgenden 8 km bedeutendere Wasserverluste nicht zu konstatieren, trotzdem am Boden der Flußdولين Wasserdrücke von 15 und mehr Metern auftreten. Das Flußbett ist eben vollkommen gedichtet.

Vorstehende Ausführungen dürften zur Genüge bewiesen haben, daß man den Fluß für die Entstehung eines gewaltigen, ebenen Poljebodens von 15 km Länge und 5 km Breite nicht verantwortlich machen kann. Der tiefgesunkene Rest einer alten Einebnungsfläche kann das Polje auch nicht sein, wie ich bereits eingangs erwähnt habe. Es gibt somit nur noch eine einzige Möglichkeit, die Entstehung des Gačkapoljes zu erklären, u. zw.: das Niedersinken in Verbindung mit der Denudation, wobei jedoch das Niedersinken, wenigstens im eigentlichen Gačkapolje, nur eine gewissermaßen sekundäre Rolle gespielt haben dürfte.

Die Denudation ist, trotz ihrer langsamen Fortschritte, in ihren Wirkungen nicht zu unterschätzen. Hören wir diesbezüglich die Aussprüche unserer Karstforscher. GRUND sagt in seiner «Karsthydrographie» auf S. 198: «Das Gebirge ist infolge der vielseitigen Zerstörung durch Abtragung und Zerstückelung eine große Ruine. Es verrät in seiner Oberfläche nur wenig den Schichtenbau, wie schon PENCK hervorhebt. Die Bewegungen waren bereits vor der Diluvialzeit längst zum Stillstand gelangt.» Man bedenke nun: Die Erosion ist im Karst nahezu ausgeschaltet. Die Denudation ist nach obigem Zitat ein eminent formenbildender Faktor, wie die unzähligen, vielgestaltigen abflußlosen Hohlformen beweisen. Die Konservierung von Ebenen kann infolgedessen nur dann erfolgen, wenn der formenbildende Faktor des Karstes, die Denudation, auf der Ebene selbst ausgeschaltet ist. Und daß sie es de facto ist, will ich versuchen in Nachstehendem darzutun.¹ In der Uvala bei Žutalokva sieht man z. B. sehr klar, was die Denudation an Formenbildung und Abtragung leisten kann. Es ist dort, von dichtem Buchenurwald bedeckt, Doline an Doline. Die Durchmesser der Dolinen betragen bis zu 120 m, ihre Tiefen bis zu 40 m. Es wurden jedoch nicht bloß die Dolinen niedergebracht, sondern auch die zwischen

¹ Die eingehendste physikalisch-chemische Begründung erfährt dieser Satz im 8. Abschnitt.

ihnen stehen gebliebenen Kämme denudiert. Wenn man ferner die abflußlosen Becken in der Kapella nordöstlich von Plitvice in Betracht zieht, ferner die tiefen Kesseltäler im Gebirge zwischen Laas und dem Zirknitzersee, um nur einige drastische Beispiele zu nennen, welche mir aus eigener Anschauung bekannt sind, so wird dem Gedanken an Denudationsbeträge von zwei- bis dreihundert Metern das Absurde genommen. Ich habe speziell die Dolinen der Uvala bei Žutalokva eingehender studiert, nachdem sie für die dort projektierten Bauarbeiten von Bedeutung sind, und bin zu der Überzeugung gekommen, daß die Urwaldvegetation, welche die Dolinenlandschaft überwuchert, eine sehr wesentliche Rolle bei der Entstehung der Dolinen gespielt haben muß.

Gesetzt den Fall, es wären zwei unbedeutende und unregelmäßige Vertiefungen im Boden, beide ganz gleich, nur wäre die eine in bewaldetem, die andere in kahlem Terrain. Beide seien denselben atmosphärischen Niederschlägen ausgesetzt. Bei der ersten, im Wald befindlichen Vertiefung wird das meteorische Wasser vom Humus aufgesaugt wie von einem Schwamm. Ein Teil wird durch die Vegetation verdunstet, der andere Teil wird hingegen mit Säuren gesättigt, im Humus niedersitzen und erst am tiefsten Punkt der Mulde entlassen werden, gerade so wie ein nasser, auf den Tisch gelegter Schwamm nicht auf den Seiten rinnt, sondern erst unmittelbar auf der Tischplatte. Im tiefsten Teil der Mulde werden die säuregesättigten Wässer in den porösen Kalk übertreten und durch Auflösung die Sohle tiefer und tiefer legen. Dieser Prozeß, sehr oft wiederholt, zieht die Entstehung einer Doline nach sich. Die Ausbildung der Gehänge hält mit der Tieferlegung der Sohle gleichen Schritt, genau so, wie die Ausbildung der Gehänge in einem Erosionstal, wo der Neigungswinkel durch den natürlichen Böschungswinkel des Verwitterungsproduktes, in vorliegendem Fall der Humuserde, bestimmt ist. Die Dolinenformen in der oben zitierten Uvala sind nach Querprofil und Hangneigung derart kongruent, daß eine Orientierung fast unmöglich ist. Die zuweilen anzutreffende Asymmetrie der Dolinen ist sehr begreiflich, denn der Gleitwinkel von Humus auf Schichtflächen ist unter Umständen ein anderer als der Gleitwinkel auf Schichtköpfen. Die Folge davon ist Asymmetrie der Doline nach dem Schichtstreichen, Symmetrie nach dem Fallen. Mit dem größeren oder geringeren Maß der Klüftung des Kalkes am Grund der supponierten Mulde hat die Entstehung der Doline gar nichts zu tun, so groß ist in einigermaßen gestörtem Gebirge die Klüftigkeit immer, um das allmählich niedersitzende, im Humus aufgespeicherte Wasser zu absorbieren. Ich konnte auch in meinem Arbeitsgebiet nirgends zeilenförmige Anordnung von Dolinen konsta-

tieren. Wenn eine solche irgendwo auftritt, so kommt dies von der primären orographischen Veranlagung dieser Zeile, indem die Oberflächenverwitterung nach dieser Linie eine leichte Längsmulde schaffen konnte, etwa in gelockertem Gestein zu beiden Seiten einer Verwerfung, nicht aber von der größeren Wasserabsorptionfähigkeit dieser Mulde. Es müßte doch sonst der kluffreichste, durchlässigste Kalk am meisten zur Dolinenbildung neigen. Die Dolinenphänomen in massigem, dichtem Guttensteinerkalk der Uvala übertrifft jedoch weit die Dolinenbildung in den klüftigen Kreidekalken des Gačkopoljes und seiner nächsten Nachbarschaft. Was nun die zweite flache Mulde anbetrifft, welche ich im vegetationslosen Gebiet supponiert habe, so muß man zwei Fälle unterscheiden. Mulde im Hochgebirge und Mulde im Bergland. Ich habe in früheren Jahren sowohl im Hochschwab-, als auch im Dachsteingebiet und im toten Gebirge die Beobachtung gemacht, daß dort in den Mulden die Schneedecke eine ähnliche Rolle spielt wie im Buchenurwald des Berglandes der Humus. Die Schneedecke, welche einen guten Teil des Jahres die Mulde bedeckt, verhindert einen Teil der atmosphärischen Niederschläge, direkt in die Klüfte des Kalkes einzutreten. Die Schmelzwasser fließen auf und in ihr nach dem tiefsten Punkt und legen dort durch ihre Lösungsfähigkeit den Boden tiefer. Es ist somit, wenn auch nicht in dem Maß, wie im bewaldeten Terrain, die Möglichkeit zur Dolinenbildung vorhanden. Im sterilen Bergland hingegen, etwa in den verkarsteten Partien der kroatischen Küstenstriche, sind die Vertiefungen zwischen den Kalkköpfen und Rippen mit Lehm erfüllt. Die einzelnen Lehmportien hängen vielfach miteinander gar nicht zusammen. Die atmosphärischen Niederschläge gelangen somit zum Teil direkt in die Klüfte, zum Teil werden sie dazu verwendet, den Lehm mit Wasser zu sättigen. Er kann ungemein viel Wasser aufnehmen. Es ist dies eine der großen Schwierigkeiten bei der Berieselung von Feldern im Karst. Keine Bodenart benötigt so viel Wasser zur Durchfeuchtung. Der Lehm entläßt das Wasser ungemein langsam, der nächste ausgiebige Sonnenschein trocknet ihn vollständig aus. Es dürften aus diesem Grunde die Verdunstungsverluste im Sommer sehr bedeutend sein. Nach dem tiefsten Punkt der Mulde gravitiert so gut wie nichts.

Am sinnfälligsten habe ich die Wirkung der Abwesenheit des Humus im Koreničkopolje gesehen. Es ist dort, südöstlich von Korenica, ein wahres Steinfeld von zahllosen Köpfen und Rippen stark zerklüfteten Kreidekalkes im Ausmaß von ca. einem Quadratkilometer. Und nicht einmal der Ansatz zu einer Doline vorhanden. Dasselbe kann man in den vegetationslosen Strichen des Gačkopoljes beobachten. Selbst-

verständlich gibt es zwischen den beiden zitierten Extremen, Uvala von Žutalokva und Koreničko polje zahllose Übergänge.

Auf zwei Dinge weisen die oben angeführten Beobachtungen und Vergleiche hin: Erstens, daß in unserem Karstmittelgebirge, die kräftige und allgemeine Ausbildung abflußloser Hohlformen durch das Vorhandensein lockeren Erdreiches, indirekt also durch die Bewaldung bedingt ist und daß zweitens der absolute Betrag der Denudation in bewaldetem Gebirge viel größer sein muß, als im sterilen Gebiet, nachdem ein großer Teil der Niederschläge von Lehm absorbiert wird und mit der Austrocknung des Lehmes wieder verdunstet, und eine Erhöhung der Lösungsfähigkeit des versickernden Wassers durch Verwesungsprodukte nicht stattfindet. Während also die chemische Denudation im bewaldeten Bergland ihre formenbildenden Kräfte auf das reichste betätigt, sind diese Kräfte im humusfreien Terrain mehr oder weniger ausgeschaltet. An Stelle der formenbildenden Denudation ist die konservierende Oberflächendenudation getreten.

Ich will nun versuchen, diese Erfahrungen auf die Erklärung des ebenen Poljenbodens im Gačkopolje anzuwenden. Es ist nach den zahlreichen Bruchlinien, welche die Ränder des Poljes begleiten, sehr wahrscheinlich (von GRUND ist dies für die meisten westbosnischen Poljen nachgewiesen), daß wir es mit einem tektonischen Senkungsfeld zu tun haben, niedergesunken zwischen Bruchlinien, welche sich unter den verschiedensten Winkeln kreuzen, in der Hauptsache jedoch dem Schichtstreichen parallel laufen. Es liegt daher auch das der intensiven Denudation entzogene Polje viel tiefer als das gegenwärtig noch der Abtragung und Modellierung unterworfenene Bergland der Umgebung. Nun geht aus einer sehr einfachen theoretischen Überlegung klar hervor, daß ein Bruch, welcher ein Gebirge quer durchsetzt, in großer Tiefe glatt, in der Nähe der Erdoberfläche hingegen uneben und splittrig ausfallen muß. In großer Tiefe befindet sich ein Gestein im Zustand latenter Plastizität. Es steht nicht unter den Gesetzen, welche die Festigkeit spröder und schwach elastischer Körper beherrschen, sondern unter den Gesetzen der Hydrostatik. Dies hebt schon HEIM hervor. Dem Spannungsausgleich in dieser Tiefe geht ein Fließen des Materiales voraus und bereitet eine glatte Rutschfläche vor.¹

¹ Ich hatte erst vor kurzem wieder, in eisenschüssigen Konglomeraten der archaischen Formation bei Kitzbühel in Tirol, Gelegenheit, dieses «Fließen» in einwandfreier Form zu konstatieren. Die Rollstücke bestanden aus blauem, kristallinischen Urkalk. In manchen Partien war das Konglomerat vollkommen unverändert, die Rollstücke nicht deformiert. An anderen Stellen waren die Rollstücke

Jede Gesteinspartie übt auf ihren Nachbar gewissermaßen einen Horizontalschub aus. Nahe der Erdkruste hingegen fällt diese Wechselwirkung aus. Der Sprung verläuft dort, wo er eben den kleinsten Widerstand findet, er wird sich gabeln und wird splintern. Selbst in homogen gestampftem Beton verlaufen die Sprünge zackig. Nun erst in einem vielfach dislozierten Gebirgskörper.¹ Wenn nun eine polygonal begrenzte Scholle zwischen solchen zackigen Sprüngen niedersinkt, so ist es klar, daß an den Bruchwänden die stärksten Massendefekte auftreten müssen. Stellenweise werden die Felspartien hart an einander gleiten, an anderen Punkten werden sich Klüfte bilden und Hohlräume, welche teils frei bleiben, teils mit losem Trümmerwerk ausgefüllt sind. Diese Klüfte sind natürliche Hauptsammelkanäle für das Karstwasser und in ihnen findet die Wasserzirkulation den geringsten Widerstand, während die Fortsetzungen der Klüfte in das umgebende Bergland bei weitem nicht dieselbe Kapazität aufweisen, es hat eben an ihnen kein so bedeutendes Absinken und infolgedessen auch keine weitgehende Berstung des Materiales stattgefunden. Das Polje ist durch diese natürliche Kanalisierung zu einer hydrographischen Einheit gestempelt. (Im 7. Abschnitt eingehend behandelt.) Bei eintretenden Hochwässern wird die Inundation in dem von den Hauptsammelkanälen umgebenen Gebiet auf gleicher Höhe stehen, nachdem der Abfluß durch die ziemlich geschlossenen Kluffortsetzungen nur langsam erfolgen kann.²

Durch diese Konstatierung rückt das Poljenproblem seiner Lösung um einen großen Schritt näher. Das bergige Terrain ist in geschlossener Scholle niedergesunken, die Denudation wirkt weiter in der Schaffung abflußloser Hohlformen.³ Sobald der Boden einer «Uvala» in den

gewissermaßen ausgewalzt. An den Bruchflächen in der Walzrichtung erschienen die Kalkstücke wie eine hellblaue, lappig begrenzte, auf die eisenschüssige Zwischenschicht ausgegossene, weich plastische Masse und wiesen nicht den geringsten Sprung auf. An anderen Stellen hingegen war die Auswalzung bis aufs äußerste getrieben. Das Gestein erschien im Bruch auf das feinste rot und blau gebändert, die Streifen kaum ein bis zwei Millimeter breit, die blauen Kalklagen in feinen Spitzen auskeilend. Und trotzdem von einem Sprung keine Spur.

¹ Eine analoge Erscheinung sind die an Erzgängen zuweilen zu beobachtenden Gangablenkungen durch bereits vorhandene Sprünge.

² Die Klüftigkeit der Bruchzonen erklärt auch die mehrfach erwähnten Häufungen von Felsblöcken am Grund der Dolinenponore, sowie die bei Svica und im N-lichen Gačkabett auftretenden Blockmassen, welche an Ort und Stelle entstanden sein müssen.

³ Die Abriegelung von Poljen durch zeitlich getrennte Gebirgsschübe steht in bemerkenswerter Beziehung zur Eiszeittheorie RAMSAYS, nach welcher die Vereisung im Alpengebiet durch das Hochstauen dieses Teiles der Erdrinde aus dem

Inundationsbereich gelangt und jährlich eine ganz bestimmte Zeit inundiert wird, so ist dem Wald, welcher bei der Neubildung von Hohlformen eine so wichtige Rolle zu spielen scheint, die Existenzmöglichkeit genommen. Der Humus wird durch den dolinenfeindlichen Lehm ersetzt. (Ziffermäßige Behandlung der Denudationsdiff. im 8. Abschn.) Die bewaldeten Hügel und Berge werden nach wie vor denudiert, der Boden hingegen wird konserviert und seine Ausdehnung wächst mit der Abtragung der Reliefformen. Aus den oben angeführten Gründen werden sich sämtliche Muldenböden auf demselben Niveau befinden, nachdem die Grenze, welche dem Baumwachs durch die Inundationen gesetzt ist, in allen Mulden innerhalb des Senkungsfeldes gleich hoch liegt. Die Mulden wachsen zusammen, ähnlich wie dies Cvijić als Zusammenwachsen von Uvalas erklärt hat. Nur mit dem Unterschied, daß er den wichtigsten Faktor nicht erkannt hat, welcher die vielen Uvalas zu einer orographischen Einheit zusammenschließt: die kanalisierten Ränder eines Senkungsfeldes. Dieser Eindruck hat sich mir schon vor sechs Jahren aufgedrängt, als ich nach mehrstündiger Wanderung durch die Hohlformenreihen, von prachtvollem Urwald beschatteten Berge von Laas, zum erstenmal die lehmbedeckte, eintönige Fläche des Zirknitzersees vor mir sah, in welcher jede formenbildende Kraft erstorben zu sein scheint. Der Grund zu dieser Lahmlegung konnte doch nur in der Abwesenheit der humusbildenden Vegetation liegen. Und viel eindringlicher wirkt noch der Anblick des Gačkopoljes, wo aus einer baumlosen, felsigen Ebene isolierte, dichtbewaldete Kuppen ragen, wie aus einem erstarrten See. Es ist klar, daß bei einer Scholle in einem so wechsellvollen Bergland, wie es die Umgebung des Gačkopoljes darstellt, das Niveau der waldzerstörenden Inundation von den einzelnen Partien in sehr verschiedenen Zeiten erreicht wird. Nachdem nun dieses Inundationsniveau während des Poljenbildungsprozesses schwankt, resultiert auch eine wellige Oberfläche. Eine solche charakterisiert auch das Gačkopolje, indem die Höhenlage des Poljenbodens, ganz ohne Rücksicht auf die Abflußrichtung, zwischen 450 und 480 m schwankt.

Es ist nun sehr charakteristisch, daß sich die tiefsten Partien des Poljes in der Nähe des hügelreichen Südwestens hart am Poljenrand befinden, jenseits der größten Verwerfungskluft Tonkovičquelle—Rapaindol und daß der Fluß, dem gegebenen Terrain sich anschmie-

Meeresniveau in die Firnregion hervorgerufen worden sei. Die Ruheperioden in der Gebirgsbildung finden im Alpengebiet ihren Ausdruck in den Interglazialperioden, in der Kalkzone des heutigen Karstgebietes hingegen in der Entstehung von Poljen.

gend, zwischen den stehengebliebenen Hügeln Prozor, Vital, Spilnik Vinica und Humac hindurchschlängelt. Es steht dies mit der von Dr. GRUND betonten, im übrigen selbstverständlichen Tatsache im Einklang, daß der Karstwasserspiegel und mit ihm das Inundationsniveau im Laufe der Zeit, infolge Ausweitung der Wasserbahnen, sinkt. Wenn das Niveau der waldfeindlichen Inundation gesunken ist, so mußten auch die jüngsten zur Konservierung gelangten Terrainteile am tiefsten liegen. Und die jüngsten Teile liegen selbstverständlich an der Poljenkluft oder, wie dies bei den Bergen Prozor, Vinica etc. der Fall ist, jenseits derselben. Wir finden genau dieselbe Erscheinung im Likapolje, westlich von Gospić. Hart am Fuße der gewaltigen Bergformen des Velebit, nördlich von Trnovac, ist das Becken verschlammt und versumpft und seine Oberfläche liegt auf Kote 562, während die Ebene, welche die Lika östlich von Gospić durchschneidet, die Koten 572, 577, 576 aufweist. Auch im Kravapolje liegen die tiefsten Partien am Westfuß der höchsten Erhebungen und zwar des Runjavi vrh, 1009 m etwa der halben Höhe des Poljes. Diese Erscheinungen sind wohl kaum auf einen Zufall zurückzuführen, ebensowenig wie die zwischen 450 und 485 m schwankende, von Schichtstreichern und petrographischem Bestand des Poljenuntergrundes vollkommen unabhängige Höhenlage des Poljenbodens im Gačkopolje.

Nun kommen wir zu den Beziehungen der einzelnen Poljenbecken zu einander. Wenn wir die relative Höhenlagen der einzelnen Poljenbecken zwischen Kapella, Plješivica einerseits und Velebit andererseits vergleichen, so finden wir, daß sie vom Koreničko Polje, welches im äußersten Winkel in 550 m Seehöhe, weit vom Meer zwischen zwei Gebirgszüge eingekeilt erscheint, treppenartig nach dem tiefsten Punkten, dem Vlaškopolje und dem Svicasee, abnehmen. Kravapolje 626, Likapolje 570, Polje von Kossinj 490, Gačkopolje 460, Polje von Brlog 440, Vlaškopolje 425. Und genau westlich von Vlaškopolje strömen die zahlreichen untermeerischen und Strandquellen von Sv. Juraj-Valle Molini. Eine Ausnahmstellung nimmt das Bilopolje mit 620 ein, welches jedoch zwischen zwei Werfnerschieferaufbrüchen isoliert ist und höchstwahrscheinlich nach dem Unatal entwässert. Diese Poljen, welche, wie ersichtlich, in ihrer Höhenlage stark differieren, sind von einander durch relativ schmale Bergzüge getrennt. So schiebt sich zwischen das Polje von Kossinj und das Gačkopolje eine Gebirgsschwelle von bloß 7 km Breite, das entspricht in der kürzesten Verbindung der Poljen einem Gefälle von nahezu 1⁰/₀₀, während das Gačkopolje sozusagen kein Gefälle aufweisen kann. Dasselbe gilt von dem Gebirgszug zwischen den beiden Likapoljen. Durch die Denudation wird der Gebirgszug, welcher zwei

hydrographische Poljeneinheiten von einander trennt, solange abgetragen, bis ein Überfließen des Inundationswassers in das benachbarte, tiefere Polje erfolgen kann. Anfangs nur zur Zeit des Hochwassers, solange, bis das Jahr für Jahr überfließende Hochwasser einen derart tiefen Talweg ausgelaugt hat, daß auch das Normalwasser und das Niedrigwasser in das Nachbarpolje gelangen kann. So erklärt sich die rätselhafte Erscheinung des bedeutenden Gefälles von Verbindungsstücken zwischen zwei trägen Poljenflüssen. Das Gefälle der Flüsse ist eben indirekt proportional der durch tektonische Störungen hervorgerufenen Kanalisierung des durchzogenen Gebietes. Im ersten Stadium des Überfließens rinnt das Hochwasser nach der von der Denudation vorgeschriebenen Tiefenlinie und stürzt über eine Steilstufe in das Nachbarpolje. Das Nachbarpolje empfängt durch ein solches Ereignis mehr Wasser als es abführen kann und verwandelt sich in einen periodischen See, wie wir es heute noch beim Švicasee beobachten können. Zunächst der Einmündung des Hochwasserflusses setzt sich die Hauptmasse der von ihm mitgeführten lehmigen Sinkstoffe ab und an der Steilstufe selbst entstehen bedeutende Ablagerungen von Kalktuff, die der Fluß, infolge seiner Auslaugungstätigkeit, auf seinem neuen Talweg aufnimmt. Wenn wir das Tal des nördlichen Gačkaarmes betrachten, so können wir den oben im Schema skizzierten Entwicklungsgang auf das klarste verfolgen. Der Übersichtlichkeit wegen will ich die Situationen durch Flußkilometer präzisieren.

Ich hatte schon im ersten Abschnitt die augenfällige Verteilung der ersten 15 km des nördlichen Gačkaarmes hervorgehoben. Von den vier Teilen entfallen die ersten zwei auf das alte Inundationsgebiet in der NW-Ecke des Hauptpoljes, der dritte auf den durch Überströmung und Auslaugung bewältigten Trennungsrücken zwischen Gačkopolje und Dubrava. Ich will die wichtigsten Eigenschaften der ersten zwei Teile kurz rekapitulieren.

Kaum zweihundert Meter vor der steinernen Brücke in Otočac beträgt die Wassertiefe im Gačkabett 6 m. Von dort ab, an der Stelle, wo der Fluß nach Osten biegt und die Ponorregion betritt, reduziert sich die Wassertiefe auf einen Meter. Die Ufer sind bis km 3·77 mehr oder weniger flach, felsig, während der Kreidekalk im Nachbarterrain unter einer mächtigen Lehmdecke begraben ist. In km 3·7 : Abzweigung eines trockenen Flußbettes nach Osten, der Fluß schwenkt um 120° ab. Die Hochufer sind nunmehr steil, felsig und nahezu parallel. Die Lehmdecke am Gelände wird immer schwächer und nördlich von Staro Selo tritt auf den Plateaus der Kalk bereits nackt zutage. Zwei periodisch fließende Bäche, Sekisovac potok und Bukarinovac potok, ent-

springen zwischen Um und Erderovakosa in 500 m Meereshöhe, fließen in westlicher Richtung und münden nördlich von Staro Selo. Ein drittes, vollkommen ausgetrocknetes Tal kommt ebenfalls von Osten und mündet bei der Brücke Staro Selo.

Bei dem Bächlein Sv. Marko, welches verkarstetes Terrain durchquert und selbst zur Zeit der Herbstniederschläge und nach der Schneeschmelze als ärmlicher Wasserfaden in seinem Rinnsal fließt, haben wir gesehen, welche bedeutende Menge von Sedimenten er im Laufe der Jahrhunderte in den Gačkafluß geschwemmt hat, wo sie sich zu einer vier Meter hohen und über hundert Meter langen Flußbarre aufgetürmt haben. Das Verlaufen der Zuzugskanäle sämtlicher Ponore an der nördlichen Gačka mit Gegengefälle beweist ferner, daß das Wasser unter solchem Überdruck aus den Ponoren strömt, daß es im Lehm Erosionsarbeit leisten kann. (Siehe auch S. 333.) Wenn man diese beiden Erfahrungen nebeneinander hält, so wird man sich nicht wundern, daß die Erosionsrinne des Gačkaflusses vom Beginn der Ponorzone an, wo Ponor an Ponor Wochen und Monate lang Wasser speit und über die mächtige Lehmdecke ergießt, mit eingeschwemmtem Material nahezu verschüttet und zum Ausufern gezwungen worden ist. Der direkte Beweis für die sedimentäre Natur der Sohlenaufhöhung ist übrigens durch die Fundierungsarbeiten an den Otočaner-Brücken erbracht worden. Man erkennt aber auch im Längenprofil sehr klar die Zusammenhänge zwischen Ponoren und Flußtiefe. Die Flußtiefe wechselt stark, ist jedoch zwischen je zwei Ponoren am größten. Die größte Flußtiefe halbiert die Ponordistanzen nicht, sondern ist durchwegs stromabwärts verschoben, ebenso wie die Mündung des Potok Sv. Marko die Flußbarre nicht halbiert.

In km 7·2 steht im Flußbett auf der Sohle bereits Felsen an und die Mächtigkeit der Lehmdecke ist in den Talengen sehr gering. Ein Blick auf das Längenprofil genügt um zu erkennen, daß die felsige Talsohle in km 7·2 mindestens um volle drei Meter höher liegt, als in km 0·00 (Taf. XII.) Wenn wir ferner das Gelände östlich von unserer Flußstrecke betrachten, so erkennen wir daß es sich sowohl von Norden, als auch vom Süden nach dem trocken gelegten Flußbett abdacht, welches in km 3·7 vom Kurvenscheitel nach Osten abzweigt, in jene Partie des Poljes, in welchem die Lehmdecke am mächtigsten ist. Wir können daher mit größter Wahrscheinlichkeit annehmen, daß östlich von km 3·7 die tiefste Stelle des Inundationsgebietes gewesen ist, die Zone der alten Hauptponore.

Die Existenz dieser Hauptponore verrät sich heute noch durch die Anwesenheit von tiefgelegenen, flachen Mulden, welche untereinander

durch seichte, trockene Kanäle verbunden sind. Es ragt jedoch kein einziger Felskopf aus dem mächtigen Lehmlager. In die Ponorzone mündete von Süden der Gačkafluß, von Norden hingegen die von Skare und Podum kommenden Gewässer, welche sich in der heute noch bestehenden Erosionsrinne sammelten, jedoch in einer dem heutigen Flußlauf entgegengesetzten Richtung abflossen. Wenn die Strecke km 0·00 bis km 7·00 nicht im Inundationsgebiet gelegen wäre, so hätte die eigentümliche, tief in den Felsen geschnittene und sekundär durch lehmige Sedimente wieder aufgefüllte Auslaugungsrinne des Flusses gar nicht zustande kommen können. Im Winterhalbjahr, zur Zeit, da die Ponore Wasser liefern, war die Gegend inundiert. Das Ponorwasser stieg im Inundationsgebiet empor und konnte daher nicht erodieren und keine Sedimente einschwemmen. Im Sommer floß der Fluß auf der mehr oder weniger von Sedimenten freigehaltenen Flußsohle und konnte sich in das Gelände einfressen.¹ Erst nachdem für das Hochwasser ein Abfluß nach der Dubrava geschaffen worden war, kam die Niveaudifferenz zwischen Ponor und Fluß zur Wirksamkeit und die Einschwemmung von Sedimenten konnte beginnen. Damals war aber die Auslaugungsrinne schon fertig. Es ist hochinteressant folgendes zu beobachten: In der Strecke km 0·00 bis km 3·7 herrschte im Fluß stets die gleiche Strömungsrichtung. Die Zulaufkanäle zu den Ponoren verlaufen daher ausgesprochen gegen den Strom. In km 3·7 bis km 7·00 hat die Strömungsrichtung zur kritischen Zeit gewechselt. Der Talboden ist nahezu horizontal und die Zulaufkanäle zu den Ponoren schlängeln sich senkrecht zur Flußrichtung. Ab km 7·00 hat offenbar ebensowenig ein Überströmen von Ponorwasser nach dem Fluß hin stattgefunden wie heute. Es besteht daher an keinem einzigen von ihnen ein Zulaufkanal.

Sie werden zur Zeit des Hochwassers einfach überstaut und die Kommunikation zwischen Fluß und Ponor hört auf, sobald sich das Hochwasser zurückzieht.

In km 7 wendet sich der Fluß zwischen zwei steilen Felswänden, welche die bisherige Talbreite auf etwa 20 m reduzieren, in scharfer Kurve nach Nordwesten, in seine neue Laufrichtung. In diesem Punkt ändert sich der Charakter des Erosionstales vollkommen. Während die Talbreite bis dato konstant war, wechseln jetzt kesselförmige Erweiterungen mit engen Stellen. Ponore sind keine mehr vorhanden, dafür setzen die kreisrunden Flußdolinien ein. Unmittelbar hinter der schar-

¹ So ist auch die Flußsohle im Švicasee fast lehmfrei, trotzdem die lehmigen Sedimente zu beiden Seiten bedeutende Mächtigkeit besitzen.

fen Kurve ist die erste, mit 8 m Wassertiefe bei Niedrigwasser und entspricht gerade der Stelle, wo die nördliche Gačka die westliche Randverwerfung des Poljes überschreitet. Wir haben also hier den Punkt, wo die Überströmung des Hochwassers über die denudierte Randschwelle einsetzte. Bis dato ist der Fluß von Anbeginn auf einer Ebene geflossen, infolgedessen erhielt seine Erosionsrinne eine nahezu konstante Breite. Von km 7 an ergoß sich das Hochwasser über eine durch Denudation geschaffene Senke und durchfloß bald Mulden und Dolinen, bald überströmte es in schmalen Streifen einen Kamm. In den Hohlformen konnte es breite Flächen auslaugen und tieferlegen, auf den Kämmen erzeugte es nur eine Rinne, so breit, als es eben floß. Daher die ungemein wechselnden Talbreiten und Taltiefen, welche bei dem gegebenen Gefälle, ohne Schuttführung, durch mechanische Erosion unmöglich hervorgebracht werden können. Ein Sohlenlängenprofil, wie das der nördlichen Gačka kann durch mechanische Erosion überhaupt nicht erzeugt werden. In km 13·3, also dort, wo die Verlängerung des Ostrand der «Dubrava» den Flußlauf schneidet, westlich vom See X, setzt der Kreidekalk plötzlich an Kalktuff ab, welcher eine mächtige Schicht von kalkigem Lehm überlagert. Während der Fluß bis zum See X auf der Sohle eines breiten Tales mit felsigen Hochufern floß, verläßt er den See in einer engen Erosionsrinne mit gut 10 m hohen, steilen Böschungen aus lehmigem und tuffigem Material. Diese Sedimentschichten bedecken, ziemlich rasch schwächer werdend, die Talsohle vom See X bis Brlog, wo der Fluß nur mehr $1-1\frac{1}{2}$ m eingeschnitten ist. Bei Brlog wendet er sich nach Westen und verläßt das kleine Polje durch ein ca 120 m breites, kurzes Quertal zwischen steilen, etwa 40 m hohen Felshängen. Gleich nach dem Verlassen dieses Tales sehen wir ihn etwa 15 m tief in lehmige und kalkige Sedimente eingeschnitten, genau so wie bei See X, teils in flachen Windungen, teils in engen Serpentin. Mehrere Häuser in Brlog sind aus Kalktuff erbaut, so daß man mit großer Wahrscheinlichkeit annehmen kann, daß auch dem Durchbruch von Brlog der Kalktuff nicht fehlt. Die Mächtigkeit der Schichten wird immer geringer und in Brlog staeije fließt der Bach bereits im Terrain und verläßt das Polje wieder durch ein kurzes Quertal, diesmal in SE-licher Richtung. Interessant ist es, zu sehen, daß auch in dem Stück km 9 — km 14 die Flußdolin nicht fehlen. Wir sehen sogar eine solche Doline unmittelbar nach dem See X, zwischen dem Felshang und den Tufflagern. Es entspricht dies jedoch ganz den Beobachtungen, welche ich am Švicasee gemacht habe. Die Ablagerung der Sedimente erfolgt derart gleichmäßig, daß jede Hohlform des felsigen

Untergrundes sichtbar bleibt, wenn auch geglättet und ausgerundet. Der Seeboden wird gewissermaßen auf galvanischem Weg ausgekleidet. Seine eigene Erosionsrinne hält der Fluß hingegen frei, nachdem selbst bei gefülltem See in seinem Talweg eine gewisse Strömung herrscht. Wenn sich trotzdem etwas absetzen und den Talweg verlegen sollte, so erodiert er es im nächsten Sommer wieder weg. Im Gusičpolje hat einerseits die Denudation und Erosion am Sattel gegen Vlačkopolje, andererseits die Aufhöhung des Bodens durch Sedimentation die endliche Entwässerung bewirkt. Nur die tiefsten Teile westlich von Brlog sind heute noch versumpft.

Eine ganz andere Vergangenheit als das Gačkopolje scheint der Švicasee zu haben. Er ist kein Kesselbruchtal und kein Polje, sondern eine Reihe von großen, abflußlosen Mulden, welche ungefähr in der Mitte von einer E—W-lich verlaufenden Bruchlinie durchzogen werden. Sie wurden erst durch die bei Švica durch Denudation angebahnte, durch Überströmung und Auslaugung erfolgte Schaffung einer Oberflächenkommunikation mit dem Gačkopolje in eine Reihe von periodischen Seen verwandelt. Ich konnte folgendes beobachten: Wenn an den Vaclusequellen im Südostwinkel des Poljes Hochwasser auftritt, laufen in kurzer Zeit die 14 km entfernten Ponore am Nordwestrand voll und schlucken nur mehr unbedeutende Wassermengen. Ein Beweis für die rasche Wasserzirkulation innerhalb des Poljes. In den Švicaseen hingegen kann man, zwischen benachbarten Seebecken, welche nur durch einen schmalen Kalkrücken von einander getrennt und durch eine Bruchspalte miteinander verbunden sind, Wasserspiegeldifferenzen von 20 m konstatieren. Erst ein künstlicher Durchstich hat einigermaßen Abhilfe geschaffen. Durch diese Nebeneinanderstellung kann man es sich erklären, daß die Denudation im Gačkopolje infolge Erreichung des Inundationsniveaus in einer Höhe von 460 m Halt machen mußte, während das Becken des Švicasees, welches sich abseits vom kanalisierten Hauptpolje befand, bis auf 400 m niedergetieft wurde ohne die kritische Inundationsgrenze zu erreichen. Es ist auch heute noch zwischen dem Hochwasserspiegel im Švicasee und dem Hochwasserspiegel in dem $2\frac{1}{2}$ km östlich von ihm liegenden Ponor von Šumecica eine Niveaudifferenz von im Mittel 20 m, trotzdem der Švicasee den größten Teil des Gačkahochwassers aufnehmen muß.

7. Das Karstwasser.

Wenn wir die Wassermengendiagramme des Gačkaflusses (Fig. 24 und 25) betrachten, so fallen uns in erster Linie zwei Tatsachen auf:

1. Die mittleren Abflußmengen der Sommer- und Herbstmonate sind im Verhältnis zu den mittleren Abflußmengen der Winter- und Frühlingmonate wesentlich kleiner als die mittleren Niederschlagsmengen der Sommer- und Herbstmonate im Vergleich zu den Niederschlagsmengen der zweiten Jahreshälfte. 2. Während die Winterniederschläge im Diagramm als Spitzen zur Geltung kommen, erfolgt der Wasserabfluß in den Sommermonaten nahezu gleichmäßig.

Die erste der beiden Tatsachen wird uns verständlich, wenn wir die Beschaffenheit des Hinterlandes ins Auge fassen. Das Hinterland des Gačopoljes besteht aus einem z. T. verkarsteten und bewaldeten Bergland, zum größten Teil jedoch aus der mit einer mehr oder weniger mächtigen Lehmschicht bedeckten, zum größten Teil bebauten Likaebene. Der Lehm ist an und für sich wenig wasserdurchlässig. Im Sommer verdunstet ein großer Teil der von dem ausgetrockneten Lehm absorbierten Wassermasse rasch infolge der außerordentlichen Hitze und ein anderer ebenfalls bedeutender Teil wird durch den Lebensprozeß der Vegetation vergast. Perzentuell lassen sich die Anteile der beiden Faktoren nicht feststellen. Jedenfalls ist der Einfluß der Vegetation ein sehr bedeutender. Nach den Versuchen WOLLNYS (Forschungen zur Agrikulturphysik 1891) mit dem Lysimeter betrug die Versickerung während der Monate Mai—Oktober im kahlen Lehm 33%, im grasbewachsenen Lehm bloß 1·3% der Niederschlagsmengen. Und die Versickerungsverhältnisse liegen beim Lysimeterversuch wesentlich günstiger als im lehmbedeckten Karstterrain. MÖLLENDORF fand die Versickerung im «grasbedeckten Lehm» während des Winters und Frühjahrs 92·0%, bzw. 89·7%, während des Sommers und Herbstes 36·0%, bzw. 32·9%, gemessen durch Drainage.¹ Schwieriger zu verstehen ist die zweite Tatsache. Zunächst werden die Regenmassen der Sommerregen in weit höherem Maß in der ausgetrockneten Lehmbedeckung der Karstoberfläche zurückgehalten und es kommt nur ein sehr kleiner Bruchteil zur sofortigen Versickerung. Ferner bringt während der Wintermonate der Likafluß einen großen Teil der auf die undurch-

¹ GRUND sagt in seiner «Karsthydrographie» auf S. 175: «Der Verdunstungsverlust dürfte nur im Winter bedeutend sein, wo der Schnee auf der Oberfläche liegen bleibt. Dagegen wird der tropfbar flüssige Niederschlag sofort vom Gestein verschluckt, weshalb der Verdunstungsverlust sehr gering sein und sich nur auf die Benetzungsfeuchtigkeit des Gesteins beschränken dürfte. Höchstens im Sommer dürfte noch in den Klüften des sonnendurchglühten Gesteins eine größere Verdunstung stattfinden.» Die vorliegenden Tatsachen scheinen auf das Gegenteil hinzuweisen. Große Verluste im Sommer, geringe im Winter. Exakte Messungen über die Verdunstung von Schneemassen liegen zur Zeit noch nicht vor.

lässigen Partien des Velebitgebirges fallenden Niederschläge bis an den Südrand des Likapoljes und injiziert dort, kaum 8 km vom Rand des Gačkopoljes entfernt, seine Hochflut dem Karstwasserbestand. Im Sommer führt der Likafuß sehr wenig Wasser und liegt nicht selten trocken, nachdem sich sein Wasser schon unterwegs in Ponoren versetzt und vielleicht in ganz anderen Direktionen abfließt. Eine dritte Ursache bilden die Unterschiede zwischen den Karstwasserbewegungen des Sommers und denen des Winters. Diese dritte Ursache werde ich erst diskutieren, wenn ich die Art der Karstwasserzirkulation festgestellt haben werde. (S. 325 u. ff.)

Was diese Karstwasserzirkulation anbetrifft, müssen wir uns zunächst fragen, wie sind so konzentrierte Wasserausbrüche, wie sie von den Gačkaquellen repräsentiert werden, überhaupt möglich? Aus den Abflußdiagrammen geht klar hervor, daß die Quellen über eine sehr bedeutende Wasserreserve verfügen müssen und daß die parabolisch absteigende Wasserstandskurve der Sommermonate auf die allmähliche Entleerung dieser Reserven zurückzuführen ist. Besonders das trockene Jahr 1908 läßt dieses allmähliche Ausrinnen sehr schön erkennen. Um nun die Natur der Wasserreserven und den Mechanismus der Entleerung einzusehen, wenden wir uns an die Theorien über das Karstwasser.

Wir finden zwei Anschauungen, welche einander schroff gegenüber stehen. Die eine Gruppe ist vertreten durch Prof. GRUND. Nach seiner «Karsthydrographie» sind sämtliche Vaclusequellen echte Grundwasserquellen. Im ganzen Karstgebiet finde sich ein einheitlicher Grundwasserspiegel, dessen Höhenlage durch oberirdisch oder unterirdisch stauende Barren fixiert erscheint. In einem solchen Grundwasserbecken seien vier verschiedene Niveaus zu unterscheiden: Das stagnierende Grundwasser, das horizontal abfließende Jahresniederschlagsminimum, die darüber befindlichen, horizontal sich bewegenden Karstwasserschwankungen und die Zone des «Regnens in den Klüften». Wenn nun das Niveau der zweiten Etage das «tiefste Karstwasser-niveau» eine Poljenmulde schneidet, so entstehen am Rand dieser Mulde Vaclusequellen. Gegen die Richtigkeit dieser Auffassung spricht das konzentrierte Vorbrechen der Wasserquantitäten an Punkten, welche mehrere Kilometer von einander entfernt sind. Eine kleine Rechnung soll diese meine Einwendung verdeutlichen. Die Tonkovičquelle führt bei Hochwasser $30 \text{ m}^3/\text{sec}$. Ich weise ihr ein Areal zu von 200 m^2 (weit mehr als der durchlässige Boden des Quelltümpels de facto haben dürfte), das gibt mit der von GRUND geschätzten hydrologisch nutzbaren Klüftungsziffer des Kalkes von 5 auf 1000 einen Durchfluß-

querschnitt von 1 m² und die rasende Wassergeschwindigkeit von 20 m/sec. Die Druckhöhe, welche eine solche Wassergeschwindigkeit in einem relativ schwach geklüfteten Gestein zu erzeugen vermag, müßte eine enorme sein. Warum sind die felsigen Hänge rings um die Quelle selbst bei Hochwasser relativ trocken? Man müßte doch erwarten, daß das Grundwasser bei den hoch gelegenen Fugen des Gesteines hervorquillt, bevor es den weiten Umweg in die Vaclusequelle macht. Zur Ausbildung einer, in den vorliegenden Fällen unsichtbaren, Quelhöhle liegt kein plausibler Grund vor. Das Wasser kommt sinkstoff- und, was noch wichtiger ist, relativ kalkarm zum Vorschein. Während das Flußwasser bei den Stauwerken sämtlicher Mühlen Kalktuff zur Ablagerung bringt, findet sich an den Stauwerken der Quelmühlen kein Kalkabsatz.¹ Ferner ist auch nicht einzusehen, warum eine solche Quelhöhlenbildung auf einer Strecke von 6 km nur an drei Stellen auftreten sollte, während die übrigen Gehänge und Randpartien intakt bleiben. Und nur die Bildung einer solchen Quelhöhle könnte die Absenkung des Grundwassers in der Nähe des Poljenrandes rechtfertigen, nachdem sich in diesem Fall (nach GRUND) die Grundwasserschwankung auf ein normales Flußhochwasser reduzieren würde.

Die zweite Auffassung der Karstwasserzirkulation ist vertreten durch Dr. WAAGEN, durch den bosnischen Landesgeologen Dr. KATZER und durch zahlreiche andere Autoren. Ihre Ansicht geht dahin, daß der Höhlenfluß das Element der Karsthydrographie sei. Dieser Höhlenfluß bewege sich ganz analog den obeiirdischen Flüssen in einem geschlossenen Gerinne unabhängig vom Karstwasser. Erst vor kurzem verglich Dr. WAAGEN in einer Abhandlung: «Karsthydrographie und Wasserversorgung in Istrien» das Karstgebiet mit einer kanalisierten Großstadt und erklärte trockene Hohlräume unter durchströmenden Höhlensystemen für eine typische Erscheinung, nicht etwa für einen Ausnahmefall. Die Auffassung dieser Gruppe von Autoren läßt die vorliegenden Tatsachen in einem weit höheren Masse unerklärlich, als dies bei der Theorie GRUNDS der Fall ist. Die Gačkawässer kommen, wie die Sondierungen ergeben haben, aus keinen Höhlen, sondern sie brechen in Form von Tümpeln aus dem schuttbedeckten Untergrund. Warum sind diese Wasserausbrüche ausgerechnet am Poljenrand?

¹ Diese Tatsache beweist, daß das Wasser schon bei seinem Eintritt in das Gebirge nicht sehr kohlenensäurereich gewesen sein kann. Je länger es nun zirkuliert, um so mehr wird das ursprüngliche Lösungsvermögen erschöpft. Warum soll nun gerade am Ende der unterirdischen Wasserbahn ein bedeutender Auslaugungseffekt auftreten?

Ferner läßt sich auch folgendes nicht erklären: Wenn man von der Pečinaquelle absieht, hat keine einzige von den Gačkaquellen einen Fluß im Hinterland. Wieso äußern sich dann die Regengüsse des Winters und des Frühjahres so plötzlich in der Wasserlieferung der Quelle? Die Versuche, die hydrographischen Phänomene der Ponore einerseits und der Quellen andererseits durch geschlossene Höhlenzüge zu erklären, haben selbst in einem so ausgereiften Karstgebiet, wie dies der Krainerkarst repräsentiert, zu keinem Erfolg geführt. Ich erwähne hier nur das gescheiterte Aktionsprogramm des k. k. Ackerbauministeriums zur Meliorierung der Poljen des Gurk- und des Laibach-Flußgebietes. Dieses Programm basierte auf den Vermutungen des Höhlenforschers Regierungsrates KRAUS, die Ponore und die Quellen seien durch Höhlen mit einander verbunden. Die Fälle, wo eine solche Annahme gestattet ist, werde ich später anführen (S. 324 u. ff.). Im vorliegenden Falle ist diese Annahme nicht genügend motiviert.

Um zu verstehen, wieso die Theorie Prof. GRUNDS zur Erklärung der Gačkaphänomene versagt hat, wollen wir die Annahmen, auf welchen seine Theorie basiert, einer Prüfung unterziehen. Das Karstgebirge ist, sagt GRUND, soweit es aus Kalk besteht, vielfach geklüftet und in den Klüften zirkuliert das Wasser ganz analog einem Grundwasser, nur rascher. Er spricht von einer Klüftungsziffer und bezeichnet dann den Kubikinhalte der hydrographisch nutzbaren Klüfte in Prozenten des geklüfteten Gebirges. Er berechnet diesen Wert für das Polje von Livno mit 0·002—0·006 und bemerkt: «Meine Berechnung war nur ein vorläufiger Versuch, mit sehr unzulänglichem Material zu einer angenäherten Vorstellung zu gelangen und es wird eines ausgedehnten Beobachtungsmateriales bedürfen, um diesen Wert exakt zu gewinnen.» Er geht also von der Vorstellung aus, es sei das Karstgebirge in seiner Gänze ziemlich einheitlich geklüftet. Und das entspricht nicht der Wirklichkeit. Es treten im Gegenteil ganz gewaltige Differenzen zwischen den hydrographisch nutzbaren Klüftungen auf. Ich will eine Reihe von Beispielen bringen, einmal für die bedeutende Durchlässigkeit und dann wieder für die Undurchlässigkeit des Kalkgebirges.

1. In dem kaum 200 m langen Stollen Vlaškopolje versitzen sich während der Herbstmonate nahezu 2 m³/sec. (Kreidekalk).

2. Aus PUTICK «Katavotrons in den Kesseltälern von Krain»: «Im Osten und Norden des Tales (von Planina) sikern die Niederwässer und die Mittelwässer des Unzflusses mit großer Gier durch filterähnliche Schutthalden nach einem unbekanntem Untergrund. Die Absorptionsspalten vermögen selbst 70—75 m³/sec. zu verschlingen.»

3. In der Kreide zwischen Mons und Havre (Belgien) wurde ein Kanal gebaut und nicht verkleidet. Das Wasser versiegte vollkommen. Desgleichen das Wasser in einem Kanal durch Kohlenkalkstein zwischen Bilton und Ath (England). (Nach M. F. STAPFF.) Ein solches Versiegen wurde auch in einem Wasserzuleitungskanal für den Markt Dabar in Kroatien konstatiert und der Kanal wurde aufgelassen.

4. Der durch eine 12 m hohe Talsperre begrenzte Stauweiher in der belgischen Kreide füllte sich bloß bis zu einer Höhe von 2·15 m (STAPFF).

Für die Dichtigkeit des Kalkfelsens sprechen folgende Erfahrungen:

1. Im Tal der Rečina wird das Wasser für die Kraftanlage der MÉNIERSCHEN Papierfabrik durch einen etwa 200 m langen, unverkleideten Syphon hoch über dem Mittelwasser des Flusses durch Kreidekalk nach der Druckkammer geleitet. Meßbare Wasserverluste treten nicht auf.

2. Beim Bau des Elektrizitätswerkes Waldegg erwies sich der unverkleidete, durch Dachsteinkalk geführte Zuleitungsstollen 6 m über dem Mittelwasser als praktisch wasserdicht.

3. Eine Reihe von Kraftstollen in den bayrischen Kalkalpen sind unverkleidet.

Aus den zitierten Beispielen geht hervor, daß die Klüftigkeit des Kalkes in den denkbar weitesten Grenzen schwankt und daß infolgedessen von einer bestimmten Klüftungsziffer des Kalkgebirges wohl kaum geredet werden kann. Nun bedenke man: Die Auffangsfläche für die atmosphärischen Niederschläge ist eine ganz enorme. Außerdem besitzt das Wasser auf den ersten Metern seines Weges in der Tiefe soviel Kohlensäure, um die Klüfte auszuweiten und werden deshalb die atmosphärischen Niederschläge auf dem betroffenen Gebiet mehr oder weniger rasch versickern. Das Wasser erschöpft jedoch nach BISCHOF den größten Teil seiner Lösungsfähigkeit bald und ist auf die Wege angewiesen, welche von der Natur geboten sind. Zudem ist die Durchflußfläche im horizontalen Sinn weitaus kleiner als die Durchflußfläche im vertikalen Sinn, es wird daher die mehr oder weniger große Klüftung des Kalkgebirges einen eminenten Einfluß ausüben auf die Wege, welche das verschluckte Wasser im Gebirginneren einschlägt. Wenn wir uns daher über die Karstwasserkirkulation klar werden wollen, müssen wir uns zunächst fragen, wo ist große und wo ist kleine Klüftigkeit zu erwarten? Wenn wir diese Frage beantwortet haben, müssen wir dann untersuchen, inwieweit wird das Wasser die von der Natur gebotenen Bahnen ausbauen, was kann das Wasser machen und und was kann es nicht?

Die Klüftigkeit des Gebirges steht in einem offenkundigen Zusammenhang mit der Tektonik. Der Gebirgsschub verteilt sich, wie man oft beobachten kann, in der Nähe der Erdoberfläche, also in den obersten drei, vier Kilometern der Erdrinde, sehr ungleichmäßig auf die Gebirgsglieder, denn er wirkt nicht, wie in den tief gelegenen Zonen, auf eine latent plastische Masse, sondern auf mehr oder weniger starre Körper. So sieht man stellenweise Gebirgspartien in ihrem alten Schichtverband und mit wohl erhaltenen Fossilien und daneben gleich Parteien, welche förmlich durcheinander geknetet erscheinen und vollkommen ihre alte Struktur verloren haben.

Dr. WAAGEN führt in seinem «Beitrag zur Geologie der Insel Veglia» eine ganze Reihe derartiger Beobachtungen an. So bemerkt er z. B. daß eine parallel zur Längserstreckung der Insel Veglia streichende viele Kilometer lange regelmäßige Gebirgsfalte in der Nähe der Stadt Veglia in einer chaotischen Weise zertrümmert und überschoben erscheint. Eine ganze Reihe ähnlicher Beobachtungen konnte ich machen, als ich im Sommer d. J. mit dem Geologen Dr. VOGL die Umgebung der Bucht von Buccari beging; desgleichen am Ostfluß des Kapellagebirges. Solche oft unvermittelte Änderungen im tektonischen Charakter eines Gebirgszuges können nicht ohne Einfluß auf die Zirkulation des Kluftwassers bleiben. Das liegt auf der Hand. Wenn wir nun den Gebirgsbau des innerkroatischen Hochlandes einer Betrachtung unterziehen, so sehen wir auf den ersten Blick, daß das Gebirgsland zwei unter einem spitzen Winkel sich schneidende Streichrichtungen aufweist. Prof. GRUND weist schon in seiner «Karsthydrographie» auf diese Eigentümlichkeit des innerkroatischen Hochlandes hin und nennt dieses tektonische Phänomen «die Schaarung der Lika». Wir haben es mit der Wirkung zweier zeitlich getrennter Gebirgsschübe verschiedener Druckrichtung zu tun. Zwischen einem Netzwerk von stehengebliebenen Rippen sind einzelne Schollen abgesunken, die heutigen Poljen und die Rippen selbst wurden von Verwerfungen durchsetzt, deren ich selbst eine bedeutende Anzahl konstatieren konnte. Ich habe diese Verwerfungen im Kapitel «Entstehung des Gačkopoljes» aufgezählt. Vorderhand genügt die Tatsache. Das Absinken von Schollen ist, wie schon dargetan (S. 307), gleichbedeutend mit einer Lockerung des Gebirgsgefüges und die Bruchlinien, welche ein Schollenfeld umgeben, sind ganz naturgemäß klüftige Zonen ersten Ranges. Und auch die Schollen selbst werden während des Absinkens manchen tektonischen Störungen unterworfen, von welchen die Rippen ringsum verschont bleiben. Die Schollenfelder sind infolge dieser größeren Klüftigkeit natürliche Sammelbehälter für das Karstwasser und das aufge-

speicherte Wasser wird sich, unter Benützung der vorhandenen Wege geringsten Widerstandes in das benachbarte Gebiet großer Klüftigkeit, in das nächste Senkungsfeld ergießen. Und Wege kleinsten Widerstandes sind ganz offenbar die Klüfte und Sprünge, welche die Gebirgsrippen durchsetzen. Dies entspricht auch der von mir konstatierten Tatsache, daß die Vaclusequellen des Gačkafusses auf Verwerfungsspalten liegen.

Denken wir uns nun ein normal geklüftetes (d. h. von vielen aber schmalen Spalten durchsetztes) Kalkgebirge, welches von einer zertrümmerten, stark wasserabsorptionsfähigen Zone durchsetzt ist. Das Terrain sei hügelig und mit Buchenurwald bestanden. Das Wasser sättigt sich in der humusreichen Terrainbedeckung mit Kohlensäure. Es wird in der Bodenbedeckung eine zeitlang zurückgehalten, wird seine Lösungsfähigkeit aus früher schon angegebenen Gründen zum Teil erschöpfen, wird sich auch mit ungelösten, suspendierten Teilchen beladen und allmählich in die Klüfte des Gebirges eintreten. Zunächst wird schon die Verteilung dieser Niederschläge auf den Gebirgskörper eine sehr verschiedene sein. Die Dolinenböden werden viel mehr Wasser abgeben als die Dolinenhänge.¹ In den Klüften selbst wird das Wasser die denkbar verschiedensten Bewegungswiderstände finden. Es wird in den breiteren Klüften am lebhaftesten zirkulieren, in den schmalen langsamer und in manchen wird es stagnieren. Die lösende Wirkung des Wassers, welches noch einen Kohlensäure-Überschuß aufweist, ist in einer von Wasser erfüllten Kluft unter sonst gleichen Umständen direkt proportional der Durchströmungsgeschwindigkeit, nachdem bei einer größeren Wassergeschwindigkeit in der Zeiteinheit mehr lösungsfähiges Wasser in den Reaktionsbereich an der Kluftwand kommt, als bei langsam strömendem. Die Länge der Strecke, auf welcher das Wasser noch lösen kann, wird direkt proportional sein der Kluftbreite, nachdem in einer breiten Kluft bei konstanter Reaktionsgeschwindigkeit die Lösungsfähigkeit nicht so rasch erschöpft sein wird, als in einer schmalen. In feinen Klüften mit langsam bewegtem oder stagnierendem Wasser werden sich die suspendierten Lehm- und Schlammteilchen ebenso absetzen, wie der Sand im Bunnenschatten eines regulierten Flusses. Auf die beiden erst-erwähnten Ursachen ist die oft beobachtete Tatsache der unter Dolinen stark erweiterten Klüfte zurückzuführen, eine Erscheinung, welche man fälschlich als primäre Ursache der Dolinenbildung gedeutet hat. Alle drei Ursachen im Verein lassen erkennen, daß das Wasser die Ten-

¹ Siehe die eingehenden Darlegungen des 8. Abschnittes.

denz haben wird, ein möglichst einfaches Netz von Zirkulationswegen zu schaffen, indem die günstigsten Wasserbahnen erweitert, die ungünstigen hingegen verlandet werden. Es ist nun aus hydromechanischen Gründen ganz klar, daß sich die rascheste Wasserbewegung unter sonst gleichen Umständen dorthin richten wird, wo der meiste Platz vorhanden ist, nach den durch tektonische Störungen, Aufblätterung der Schichten usw. stark gelockerten Gebirgspartien. Diese untergeordneten Wasserbahnen werden sich derart ausbilden, daß die Abfuhr der Niederschläge nach diesen Sammelbecken so rasch als möglich erfolgt. Eine Tendenz, die ja auch der Talbildung als Leitmotiv zugrunde liegt. In den gelockerten Gebirgspartien wird sich das Wasser so hoch stauen, bis Zufluß und Abfluß im Gleichgewicht sind. Die Zuflußmöglichkeiten sind zahllos, wie es der großen Auffangsfläche der Niederschläge entspricht. Die Abflußmöglichkeiten im horizontalen Sinn sind sehr beschränkt. Infolgedessen müssen wir an Quellen ein rasches Ansteigen, entsprechend der raschen Steigerung des hydrostatischen Druckes, hingegen ein langsames Abfließen konstatieren. Ganz anders wird sich die Tätigkeit des Niederschlagswassers auf der Oberfläche der stark zertrümmerten Gebirgspartien gestalten. Dort ist die Wasserkapazität (wie wir aus der zweiten Serie der von mir gebrachten Beispiele ersehen können), wesentlich größer als die Menge der abfließenden meteorischen Wässer. Der Gebirgstheil ist wohl durchklüftet und das Wasser, welches an der Oberfläche sich gesättigt und lösend gewirkt hat, wird wie durch ein Gradierwerk rieseln, mit der Luft reichlich in Berührung kommen und genau so wie an Mühlstauwerken und wie an der Decke von Höhlen, Kohlensäure abgeben und Kalk ausscheiden. Es wird die Tendenz haben, das klüftige Gebiet gegen Tag zu dichten und die Verhältnisse herzustellen, wie sie im normalen geklüfteten Kalkgebirge herrschen.¹ Gleichgewicht zwischen Wasserzufuhr und Abflußmöglichkeit. So konnte ich im Guttensteinkalke des Dragatales eine ganze Reihe weiter, mit groben Trümmern ausgefüllter Kalkklüfte wahrnehmen, welche vollkommen zugesintert waren. Dasselbe Phänomen wiederholt sich in der Felsnische der Pečinaquelle und kann in vielen Steinbrüchen auch der steirischen Kalkgebirge wahrgenommen werden. Die Natur hat die Tendenz, nutzlose Hohlräume zu schließen.

Wir haben nun ein Bild von den Kluftwasserverhältnissen im Bereich einer Senkungsscholle bekommen. Die atmosphärischen Nieder-

¹ Auf diese Tendenz zur Abdichtung soll schon RICHTER in einer Schrift seines wissenschaftlichen Nachlasses hingewiesen haben.

schläge kommen in dieser Region mit großer Geschwindigkeit zusammen. Eine Stelle aus PUTICKS «Katavotrons in Krain» gibt ein sehr anschauliches Bild von diesem Zusammenströmen. Er schildert die Wirkung von Regengüssen im Kesseltal von Planina, Krain, wie folgt: «... Denn nach jedem heftigen und längere Zeit anhaltenden Landregen brechen aus allen Zuflußhöhlen des Tales ganz enorme Wassermengen mit wildbachähnlicher Vehemenz hervor. Dieselben strömen alle nach dem Hauptrezipienten zusammen und füllen alsbald die Ufer und es beginnt die Inundation.» Es handelt sich nun um die Art und Weise, wie das Senkungsfeld seine Kluftwässer weitergibt. Es handelt sich hier nicht mehr um die bloße Abfuhr der auf eine weite Fläche niederfallenden Regenmassen, sondern um den Abfluß der gesammelten Wassermassen eines ganzen Landesteiles. Die Strömungsvorgänge werden sich mit viel größerer Geschwindigkeit und viel größerem Aufwand an Gefälle vollziehen, als in dem Kluftgeäder des primären Einzugsgebietes. Das Wasser wird sich mit Gier einer Abflußmöglichkeit bemächtigen und diese Abflußmöglichkeit ausbauen so gut es kann. Eine Verwerfung und wenn sie auch unbedeutend wäre, gibt einen wertvollen Angriffspunkt. Lockere Gesteinmassen liefern das Material zu lokalen Erosionswirkungen und je mehr ein Hohlraum ausgeweitet wird, desto mehr Material wird nachstürzen. Diese Erosion ist jedoch prinzipiell verschieden von der Erosion in einem Flußtal, denn sie erzeugt kein durchlaufendes Längenprofil, auch ist in der Regel keine Möglichkeit zu einem Geschiebetransport vorhanden und während das Wasser an einer Stelle mit reichem Schuttmaterial ausgerüstet, an der Erweiterung eines Hohlräumes arbeitet, wird es sich bald darauf durch enge Klüfte zwängen müssen, ohne die Fähigkeit zu besitzen, Erosionsarbeit zu leisten. Die Höhlenbildung ist eine lokale Erscheinung, wie die zahlreichen Beobachtungen über die Zeiträume, welche das Wasser zur Durchfließung eines Höhlengebietes benötigt, unzweideutig dartun. (GRUND: Morphologie des dinarischen Gebirges.) Auch die zahlreichen Bifurkationen, welche durch die Färbeversuche von VORTMANN und von vielen anderen Forschern konstatiert worden sind, erklären sich von selbst. Wohl aber fragt es sich: in welchem Verhältnis steht dieses durch eine Kluft gezwängte und vielleicht auch manchen Hohlraum durchheilende Wasser zu dem benachbarten, jedenfalls auch mehr oder weniger klüftigen Kalkgebirge, welches von der Kluft, bezw. von einem gelockerten Gesteinsstreifen durchsetzt wird? (Den Fall, daß dieses Wasser von einem Poljenfluß geliefert wird, schließe ich vorderhand noch aus. Das Wasser habe seit dem Versickern die Gebirgsoberfläche nicht mehr erreicht.) Zu diesem Zweck denken wir uns eine etwas

wasserdurchlässige Betonmauer, welche zwei Bassins mit verschiedenen hoch gelegenen Wasserspiegeln trennt. Diese Betonmauer sei von einem breiten Riß durchzogen. Das Wasser wird durch diesen Riß in das tiefergelegene Bassin strömen. Durch die Betonmauer selbst geht sicher ebenfalls Wasser in das tiefere Bassin, doch merkt man es nicht, nachdem die Kraft des unter Druck in die schmalen Zwischenräume eingepreßten Wassers durch die bedeutenden Reibungswiderstände gewissermaßen totgeschlagen wird. Die Vorderfläche der Mauer wird relativ trocken erscheinen. So müssen wir uns etwa den Vorgang denken, wenn in den Švicaseen ein relativ schmaler Kalkrücken zwei Wasserbecken mit 15 m Niveaudifferenz trennt und trotzdem trocken erscheint, oder wenn die Felswand neben dem Syphon der MÉNIERSCHEN Papierfabrik nicht einmal schwitzt oder wenn die steilen Hänge hinter den Quellen der Gačka keine Quellen aufweisen. In der Kluft selbst wird das Wasser den Weg des kleinsten Widerstandes einschlagen und austreten, wo die Möglichkeit gegeben ist. Gegen Tag sucht, wie schon erwähnt, die Natur die nicht nutzbare Kluft abzudichten; wo das Wasser in Weitungen der Kluft oder zwischen geborstenen Schichten erodiert, wird es so manche in das Nachbargestein führende Spalte mit dem Zerreibseln ihres Schuttes dichten und es entsteht die Illusion eines Höhlenflusses nach Analogie eines oberirdischen wo doch zwischen beiden sehr wenig Verwandtschaft besteht, indem das Kluftwasser nach unten zu keine Grenze hat. Anders liegen die Verhältnisse dort, wo das Kluftwasser nicht aus dem Grundwasser eines zerklüfteten Gebirgskomplexes, sondern aus einem Poljenflusse stammt. Das Flußwasser hat bei seinem Eintritt in das Gebirgsinnere, wie GRUND erwähnt und wie auch meine eigenen Beobachtungen dartun, seine Lösungsfähigkeit noch nicht erschöpft. Das Wasser hat dazu in dem konzentrierten Zustand des Flußlaufes im lehmigen Terrain wenig Gelegenheit. Es wird also auf seinem Weg durch die Kluft seine erodierende Tätigkeit durch chemische Aktion unterstützen und wird die Bildung von Hohlräumen wesentlich befördern. Nachdem unter dem Flußlauf kein Grundwasser vorhanden sein muß, so kann der von WAAGEN zitierte Fall eintreten, daß der Fluß seine Sohle dichtet und daß er leere Hohlräume überfließt. Jedenfalls wird er mit dem größtmöglichen Gefälle in die Tiefe streben, wie dies auch GRUND erwähnt. Daß er nicht senkrecht absinkt, sondern in Kaskaden (Reka, Laibach etc.) ist ein Beweis für seine Tendenz, die Sohle zu dichten. Aber auch dieser Fluß verliert in dem Moment seines Eintrittes in das Gebirgsinnere den Flußcharakter und wird ganz und gar von den Klüftigkeitsverhältnissen abhängig, welche er auf seinem Weg vorfin-

det. Noch eines wäre zu der Zirkulation des Grundwassers in einem klüftigen Gebiet oben geschilderter Beschaffenheit zu bemerken. Im Winter und im Frühjahr, also während der großen Niederschläge, werden im Gebirgsinnern naturgemäß sehr bedeutende Niveaudifferenzen herrschen. Die Ausgleiche der Wassermassen werden sich rasch und mit großem Gefälle vollziehen. Der Kluftwasserspiegel wird nach den Hauptsammeladern steil abfallen und in dem Raum zwischen diesen abfallenden Grundwasserspiegeln und der Horizontalen wird das Gestein mit Wasser gesättigt sein. Bedenken wir nun einen Augenblick den Unterschied zwischen den «hydrographisch nutzbaren» Klüften GRUNDS und der tatsächlich vorhandenen Klüftigkeit des Kalkes. Der «hydrographisch nutzbare» Klüftungswert schwankt nach den GRUNDSchen Berechnungen zwischen 0·002 und 0·006. Die effektive Klüftung ist nach KATZER 0·17, nach LOZINSKI im galizischen Senonkalk noch viel größer. (Die Klüftigkeit des galizischen Senonkalkes komme der eines porösen Gesteins gleich.) Zwischen den Haarspalten dieser 17% und den hydrographisch nutzbaren Klüften wird es in einem Karstgebiet mit noch unausgebauten Wasserbahnen zahlreiche Übergänge geben, wenn auch, wie gezeigt, die Tendenz besteht, diese Übergänge zu beseitigen. Zur Zeit starker Regenfälle wird sich die Zirkulation des Wassers in den «hydrographisch nutzbaren» Klüften vollziehen. Wenn nun lange Zeit kein Regen fällt, werden sich die Grundwasserniveaus gegeneinander verschieben. Die großen Niveaudifferenzen werden verschwinden und die feinen Klüfte werden, wenn auch langsam, ebenfalls ihr Wasser nach den Hauptsammeladern abgeben und nur die Bergfeuchtigkeit wird in den Räumen ober den Grundwasserspiegeln bleiben. Wenn nun neuerlich ein Regen fällt, dazu noch infolge der bedeutenden Sommerverdunstung quantitativ stark dezimiert, so wird sein Wasser in erster Linie dazu dienen müssen, die zur Erzeugung einer ausgiebigen Wasserzirkulation erforderlichen Niveaudifferenzen zu schaffen, und zu diesem Zwecke müssen auch die bereits ausgeronnenen feinen Klüfte des Gesteines gefüllt werden.

Wenn daher der Regen nicht sehr bedeutend ist, wird sein Einfluß auf die Wasserführung der Hauptsammeladern keineswegs in der unvermittelten Art und Weise zur Geltung kommen, wie ein Winterregen.

Vergleichen wir nun die Ergebnisse unserer Betrachtungen über die voraussichtliche Ausbildung der Wasserbahnen im Karstgebirge mit den Verhältnissen, wie wir sie im Gačkolje angetroffen haben. Dort, wo das Quellwasser von dem Wasser eines verschwindenden

Poljenflusses stammt, haben wir Höhlenbildungen zu erwarten. Dieser Fall trifft bei der Pečinaquelle zu. Ihr Wasser stammt vom Likafluß und trübt sich, sobald im Likafluß Hochwasser eintritt. Die Pečinaquelle entspringt daher auch zum Unterschied von den anderen Quellen am Fuß einer kleinen Felswand und in ihrer Nachbarschaft finden sich, wie schon erwähnt, Reste eingestürzter Hohlräume. An der Felswand selbst ist eine Verwerfung sichtbar. Die übrigen Quellen haben keine Poljenflüsse im Hinterland und liefern immer klares Wasser. Alle liegen sie auf bedeutenden Bruchlinien, wie wir es erwarten mußten, und brechen nicht aus Höhlen hervor, sondern steigen syphonartig aus der Tiefe, am Bergfuß oder in nicht allzugroßer Entfernung von ihm. Dieses Aufsteigen der Quellen von unten, in der Nähe des Bergfußes, darf uns nicht wundern. Das Wasser, welches in einer Kluft zirkuliert und diese Kluft als Wasserweg ausbaut, ist, wie schon öfter erwähnt, in seiner Aktionsfähigkeit sehr beschränkt. Das Kluftgebilde ist so unregelmäßig als nur möglich und das Wasser paßt sich an, strömt dort, wo es kann. Es müssen daher syphonartige Wasserbahnen zu den Regeln gehören, wobei man unter Syphon keineswegs eine Höhle zu verstehen braucht. Alle Hohlräume, welche nicht direkt der Wasserzirkulation dienen, werden in der Tiefe verlandet, nahe an Tag zugesintert. Jedenfalls wird sich das Wasser jenen Weg frei machen und frei halten, auf welchem es am raschesten in den nächsten Hohlraum gelangt, in unserem Fall ins Freie. Nun ist der Bergfuß in einem der Denudation unterworfenen Gebirge keine ein für allemal feststehende Linie, sondern er wird, wie im Kapitel «Entstehungsgeschichte» dargetan, bergwärts rücken. Auf diese Weise kann der Bergfuß, wie bei der Majerovskaquelle, allmählich vom Quellaustritt wegrücken und die Quelle kommt dann, wie bei einem artesischen Brunnen, aus der Tiefe. Die Erscheinung hat in ihrem Wesen mit dem artesischen Brunnen tatsächlich eine gewisse Verwandtschaft. Dieses Abrücken wird im Verlauf der Denudation so lange dauern, bis sich dem Wasser eine neue Möglichkeit zum Vorbrechen mit geringeren Widerständen bietet. Geradeso wie sich Ponore schließen und andere öffnen, so kann dies auch bei Quellen stattfinden. Jedenfalls legt die von Tag aus erfolgende Zusinterung der Klüfte der Quellpunktsverlegung große Schwierigkeiten in den Weg, wie an der Majerovskaquelle zu ersehen ist. Es kann aber auch vorkommen, daß der Bergfuß auf seiner Wanderung landeinwärts einen großen Hohlraum schneidet. Dies habe ich im Krbavapolje bei Bunič beobachtet. Weitere Beispiele liefern die Vauclusequelle in Frankreich (an welcher zuerst das Phänomen der Karstquellen studiert wurde) und zahlreiche von GRUND beschriebene Quellen im bosnischen

Karstgebiete. In solchen Fällen beobachtet man auf das deutlichste das Schwanken der Austrittsniveaus, welches gleichzeitig ein Maß abgibt für die Grundwasserschwankungen im klüftigen Hinterland.

Die Höhenlage der Austrittsöffnung in der Quelhöhle der Vauclusequelle les Abimes schwankt nach MARTEL, um 24 m, gleichzeitig ein Beweis für die kleine Kapazität der Wasserbahn, wenn man dieses Maß mit dem geringfügigen Schwanken im Pegelstand des aus der Quelle entspringenden Flusses vergleicht. — Das Diagramm der sommerlichen Wasserstandschwankungen im Gačkafluß erscheint somit nach meinen Ausführungen über das Verhalten des Grundwassers während der sommerlichen Trockenperioden verständlich. Nur ein Punkt meiner Darlegung bedarf einer näheren Erklärung. Ich habe gesagt, daß ein großer Teil des Sommerregens aus den Sammeladern des Einzugsgebietes in die feinen Klüfte übertreten wird und infolgedessen kein plötzliches Ansteigen des Wasserspiegels in den Hauptklüften bewirken kann. Warum tut dies nicht auch der Winterregen? Es wurde schon erwähnt, daß zur Zeit des Wasserreichtums sämtliche Grundwasserspiegel viel steiler verlaufen müssen, als zur Zeit der Trockenheit. In Verbindung mit den größeren Gefällen stehen auch größere Geschwindigkeiten. Wenn wir ein Gewässer in einem durchlässigen Gerinne fließen lassen, einmal mit kleiner und dann wieder mit großer Geschwindigkeit, so wird im ersten Fall perzentuell weit mehr Wasser durch die Poren treten, als in letzterem.

Die hydrographischen Phänomene des Gačkopoljes haben somit eine befriedigende Erklärung gefunden. Nun wenden wir uns zu den Süßwasserquellen von Sv. Juraj. Wie sind die zahlreichen Süßwasser-ausbrüche unter dem Meeresspiegel möglich? Vauclusequellen können, von Ausnahmen abgesehen, nur auf trockener Erde entstehen u. zw. aus folgendem Grund: Eine klüftige Gesteinspartie, welche die Ausbildung bedeutender Wasserbahnen ermöglicht, ist niemals so dicht, daß sie nicht an vielen Stellen Wasseraustritte gestatten würde, notabene wenn sich ihr Wasserinhalt unter einem Überdruck befindet. Nur die Zusinterung durch kalkhaltige Tagwässer dichtet sie ab. Wir müssen daher annehmen, daß die Ausbildung der Quellsyphone von Sv. Juraj auf trockenem Land erfolgt ist. Nun erwähnt GRUND auf S. 197 seiner «Karsthydrographie» mehrere Beispiele für die Tatsache, daß die Festlandsküste seinerzeit viel weiter seewärts gelegen sein muß als dies heute der Fall ist. Er zitiert u. a. das vom Meer abgeschnittene Süßwasserneogen von Pago und Arbe. Diese Beispiele stehen mit unserer Vermutung im besten Einklang. Die Quellen von Sv. Juraj sind offenbar nichts anderes als echte Vauclusequellen. Die Seekarte der nördlichen

Adria zeigt, wie ich am Schluß des achten Kapitels ausführlich darlegen werde, daß der Meeresgrund dieselben orographischen Charakterzüge aufweist, wie das innerkroatische Hochland. Eine Reihe von gefällosen Ebenen verschiedener Niveaus, welche durch kurze und steile Längs- und Quertäler miteinander verbunden sind. Die Ebenheit und Gefällosigkeit kommt in der Seekarte noch weit deutlicher zur Geltung, als auf der topographischen Karte des Hochlandes. Das kroatische Küstengebirge trennt diese unterseeischen Poljenkomplexe von den Poljen des Hochlandes. In der Gegend von Valle Molini schneiden sich nun drei gewaltige tektonische Störungslinien: Die ESE—WNW-liche Linie über die Likaponore, durch den steilen Nordhang des Rjunevica-Plješivica-zuges im Terrain markiert, die E—W-liche Linie über Otočac, Švica und die E—W-liche Bruchlinie über Vlaškopolje. Auf diesen drei Bruchlinien liegen auch die Hauptponore des Likaflusses und der beiden Gačkaarme. Diese Ponore, in der Verbindung mit den Bruchlinien, mit der Orographie des Meeresgrundes und dem Auftreten der Quellen von Sv. Juraj sagen genug. Wir haben hier eine vollendete Analogie zu den Quellenphänomenen des Gačkaflusses. — Ich möchte übrigens noch einige Beispiele anführen. Dort, wo der von Bruchlinien begleitete, nahezu gradlinige, durch eingeklemmte eozäne Mergel ausgezeichnete, NW—SE-lich streichende Talzug Fiume—Novi bei Novi unter das Meer taucht, brechen Vaclusequellen hervor. Desgleichen im Valle Vlaška, aus der von mir anlässlich der geologischen Vorstudien für den Senjsko-Bilotunnel konstatierten Bruchlinie, welche die Melaphyrdecke des Dragatales gegen die Triaskalke abschneidet. Die durch ihre Austernbänke bekannten, gewaltigen Süßwasserquellen in der Bucht von Jablanac liegen auf einer E—W-lich verlaufenden Bruchlinie, welche sich im Relief des Likagebietes durch das tiefeingeschnittene, schnurgerade, bei Kossinj in das Erosionstal der Lika mündende Bakovactal verrät. Dasselbe gilt von den Quellen bei Volosca und wird sich höchstwahrscheinlich überall dort nachweisen lassen, wo echte Vaclusequellen dem Meeresboden entströmen. WAAGEN erwähnt in seinem mehrfach zitierten Aufsatz über die Wasserversorgung von Istrien, daß eine submarine Quelle bei dem neapolitanischen Städtchen Torre dell' Annunziata mit Erfolg zur Trinkwasserversorgung gefaßt worden ist. Wenn man nicht eine durch nichts zu motivierende Höhle mit Steigschacht zur Erklärung heranziehen will, so muß man sie für eine Vaclusequelle erklären, welche der von mir gekennzeichneten Ursache ihre Entstehung verdankt. Die Spalte muß von der Quelle landeinwärts durch Sinterung gedichtet sein. Das Wasser steigt an jenem Punkt empor, wo die Decke aufhört. Das neapolitanische Beispiel ist übrigens ein Beweis

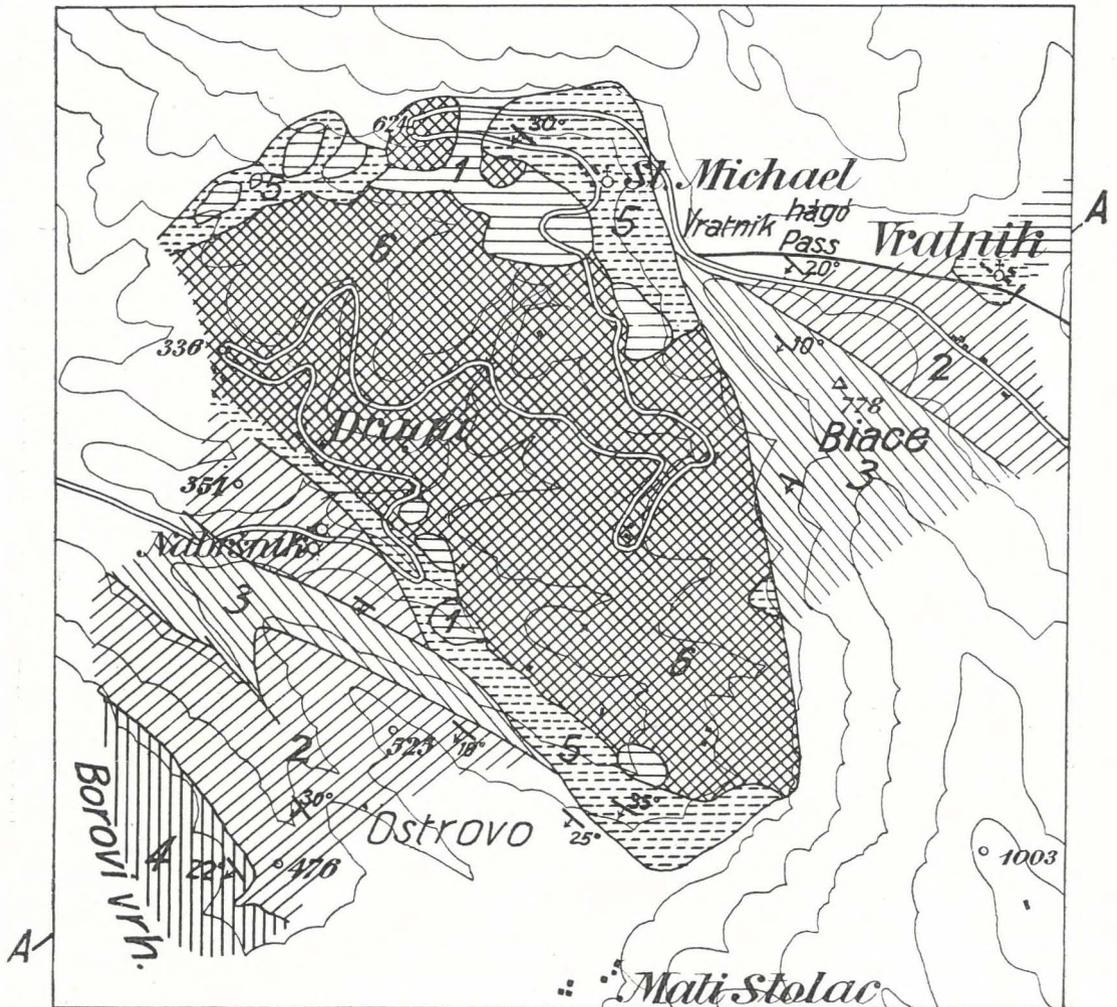


Fig. 26. Geologische Karte des Dragatales.

1. Hellblauer, korallenführender Guttensteiner Kalk; 2. gelblichweißer sandiger Kalk, z. T. dunkel und bituminös; 3. Grauer, mit weißen Adern durchsetzter dichter Dolomitmalk; 4. dunkelblauschwarzer Guttensteiner Kalk mit viel Gastropoden; 5. dunkelroter, harter Melaphyrtruff und helleres Konglomerat mit blaßblauen Kalksteingerölle. Mit dünnen Sandsteineinlagerungen; 6. Dunkelroter, grünlichschwarzer Melaphyr. Maßstab 1 : 25000.

dafür, daß die Erscheinung der vom Meer nachträglich überfluteten Vaclusequelle sich nicht bloß auf die kroatische Küste beschränkt. An dieser Stelle muß ich noch auf eine interessante Tatsache hinweisen, welche ebenfalls geeignet ist, die Bedeutung der Verwerfungen für die

Grundwasserzirkulation ins rechte Licht zu setzen. Wenn man im Kartenbild die kroatische Küste ansieht, so bemerkt man, daß das Terrain sehr rasch ansteigt und schon zwei bis drei Kilometer landeinwärts Höhen von 600 bis 900 m aufweist. Nur an einer Stelle hat die Natur eine tiefe Bresche in das Land geschlagen. Im Dragatal bei Zengg, 5 km von der Mündung, verzeichnet die Karte eine Höhenkote von 187. Zwischen diesem Punkt und dem 698 m hoch gelegenen Vratnikpaß öffnet sich eine flach ansteigende Mulde. Rechts gipfeln die steilen bewaldeten Hänge in schroffen Felswänden, an denen die Schichtung des nach der Meeresküste unter 10° — 30° einfallenden Kalkes wunderbar deutlich hervortritt. Links brechen aus den ebenfalls steilen Abstürzen des Veljun massige Partien eines hellen, ungeschichteten Kalkes. In lebhaftem Gegensatz zu den reichgegliederten Flanken stehen

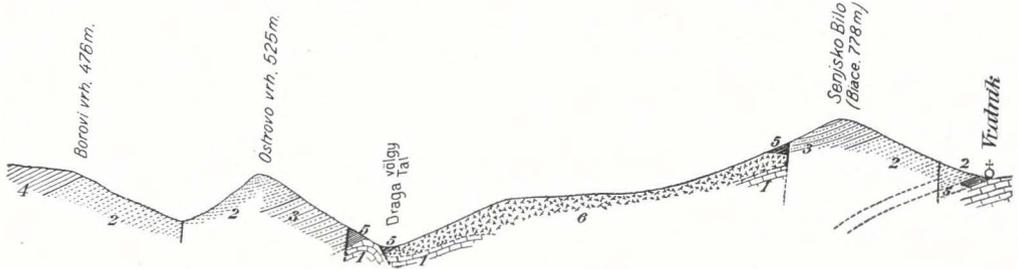


Fig. 27 Geologisches Profil A—A: vom Vratnikpaß bis zum Borovivrh.
Zeichenerklärung siehe bei Figur 26.

die sanften, runden Bergformen der Melaphyrdecke des Muldenbodens, welche unter dem Vratnikpaß einsetzt und sich, ein Areal von etwa $2\frac{1}{2}$ km² bedeckend, bis zum Eingang der 5 km langen gewaltigen Erosionsschlucht Sveti Križ—Zengg herabsenkt. An den Rändern wird die *Melaphyrdecke* von tiefroten, wie die mikropetrographische Untersuchung ergeben hat, submarin abgelagerten Melaphyrtuffen und von grünlichen, unter 20° — 40° nach dem Meer einfallenden Konglomeraten überlagert. Ich habe dieses Gebiet auf das eingehendste studiert und sorgfältig kartiert. Die Mulde ist nicht etwa ein Kesselbruch, wie man glauben sollte, sondern ein Horst, welcher mit trapezförmigem Grundriß zwischen vier tektonischen Störungslinien stehen geblieben ist. Wenn man bedenkt, daß das Nachbarterrain vor der tektonischen Störung, mit dem Kalk, welcher den Melaphyr überlagerte, in einem Niveau gewesen sein muß, daß sich ferner die *Melaphyrdecke*, das ist die durch Denudation geschaffene neue Oberfläche, stellenweise 500 m unter den Rändern des abgesunkenen Nachbarterrains befindet, so

muß man zugeben, daß eine Denudationsarbeit geleistet worden ist, gegen welche die Erzeugung eines ebenen Poljenbodens verschwindet. Wir erkennen nun zwei Dinge: erstens muß die Überlagerung der *Melaphyrdecke* zur Zeit des Beginnes der Horstbildung eine ganz gewaltige gewesen sein, damit die Denudation trotz gegensinniger Schollenbewegung eine derartige Niveaudifferenz erzeugen konnte. Die Partien der Verwerfungsklüfte, welche heute der Beobachtung zugänglich sind, müssen sich damals in sehr großer Tiefe befunden haben, müssen daher, wie ich im Abschnitt über die Entstehung der Poljen näher begründet habe, glatt gewesen sein und dicht, nachdem Schleppung vorausgegangen ist. Nahe an der damaligen Erdoberfläche hingegen muß das Gestein außerordentlich zertrümmert und gelockert worden sein, sonst hätte die Denudation nicht so rasch in die Tiefe gearbeitet. Nahe an Tag waren die Brüche uneben und splitterig. Das zerklüftete Horstgebiet hat den vom Schmelzwasser gespeisten Torrenten das Schuttmaterial geliefert, welches nötig war, eine so gewaltige echte Erosionsschlucht zu schaffen, wie das Felsental Sv. Križ—Zengg. Die Kartierungsarbeiten haben ergeben, daß die tektonischen Störungen im Grundriß das Terrain in ziemlich geraden Linien durchziehen, im prinzipiellen Gegensatz zu den verschwommenen, zackigen Brüchen am Karstplateau. Ein weiterer Beweis für das Alter dieser Störungen und für die Tiefe, in welcher damals die *Melaphyrdecke* gewesen sein muß. Der eklatanteste Beweis ist aber folgender: Wenn man sich hinter dem Senjsko-Bilozug eine Karstwasseransammlung denkt, für deren Existenz übrigens soviele Beweise vorliegen, daß sie gar nicht bezweifelt werden kann, so sollte man glauben, daß ihr Wasser nach der tiefen Dragamulde hin gravitieren sollte, mit welcher sie durch zwei bedeutende Verwerfungen kommuniziert. Die *Metaphyrdecke* ruht, wie ich an vielen Punkten nachweisen konnte, auf Kalken (1. in den Fig. 26 und 27), nicht etwa auf Werfenerschiefern, wie Cvijić in seinem Gutachten irrtümlicherweise bemerkt hat. Statt dessen gelangt nicht ein Tropfen Karstwasser aus dem Melnicegebiete in das Dragatal, die Klüfte sind eben dicht. Die wenigen für die Zengger Wasserleitung gefaßten Quellen sind bei der gewaltigen Niveaudifferenz, welche zwischen dem Karstwasser von Melnice und zwischen der Talsohle in Sv. Križ herrschen muß, gar nicht der Rede wert. Nicht einmal die beiden tiefen, zwischen Ostrovo und Borovi dem Schichtstreichen parallel laufenden Schluchten können Quellen aufweisen, trotzdem sie dazu prädestiniert-scheinen. Wir sehen also, wenn eine Verwerfung in der Karstwasserzirkulation eine Rolle spielen soll, so muß sie relativ jung sein. Denn nur in den obersten Teilen der Erdkruste wirkt sie lockernd und splitternd.

Während die Vaclusequellen Schläuche darstellen, welche sich das Kluftwasser gewaltsam frei gehalten hat, den Tagwässern zum Trotz, welche mit ihrer ganzen chemischen Aktionsfähigkeit auf Abdichtung der Kluft hinarbeiten, sehen wir in den Ponorregionen das Entgegengesetzte. Das durch trägen Lauf in pflanzendurchwachsenem Bett mit Gasen gesättigte Wasser des Poljenflusses arbeitet an der Erweiterung der Klüfte und an der Aufschließung von neuem. Nur die Lehmabsetzung im Inundationsgebiet wirkt diesen Bestrebungen entgegen. Auch GRUND weist in seiner «Karsthydrographie» an mehreren Stellen auf diesen Unterschied zwischen Quell- und Ponorregion hin. Nur hat das von ihm und anderen beobachtete Fehlen einer rückschreitenden Erosion der Vaclusequellen seinen Grund nicht bloß in der mechanischen und chemischen Aktionsunfähigkeit des Quellwassers, sondern insbesondere in der eigenartigen Entwicklungsgeschichte der Vaclusequelle.

Es ist selbstverständlich die durch das Poljenwasser aufgeschlossene Ponorregion zum Studium der Natur des Kluftgebietes viel geeigneter als das Quellgebiet. Und da zeigt uns nun ein Blick auf die beigegefügte Skizze der Ponorverteilung am Nordwestrand des Gačkopoljes, wie die Ponore wohl in Zonen, aber keineswegs in geraden Zeilen auf den großen Bruchlinien liegen, welche den Poljenrand begleiten. Ganz entsprechend der splitterigen Beschaffenheit der Frakturen in der heterogenen, starren obersten Erdkruste. Es erklärt sich aber auch die Mannigfaltigkeit im Habitus der Ponore. Ich habe die Ponore in den ersten Abschnitten als sehr integrierende Bestandteile des Landschaftsbildes ausführlich geschildert. Ihre Formen bewegen sich zwischen den beiden Extremen des Dolinenponors und des Schachtponors. Der Dolinenponor unterscheidet sich äußerlich von der einfachen Doline durch eine Anhäufung von losen Felsblöcken an der tiefsten Stelle, welche niemals fehlt. Während die einfache Doline durch Denudation des mehr oder weniger kompakten Kalkfelsens entsteht, wobei die Denudation eine Schicht vollkommen beseitigen muß, bevor sie die nächste in Angriff nimmt, wirkt die Auslaugung im Kluftgebiet im Innern des geborstenen Gesteines gleichzeitig. Die Blöcke werden von allen Seiten in Angriff genommen und ihre Reste bleiben am Dolinengrund liegen. Wenn man im Boden der Ponordoline einen Schacht niederbringen würde, so träfe man mit großer Wahrscheinlichkeit ebensowenig einen geschlossenen Hohlraum wie unter der einfachen Karstdoline.¹ Der Schachtponor hingegen war schon ursprünglich

¹ Die künstlichen Schächte in den Dolinenponoren von Vlaškopolje haben auch keine Hohlräume angefahren.

ein klaffender Spalt, welcher im Lauf der Zeit durch das niederströmende Wasser zu einem Schacht von sehr wechselndem Querschnitt ausgelaugt worden ist. Auch er löst sich in der Tiefe, wie ich oft beobachten konnte, in zahlreiche Klüfte auf, oder er mündet, wie der Stefanieponor im Švicasee, in einen tonlägigen Gang, welcher sich ebenfalls in diskreten Spalten verliert. Bezeichnenderweise finden sich Schachtponore meist zwischen Felspartien, welche aus dem Terrain hervorragen, an den Grenzen der Ponorzonen, während die Dolinenponore auf Senken in der Zonenmitte auftreten. Wir haben es eben in den Schachtponoren mit Apophysen der Hauptkluft zu tun, welche das im übrigen ziemlich unzerborstene Nebenterrain durchsetzen. So liegt z. B. der größte Schachtponor des Gačagebietes, der Stefanieponor, nicht an der tiefsten Stelle des Švicasees, sondern nahe dem Nordrand. Die Schachtponore an der nördlichen Gačka sowie am Poljicearm liegen immer abseits vom Talweg, oft hundert und mehr Meter vom Fluß entfernt. Eine sehr interessante Folge der Reservoirnatur des Poljenbruchrandes ist die Tatsache, daß sämtliche Kanäle, welche vom Fluß nach den Ponoren führen, gegen die Strömungsrichtung des Flusses und gegen das Gefälle der Talauffüllung verlaufen.¹ Sie ist ein Beweis dafür, daß die Kanäle nicht durch Überfließen des Poljenflusses nach den Ponoren, sondern durch Überfließen der Ponore nach dem Flußlauf entstanden sind. Die Kanäle ziehen meist eine Strecke hindurch hart am Hochufer, gezwungen durch die Erscheinung, daß sich die Akkumulation eines hochwasserführenden Flusses von den normalen Ufern nach den Hochufern hin abdachen und durchbrechen dann die Aufschüttung in einem kurzen Quergraben schräg zur Flußrichtung, wie einmündende Bachfurchen. Erst durch das Überwiegen der erodierenden Kraft der in die Ponore überfließenden Gewässer der Flußhochfluten wurde in den Kanälen das gegensinnige Gefälle hergestellt, welches dem Verlauf der Tiefenlinie so offenkundig widerspricht. Man sieht bei den oft über Nacht hereinbrechenden Hochfluten der Gačka immer dieselbe Erscheinung. Einen halben Tag hindurch stürzt das austretende Flußwasser mit großer Vehemenz in die Ponore, dann läuft die Hochflut an und die Ponore beginnen ihrerseits Wasser nach dem Fluß zu senden. Ringsum bleibt die verkarstete Ebene trocken, ein Beweis, daß der Wasserspiegel in der Bruchzone über dem «Karstwasserspiegel» stehen muß.

★

¹ Siehe auch S. 311.

Während der Drucklegung dieser Arbeit mit den Vorbereitungen zu einer Reise nach den Rocky Mountains beschäftigt, finde ich in der amerikanischen Literatur die Beschreibung eines interessanten Gegenstückes zu den Vaclusequellen an den Rändern des Gačkapoljes (Geology of the Edwards Plateau and Rio Grande Plain adjacent to Austin and San Antonio, Texas, with Reference to the occurrence of underground Waters; by Robert T. Hill and T. Wayland Vaughan. Eighteen annual Report of the Un. St. Geological Survey 1896—1897). Interessant deshalb, weil hier die Umstände die einwandfreie, eingehende Untersuchung einer Bruchzone im Kalkgebirge, ihres Verlaufes, ihrer Beschaffenheit und ihrer Beziehungen zum Auftreten von Vaclusequellen gestatteteten.

Das Edwardsplateau bildet den südöstlichen Ausläufer des Llano estacado Plateaus in Texas und bricht mit einer EW-lich verlaufenden Steilstufe gegen die Rio Grande Ebene ab. Die Oberfläche des Edwardsplateaus wird von den beinahe ungestört lagernden Schichten des Edwards-Kalkes der unteren Kreide gebildet. In der Rio Grandeebene brechen aus der tertiären und quartären Deckschichte stellenweise die Gesteine der unteren und der oberen Kreide hervor. Die Steilstufe folgt einer bedeutenden Verwerfung der Balcones-Bruchzone (durch den Austin-Dammbruch zu einer gewissen traurigen Berühmtheit gelangt). «Diese Balcones-Bruchzone bildet einen der hervorstechendsten Züge in der Geologie des Texas, denn sie ist die einzige Bruchzone in dem postpaläozoischen Schichtensystem zwischen dem Golf von Mexico und dem Felsengebirge. Ihr verdankt die Steilstufe am Nordrand der Rio Grande Ebene ihre Entstehung.» «Die Bruchzone besteht aus einer großen Anzahl innerhalb eines schmalen Streifens mehr oder weniger parallel verlaufenden Brüchen. Einige von ihnen mit bedeutender Sprunghöhe und viele andere von untergeordneter Bedeutung. Der regelmäßige Schichtenverband in der Bruchzone ist aufgehoben und das Gestein ist in zahllose, unregelmäßig begrenzte Blöcke zerspalten. (So also, wie die Beschaffenheit des Gesteinskörpers in der Ponorzone von Gačkapolje geschildert wurde.) Die Detailkartierung all dieser Verwerfungen ist ausgeschlossen. Die Gesamtverschiebung beträgt einige hundert Fuß.»

Der Edwardskalk ist porös und von zahlreichen Höhlen durchsetzt, eine wasserführende Schichte; die ihn überlagernden Kalke der oberen Kreide hingegen kompakt und wasserfrei, so daß in der Rio Grande Ebene artesische Brunnen erbohrt werden konnten. Dasselbe artesische Wasser kommt nun in der Bruchzone in zahlreichen echten Vaclusequellen zum Vorschein. Die Autoren beschreiben elf Quellen

auf einer Strecke von etwa 30 Kilometern. «Diese Quellen brechen nicht aus den Hängen, sondern sie bilden ausgesprochene Tümpel einige davon liegen in der offenen Ebene. Diese Tümpel oder kleinen Seen haben krystallklares Wasser und fließen in Gerinnen ab. In den Tümpeln wuchern Wasserpflanzen, zwischen welchen sich zahlreiche Fische tummeln. Ihr Wasser ist so klar, daß man in 5—7 m Tiefe jedes Detail ausnehmen kann.» «Es ist auffallend, daß diese großen Quellen (die Wasserführung der Comalquelle wurde z. B. mit etwa $9 \text{ m}^3/\text{sec.}$ gemessen, also etwa so ergiebig wie die Hauptquellen in Gačkapolje im Spätherbst) fast genau auf den Bruchlinien liegen. Eingehende Untersuchung des Gesteines hat ergeben, daß die Quellen mit dem Sprungsystem im Zusammenhang stehen und ihr Wasser in solchen Sprüngen emporsteigt. Sie sind natürliche artesische Brunnen.»

Auch hier müßte man sich wieder fragen: Warum kommt das Wasser nur an einzelnen Punkten zum Vorschein, während ihre Umgebung trocken bleibt; wo doch die ganze Bruchzone in höchstem Grade zerklüftet und wasserdurchlässig ist? Es muß mit der Ausweitung der Wasserwege einerseits eine Versinterung der Klüfte andererseits verbunden gewesen sein, sonst wäre die Erscheinung nicht zu erklären.

8. Auseinandersetzung mit den Karsttheorien.

In den ersten fünf Abschnitten habe ich ein morphologisches und hydrologisches Bild des Gačkapoljes entworfen. In den darauffolgenden zwei Abschnitten wurde den Kräften nachgegangen, welchen unser spezielles Landschaftsbild mit dem Poljenkomplex und dem Karstfluß, mit Vaclusequellen und Ponoren seine Entstehung verdankt. Die Konstatierungen, zu welchen ich durch die Tatsachen gezwungen worden bin und die Resultate der Diskussion des vorliegenden, konkreten Falles setzen mich in vielen Punkten mit den herrschenden und von ausgezeichneten Autoren vertretenen Anschauungen über Karst und Karsthydrographie in mehr oder weniger scharfen, zum Teil prinzipiellen Widerspruch. Um die Ursachen dieser Widersprüche aufzudecken, will ich die grundlegenden Annahmen dieser Autoren einer kritischen Prüfung unterziehen.

Daß abflußlose Hohlformen im allgemeinen, Dolinen im speziellen der einfachen Oberflächendenudation ihre Entstehung verdanken und daß nur in seltenen Fällen andere Ursachen bei ihrer Bildung die führende Rolle gespielt haben, kann heute bereits als erwiesen gelten. Die Dolinenstatistik im Standardwerk der Karstmorphologie, dem «Karst-

phänomen» von Dr. Cvijič, hat im Kampf der Meinungen die Entscheidung herbeigeführt. Die alten Einsturztheorien haben sich nur in einer kleinen Serie von ganz besonders geformten und situirten Dolinen bewährt. Wenn trotzdem der verdienstvolle bosnische Landesgeologe Herr Dr. KATZER in seiner Broschüre «Karst- und Karsthydrographie» die Denudationstheorie für die Entstehung der Dolinen auf die erosive und strudelnde Wirkung von, eiszeitlichen Strömen zurückführt, so gibt dies über den gegenwärtigen Stand der Denudationstheorien zu denken. Die Erklärung, welche die Denudationstheorie für die Entstehung der Dolinen liefert, ist eben physikalisch nicht zwingend genug, um jedem Zweifel an ihrer Richtigkeit den Boden zu entziehen und Raum für gegenteilige Meinungen ist noch vorhanden. Die Schwächen der Denudationstheorie werde ich auf Seite 338 behandeln und will jetzt direkt auf den Kern der Dolinenfrage losgehen. Zwischen der Bildung einer Doline und der Bildung eines Erosionstales mit geböschten Hängen im Kalkgebirge ist im Prinzip gar kein Unterschied. Nur tritt an die Stelle der sich tiefer liegenden Sohlenlinie des Tales der Sohlenpunkt der Doline. Wenn wir daher die zwei Fragen beantworten können: warum wird die Sohle tiefer gelegt als die Umgebung und wieso bilden sich regelmäßige Gehänge aus, so haben wir auch die Frage nach der Entstehung der Dolinen beantwortet. Wenn wir nun nach der Entstehung der regelmässigen Gehänge im Kalkgebirge fragen, so versagen unsere landläufigen Auffassungen über die Gehängebildung vollständig, gleichbedeutend ob es sich um die Ausbildung von Talgehängen oder von Dolinengehängen handelt. Beim Tal mit geböschten Gehängen im Kalkgebirge lag die Annahme, es handle sich in den Gehängen um reine Erosionsgebilde, so nahe, daß die Kritik diese Erscheinung übergangen hat.¹ Bei der Doline liegen die Verhältnisse weniger übersichtlich, daher die weitgehenden Meinungsdivergenzen. Prüfen wir also die Richtigkeit der Auffassung der Entstehung von Talgehängen. Für den unbefangenen Beobachter gibt es im Karst wahrlich nichts Räthselhafteres als sanft geböschte Hänge. Aus diesen Hängen ragen wie auf den Karrenfeldern der Hochalpen große, unregelmäßig begrenzte Felsformen und doch ordnet sich das zerklüftete Felsenfeld derart einer immateriellen schrägen Fläche unter, daß man aus weiter Entfernung den Eindruck gewinnt, man sehe auf eine schräge etwas raue Ebene. Verwitterungsgrus ist in manchem reinen Kalkgebiet überhaupt nicht zu finden, so daß von einem natürlichen Bö-

¹ Trotz der so vielfach betonten Abwesenheit der Oberflächenerosion im Kalkgebirge.

schungswinkel gar nicht die Rede sein kann, in einem Kalkfels, in welchem man die Seitenwände von Eisenbahneinschnitten senkrecht stehen lassen kann und in welchem man vielfach ohne Gefahr Galerien sprengen kann. Dabei schwanken die Böschungswinkel dieser Gehänge, sofern wir jetzt die vollkommen ausgebildeten, oft viele Kilometer lang sich erstreckenden hohen Gehänge der Karst-Kettengebirge in Betracht ziehen, in den allereingsten Grenzen. Ich will einige Beispiele anführen:

Senjsko Bilo	— — — —	33° 40'	Germada (Krain)	— — — —	32° 50'
Velebit bei Kossinj	—	33° 40'	Nanos bei Ubelsko	—	32° 50'
Plješivica gegen Bihac		30° 20'	Nanos bei Planina	— — —	30° 20'

Die Böschungswinkel in den Dolinen der bewaldeten Uvala habe ich durchwegs mit 33° gemessen (während Dolinen in Poljen stets viel flacher sind). Die Entstehung dieser Gehänge in Kalkgebirge wurde niemals separat behandelt, trotzdem sie sich prinzipiell von der Entstehung der Gehänge etwa im Schiefergebirge unterscheiden muß. LÖWL («Über Talbildung») erklärt die Entstehung eines geböschten Taleinschnittes wie folgt: «Je tiefer die Sohle eingeschnitten wird, desto schroffer steigen die Gehänge empor. Da aber ihre Neigung die Resultate aus den Einwirkungen der Atmosphäre und der Widerstandsfähigkeit des Gesteins darstellt, müssen die aufgelockerten und zersetzten Felsmassen solange absitzen, bis der Böschungswinkel auf das richtige Maß herabgedrückt ist. Schuttabrutschungen, Felschlipfe und Bergstürze sind von der Ausnagung eines Gebirgstales ebenso unzertrennlich wie Schluchten und Klammern.»

Wohin die Anwendung der Löwlschen, im Schiefergebirge etwa zweifellos richtigen Auffassung, auf das Kalkgebirge führt, zeigt auf das klarste ein Passus aus dem Artikel des Höhlenforschers Regierungsrates KRAUS, «Entwässerungsarbeiten in den Kesseltälern von Krain.» Er erklärt dort die Entstehung einer Doline durch Einsturz. «Die Höhlendecke bricht ein, es entsteht ein Schlund, die Steilwände böschen sich successive, aus dem Schlund wird ein Trichter.» Die Annahme, daß sich die Steilwände böschen, ist wissenschaftlich unmotiviert, ebenso wie die Annahme von Höhlen, welche gerade dort auftreten sollen, wo man sie braucht, ohne Rücksicht darauf, ob eine solche Annahme im Gebirgsbau begründet ist oder nicht. Wenn eine Höhlendecke einstürzt, so bleiben die senkrechten Wände stehen, sobald der Schutt abgerutscht und abgeschwemmt ist und haben gar keine Tendenz sich zu böschen. Und gar eine so flache Böschung anzunehmen, wie wir sie an Dolinen regelmäßig beobachten. Die schwersten Bedenken gegen eine solche

Annahme resultieren übrigens aus folgender Überlegung: Wenn wir den Hang einer Doline im reinen Kalkgebirge (nicht im dolomitischen, denn dort geht Grusbildung in der Regel vor sich) steil aufrichten, bleibt alles im Gleichgewicht. Die Rauigkeiten sind so groß, daß gar keine Materialbewegung vor sich gehen kann. Das beweisen sämtliche Sprengarbeiten im Kalkgebirge. Infolgedessen ist diese Dolinenböschung keine Grenzform, welcher eine Steilstufe notwendig zustreben muß und das wäre die Böschung im Löwlschen Sinn. Sie muß ihre Entstehung ganz anderen Faktoren verdanken. Die Löwlsche Gehängetheorie versagt also im Kalkgebirge. Nun wollen wir noch sehen, ob vielleicht die Denudationstheorie der Dolinen eine befriedigende Antwort gibt. Ihr Hauptvertreter ist Prof. Dr. Cvijić. Er sagt auf Seite 272 des «Karstphänomens», nachdem er die Frage nach der Entstehung der Kalkklüfte kurz gestreift hat. «Diese in die Tiefe führenden Röhren schlucken das auf die Oberfläche des Kalkes fallende und auf derselben fließende Wasser auf und werden somit Endpunkte von dessen oberflächlicher, abspülender und erodierender Tätigkeit, so daß alle Vorgänge hier aufhören. Während in anderen impermeablen Gebieten durch Abspülung und Erosion eine Abdachung bis zum Meere hin geschaffen wird, endet hier die Abdachung an der entstandenen Schlundfuge. Der Eingang der letzteren wird durch die verschiedenartige Tätigkeit des oberflächlichen Wassers erweitert und trichterförmig ausgestaltet. Das ist die normale Doline.» Ferner auf derselben Seite: «Unsere Beobachtungen an den angeschnittenen Dolinen von Unterloitsch zeigen, daß die Bildung von Dolinen längs Spalten vor sich geht» und auf Seite 274: «Die Entfaltung des Dolinenphänomens hängt somit einerseits von den petrographischen und tektonischen Eigenschaften der Karstgebiete und deren Oberflächengestaltung, andererseits von der Menge und Verteilung der Niederschläge ab.» Wenn man diese Erklärungen, welche die eigentliche kausale Begründung der Denudationstheorie darstellen, aufmerksam liest, so wird man bemerken, daß sie ebensowenig, wie die Löwlsche Gehängetheorie die Entstehung regelmäßiger, ausgedehnter Hänge im Karst und die Entstehung von Dolinen rechtfertigen kann. Zunächst schon die oberflächliche, abspülende und erodierende Tätigkeit des Wassers, welches nach den besonders absorptionsfähigen Spalten hingravitiert soll. Ein stark disloziertes Kalkgebirge ist nach allen Richtungen hin von feinen Spalten durchzogen. Wenn diese zahllosen Spalten nicht vorhanden sind, wie im Frankenjura und in manchen anderen Kalkgebirgen, so geht überhaupt keine Dolinenbildung vor sich. Wo sie aber vorhanden sind, dort hat das Wasser, wie ich schon im 7. Kapitel erwähnt habe, die

Tendenz, die Spalten derart auszuweiten, daß es an jeder Stelle, also auf dem kürzesten Weg verschluckt werden kann. Und diesen Endzweck erreicht es im kahlen Kalkgebirge tatsächlich. Ich habe auf kahlen Karstlehnen, selbst bei starken Regengüssen, kein niederrinnendes Wasser beobachten können. Dasselbe sagt Oberingenieur PLATE in seinem Aufsatz über die «Wasserversorgung der Istrianer und Dalmatiner Staatsbahn» und fährt fort: «Roh planierte vom Geröll befreite Flächen (Böschungen sind gemeint) bringen ohne künstliche Dichtung bloß 5—10% des aufschlagenden Regenwassers oberirdisch zum Abfluß.» Dabei sind alle die Rauigkeiten entfernt, welche sonst auf einem Karsthang die Versickerung so außerordentlich begünstigen. Ein anschauliches Bild von der Klüftigkeit des Karstkalkes liefert die Modellierung des Karstplateaus in den Kalkalpen. Wenn ferner das Gravitieren des Wassers nach besonders absorptionsfähigen Spalten das wirksame Agens zur Entstehung von Hohlformen liefern soll, so müßten solche Hohlformen und Erosionswirkungen ganz besonders an Hängen zur Geltung kommen, nachdem an einem Hang wesentlich mehr Wasser an einer Spalte gravitieren kann als im ebenen Karstterrain. Es ist eine altbekannte Tatsache, daß Hänge dolinenfrei sind, wenn man von seltenen Ausnahmen absieht. Stellen wir uns ferner die Detailbeschaffenheit einer Karstebene vor. Eine Unmenge von Kalkköpfen, sack- und polsterförmigen Gebilden und zwischen ihnen feine Rinnen und Spalten. Wir müssen nun unterscheiden zwischen der Denudationstätigkeit auf den Köpfen und zwischen der Denudationstätigkeit in den Rinnen. Bei gleicher petrographischer Beschaffenheit eines Gebietes ist es nach den Prinzipien der Wahrscheinlichkeitsrechnung gar nicht einzusehen, warum die Abtragung der Kalkköpfe vorzugsweise und gesetzmäßig nach einem bestimmten Punkt hin zunehmen soll, nachdem doch alle Kalkköpfe genau gleich lang dem denudierenden Regen exponiert sind. Überdenken wir ferner die Wirkung einer besonders absorptionsfähigen Spalte. Nehmen wir an und es wird in manchen Fällen auch zutreffen, es gravitiere das Wasser der nächsten Umgebung tatsächlich nach dieser Spalte hin. Die feinen Rinnen zwischen den massiven Kalkgebilden werden im Lauf der Zeit ein Gefälle nach dieser Spalte hin bekommen, so wie bei der Verwandlung einer Seenreihe in einen Fluß nach Durchsägung der trennenden Sättel. Nur erfolgt hier das Aufschließen nicht auf mechanischem sondern auf chemischem Weg. Die Rinnen werden tiefer gelegt. Die Felsköpfe kommen aber nicht nach, es ist kein Grund dazu vorhanden. Sie werden sämtlich durch die atmosphärischen Niederschläge in gleicher Weise abgetragen. Das Bild, welches wir nun erhalten

müssen, sind auffallend hohe, pfeilerartige Kalkpartien, durch schmale, lehmfreie Spalten von einander getrennt, rings um den ausgeweiteten Hauptspalt. Der Schachtponor in Poljice und die Schachtponore an der nördlichen Gačka, ferner eine Anzahl von Ponoren, welche ich im Likapolje, sowie im Becken von Laas beobachtet habe, entsprechen diesem Bild bis ins kleinste Detail. Ja noch mehr. Die Felspfeiler, welche den Schacht umgeben, ragen in vielen der von mir beobachteten Fälle über das Nachbargelände empor. Der Grund zu dieser Erscheinung wird sich später von selbst ergeben.

Wenn man diese meine Einwendungen bedenkt, wird man begreifen, daß sich gerade ein Forscher, wie Dr. KATZER, der 17 Jahre lang im Karst gearbeitet hat, gegen die Denudationstheorie der Dolinen gewendet hat, weil sie ihm die Phänomene, die er wohl sehr genau kennt, nicht genügend erklärt.

Ich werde nun im Folgenden zeigen, wie die Doline trotzdem durch rein chemische Denudation nicht nur erklärt werden kann, sondern sogar erklärt werden muß. Zu diesem Zweck will ich das Übel an der Wurzel fassen und zunächst die Möglichkeit einer Böschungsbildung diskutieren. Denn diese Böschung ist morphologisch genommen das Grundelement der Doline. Wenn eine intensive oberflächliche Denudation stattfinden soll, so muß etwas vorhanden sein, das den sofortigen Eintritt des Wassers in den klüftigen Kalkfels verhindert, und das Wasser schon auf der Oberfläche gesetzmässig nach gewissen Stellen hin verteilt. Eine solche Schicht muß in gewissem Grad hygroskopisch sein. Wenn sie Säuren enthält, wird sie zudem die Aktion des Wassers verstärken. Solche Schichten sind gegeben in Humusboden, in wesentlich schwächerem Maß in der Lehm- und endlich in der Schneedecke. Die Böschungswinkel von 20—33° an den Hängen unserer Karstgebirge zwingen den Blick geradezu auf den Humusboden. Nach den MÖLLERSchen Erddrucktabellen beträgt der natürliche Böschungswinkel für «ziemlich nassen Boden» 33°, für «ganz nassen Boden» 30°, für «Kleingeschlag» hingegen, welches etwa dem Gesteinsgrus entspricht: 45°. Der Denudationseffekt wird, wie ich später ausführlich dartun werde, unter einer Humusdecke ein ungeheuer anderer sein, als unter einer Lehmdecke. Wir müssen uns also zunächst fragen, wo wir eine Waldhumusdecke zu erwarten haben. Wenn es sich, wie hier, um die geomorphologische Wirkung einer Pflanzenbedeckung handelt, so dürfen wir nicht die heutige, von menschlicher Rodungstätigkeit im größten Maßstab modifizierte Verteilung der Pflanzenvereine betrachten, sondern wir müssen uns direkt an die Pflanzengeographie und an die Pflanzenökologie wenden, um von diesen Wissen-

schaften zu erfahren, wo wir einen Humusboden und wo einen Steppenboden zu erwarten haben. Das Vegetationsbild, welches uns etwa im Bergland von Laas-Zirknitz, in der Velika Gora, in gewissen Teilen des Velebitgebirges entgegentritt, ein prachtvoller, hochstämmiger Buchenwald, liefert den Beweis, daß die Wasser- und Temperaturverhältnisse das Gedeihen von Waldbeständen im Kalkgebirge erlauben. Der Wald ist der botanische Schlußverein und die Natur hat das Bestreben, überall dort einen Wald zu erzeugen, wo die Existenzbedingungen für ihn vorhanden sind. (RAOUL FRANCÉ.) Nach hervorbringung dieses Schlußvereines strebt die Natur überall. Der Wald ist in der Botanik dasselbe, wie das Rumpfgebirge in der Morphologie der Erdoberfläche. Ein Gleichgewichtszustand. Er kann bloß durch den Menschen, oder durch einen tiefen Eingriff der Natur in seine Existenzbedingungen beseitigt werden. Wir haben also überall dort einen Wald anzunehmen, wo die Existenzbedingungen gegeben sind. Betrachten wir nun den primitiven Wald eines bestimmten, räumlich begrenzten Gebietes; wir konstatieren, daß er aus Baumindividuen besteht, welche sich sowohl in Zahl als auch im Mischungsverhältnis ziemlich gleichförmig über das Terrain verteilen. (Die oft von Reisenden betonte Einförmigkeit tropischer Urwälder). Diese gleichförmige Verteilung der Bäume, der prominentesten Vertreter einer Waldgesellschaft, zieht auch eine gleichförmige Verteilung der Baumbegleiter mit sich, von den Bodenbakterien und Bodenpilzen angefangen bis zu den Waldsträuchern einerseits und der Humusfauna andererseits. Von chemischem Standpunkt aus betrachtet, präsentiert sich diese Gemeinschaft von Lebewesen mit ihrem Nebeneinander von Leben und Verwesung als eine gleichmäßig über das Terrain sich erstreckende Zone ständig sich wiederholender Neubildung hochwertiger, aktiver Substanzen. Die Verwesungsprozesse bestehen (nach WOLLNY, Zersetzung organischer Substanzen) in einer allmählichen Anreicherung des Kohlenstoffes, Bildung stark entwässerter Kohlehydrate, Entstehung von Humusstoffen und Humussäuren. Bei mittleren Feuchtigkeitsmengen und angemessener Temperatur zerfallen diese Humusstoffe unter Mitwirkung von Gärungspilzen und Bodenbakterien in Kohlensäure, Wasser und Ammoniak. Nachdem wir nun beobachten, daß der Waldboden im Karstgebirge in relativ schwacher Schicht auf vollkommen gesundem Fels in normaler Zusammensetzung aufrucht, trotzdem der Fels infolge chemischer Denudation um gewaltige Beträge denudiert worden ist (wie die Abmessungen großer Dolinen zeigen), so müssen wir annehmen, daß zwischen Leben, Verwesung und Auslaugung Gleichgewicht herrschen muß und wenn wir uns über die denudierende Tätigkeit der auf den

Wald fallenden Niederschlagsmengen Klarheit verschaffen wollen, müssen wir uns die chemischen Prozesse, welche sich im Hochwaldbereich vollziehen, in großen Linien vergegenwärtigen. Freilich erstrecken sich die bis dato auf diesem Gebiet angestellten Untersuchungen nur auf den forstmässig zugerichteten Laub- und Nadelwald, in welchem das Unterholz und mit ihm «die tieferen Waldetagen» fehlen. Sie geben aber immerhin eine greifbare Vorstellung und das genügt vorläufig.

Der mittlere Jahresniederschlag beträgt gegenwärtig in Innerkroatien 1200 Millimeter. Nach den Untersuchungen FRANKHAUSERS fiel in einem gutgeschlossenen 50—60-jährigen Buchenbestand um 10% weniger Niederschlag zur Erde als im freien Land. Dafür fällt im Durchschnitt über bewaldeten Terrain um 4% mehr Regen. Auch rieselt an den Stämmen sehr viel Wasser nieder, wir können also sagen, es gelangen 1100 mm tatsächlich in den Boden. Von diesen 1100 mm werden nun etwa 400 mm durch den Transpirationsstrom der Pflanzen in die Atmosphäre zurückgeführt (Vgl. diesbezüglich STRASSBURGER, Lehrbuch der Botanik und HABERLANDT, wissenschaftlich praktische Untersuchungen, BÜSGEN. Bau und Leben der Waldbäume). Das sind 400 kg Wasser pro m² Wald. Nun erzeugt die Pflanze nach VAGELER «Bodenkunde» pro 300 kg transpiriertes Wasser 1 kg Trockensubstanz, das gibt pro Jahr und Quadratmeter 1·4 kg Trockensubstanz. Nach STRASSBURGER (Lehrbuch der Botanik) besteht die pflanzliche Trockensubstanz zu 0·5 aus Kohlenstoff, das gibt also pro Jahr und Quadratmeter eine Produktion von 0·7 kg Kohlenstoff. Nachdem sich im Wald Leben und Verwesung das Gleichgewicht halten, treten jährlich 0·7 kg Kohlenstoff in den Verwesungsprozeß ein. Nun sind zwei Dinge zu bedenken: Erstens geht der Verwesungsprozeß in unseren Wäldern sehr langsam vor sich (nach WOLLNY, Zersetzung organischer Stoffe). Bis die Umwandlung der Pflanzensubstanz in Humusstoffe und gar die Zerlegung der Humusstoffe in Kohlensäure und Ammoniak stattfindet, ist diese verwesende Substanz längst von neuen, abgestorbenen Pflanzenresten bedeckt. Zweitens ist die entwickelte Kohlensäure schwerer als die Luft, bleibt schon aus diesem Grund im Boden. Ferner sind Humusstoffe hervorragend adsorptionsfähige Substanzen (nach WOLLNY) und halten aus diesem Grund die aus ihnen hervorgehende Kohlensäure unter Druck fest, bis sie von Niederschlagswässern absorbiert wird. VAGELER nennt dies in seiner Bodenkunde einfach Verdichtung der Gase auf der Oberfläche der Bodenkrümel. Es ist dasselbe Phänomen, wie die Verdichtung des Leuchtgases im Platinschwamm und ist auf die Adsorptionsfähigkeit der Körper zurückzuführen.) Nun geben 0·7 kg Kohlenstoff mit Sauer-

stoff verbunden: 2·6 kg Kohlensäure, das sind 1300 l Kohlensäuregas (1 l Kohlensäure wiegt rund 2 gr)¹ Nun kommen pro m² jährlich 1100 weniger 400, das gibt 700 l Wasser zum Abfluß. 1 l Wasser absorbiert bei 0° 1·8 Volumen CO₂ bei 15° rund ein Volumen. Die pro Quadratmeter jährlich produzierte Kohlensäure genügt also vollkommen, um die zum Abfluß gelangenden Niederschlagsmengen mit Kohlensäure zu sättigen. Die Gelegenheit zur Absorption dieser Kohlensäure ist in den krümmeligen, von zahllosen Lebewesen durchgrabenen Waldboden die denkbar günstigste. Nun ist der Kalk mit rund 15 auf 10.000 Teilen kohlenensäuregesättigten Wassers löslich, das gibt pro m² und Jahr etwa einen halben Millimeter bei 700 mm abfließenden Niederschlag. Die Bedingungen zur Entfaltung der Lösungstätigkeit sind sehr günstige. Die krümmelige Beschaffenheit des Bodens, seine große Wasserkapazität und die lebhaft Wasserzirkulation im Boden, hervorgebracht durch die Saugwirkung der Wurzeln, begünstigt die Reaktion zwischen dem Wasser und dem Kalk außerordentlich, indem die Lösungsprodukte in molekularisiertem Zustand rasch aus der Reaktionszone kommen und in fein verteiltem Zustand im Boden aufgespeichert werden, soferne das lösende Wasser von den Pflanzen verbraucht wird. Es zitiert NERNST in seiner theoretischen Chemie: «An der Grenzfläche zwischen Körper und Lösung herrscht in jedem Augenblick der Zustand der Sättigung; die Auflösungsgeschwindigkeit wird hienach bedingt durch die Diffusionsgeschwindigkeit des in der Grenzschicht in gesättigter Lösung befindlichen Stoffes.» Demnach geht die Reaktion um so rascher vor sich, je feiner der zu lösende Körper verteilt oder je geringer die Widerstände, welche sich der Diffusion entgegenstellen. Eine solche Einwanderung und Absetzung von Kalk im Boden geht de facto vor sich. Dafür haben die Versuche STORERS in dem «Bulletin of the Bussey Institution» unzweideutige Beweise erbracht. Man hat also Kohlensäure unter Absorptionsdruck, Wasser in lebhafter Bewegung und teils fein verteilten Kalk, teils festen Kalk unmittelbar nebeneinander. Es ist kein Grund vorhanden zu sagen, die Reaktion gehe nicht vor sich. Zudem muß man annehmen, daß das Wasser nicht in absolut reinem Zustand, sondern mit feinsten Partikelchen getrübt in die Klüfte eintritt. Und diese Trübung fällt ebenfalls ins Gewicht. Wäre dies nicht der Fall, so wäre infolge der

¹ Alle Ziffern sind nur als rohe Annäherungen aufzufassen, sie sollen bloß ein allgemeines Bild liefern. Die Lösungsfähigkeit des kohlenensäurehaltigen, bezw. gesättigten Wassers variiert stark mit der Temperatur. Das meiste Wasser versickert im Winter, ist daher kalt und sehr lösungsfähig.

Filterwirkung eine allmähliche Verschlemmung des Bodens die notwendige Folge.¹ Vergleichen wir nun mit der von uns gefundenen Ziffer von einem halben Millimeter pro Jahr das Ergebnis eines Versuches von PFAFF (in ROTHS allgemeiner und chemischer Geologie) PFAFF exponierte eine Platte von Solenhofener lithographischem Schiefer mit 95·3% $CaCO_3$, 2·0% $Mg(CO_3)$ und 0·11% $FeCO_3$ zwei Jahre lang den atmosphärischen Niederschlägen und konstatierte eine jährliche Abspülung von 1/73 Millimeter. Nun ist das Kalkgestein des Karstes nur selten so kalkreich, d. h. so lösungsfähig wie diese Schieferplatte. Wird daher jährlich weit weniger denudiert werden. Bleiben wir jedoch bei der Ziffer PFAFFS. Die Denudation des Kalkes unter einer zähen Lehmschicht wird ganz offenbar die Abtragung des frei exponierten Kalkgesteines nicht übertreffen, nachdem dieses dichte, oft wasserundurchlässige Material der Wasserzirkulation und der Diffusion die größten Widerstände entgegengesetzt. Wenn man im Waldboden nur die halbe Lösungsfähigkeit des Wassers sich erschöpfen läßt, an die Stelle des halben Millimeter pro Jahr einen viertel Millimeter setzt und neben die Ziffer 1/73 hält, so muß man zugeben, daß unser Ergebnis einen morphologisch wirksamen Faktor ersten Ranges in Ziffern formuliert.² Während die Denudation im kahlen Gebiet in 1000 Jahren 1·4 cm beträgt, wird sie sich im Urwald auf 25 Zentimeter belaufen. Nur solche Denudationsbeträge können uns auch die Entstehung von so gewaltigen abstußlosen Hohlformen seit dem letzten Gebirgsschub erklären, wie wir sie in manchen Teilen des Karstes finden. Man muß sehr wohl bedenken, daß die Tiefe der Doline noch nicht den wahren Denudationsbetrag angibt, sondern nur die Differenz zwischen der Tieferlegung des Bodens und der Abtragung ihrer Umgebung. Wann wird nun die Denudation unter Waldbedeckung durch die minimale Denudation des Karstlandes ersetzt werden? Nur dann, wenn dem Wald durch die Natur die Existenzbedingung genommen ist. Die Existenzmöglichkeit des Waldes hört auf im Inundationsbereich einer Quelle oder eines Flusses. Infolgedessen müssen die Wasserverhältnisse des Karstes in seiner Oberflächengestaltung zum Ausdruck kommen, denn von ihnen hängt es ab, ob das Terrain stark oder schwach abgetragen wird. Man darf nicht vergessen, der Karst ist ein Gebiet ohne

¹ Man muß sich stets vergegenwärtigen, daß es sich hier um Prozesse handelt, welche sich geologische Zeiträume hindurch wiederholen.

² Die im Boden gebildete Salpetersäure, die von den Wurzeln gelieferte Salzsäure und die Stoffwechselprodukte der niederen Tierwelt sind hiebei nicht berücksichtigt, trotzdem sie ebenfalls eine Rolle spielen dürften.

Oberflächenerosion. Wo ferner der Wald durch Inundation einmal vernichtet worden ist, dort siedelt er sich von selbst nicht mehr an; das liegt in der Natur des Karstes. (Ein Gegenbeispiel dazu ist der Kampf zwischen Heide und Eichenwald in Norddeutschland.)

Bisher habe ich bloß den Waldboden in seiner Bedeutung als denudationsfördernde Bodenbedeckung behandelt. Nun will ich aber versuchen, darzulegen, wie die Waldbedeckung mit der Bildung regelmäßiger, schräger Böschungen zusammenhängt. Die Oberfläche des kompakten Kalkfelsens stellt sich parallel zu der natürlichen Böschung des Waldbodens. Die Denudation des waldbedeckten Gesteins ist vielmal größer als die des kahlen. Wenn daher eine Gesteinspartie aus irgend einem Grund aus der Bodenbedeckung hervorkommt, so wird sie mit Notwendigkeit immer größer und größer. (Ausgezeichnete Beispiele liefern die Gehänge des Maastales in Belgien, wie ich später noch dartun werde.) Der Waldboden muß infolgedessen die Fähigkeit besitzen, ein solches Herauswachsen zu verhindern. Eine Aufklärung liefert uns die Betrachtung der Abflußvorgänge im Waldboden. Eine poröse Schicht liegt auf einer stellenweise durchlöcherten Platte. Wenn es auf diese Schicht regnet, wird ein kleiner Teil durch die Plattenöffnungen treten, der größte Teil der Niederschläge wird in der Deckschicht zum Plattenfuß niedersitzen. Wenn nun, um zum Waldboden zurückzukehren, eine Gesteinspartie besonders widerstandsfähig ist und sich über ihre Nachbarschichten erhebt, so rückt sie der Bodenoberfläche näher, nachdem die Bodenoberfläche durch den natürlichen Böschungswinkel des Bodens festgelegt ist. Das Wasser strömt in dem porösen Boden nieder. Je dünner die Bodenschicht, desto lebhafter die Wasserzirkulation. Nach NERNST ist die lösende Wirkung einer Flüssigkeit direkt proportional der Diffusionsgeschwindigkeit und die Diffusionsgeschwindigkeit wird durch Bewegung, etwa durch Umrühren etc. sehr gesteigert. Dennoch wird diese erhöhte Partie wesentlich intensiver angegriffen und stärker gelöst als ihre Nachbarn und sie wird dadurch in die Fläche der Böschung zurückgedrängt. Wir haben hier also den hochinteressanten Fall, daß der kompakte Fels durch die chemisch lösende Tätigkeit des Wassers unter die sozusagen immaterielle natürliche Böschungsfäche eines lockeren Bodens gezwungen wird. Dieses Niederringen von härteren Felspartien und das Aufzwingen der Böschungsfäche vollzieht sich jedoch, wie oben gezeigt, mit der Notwendigkeit eines mechanischen Naturgesetzes. Eine überwältigende Zeugenschaft für die Existenz dieses Naturgesetzes erbringen im innerkroatischen Hochland die viele Kilometer langen, mehrere hundert Meter hohen, mit nahezu konstantem Böschungswinkel manchen Poljenrand

begleitenden Hänge der Kettengebirge, welche Hänge meist dem Schichtstreichen dieser Gebirge parallel laufen: Oberflächenerosion hat in nennenswertem Maß nie stattgefunden. Wenn durch den Gebirgsschub eine Schollenreihe aufgerichtet wurde (wir haben am Westrand des Hochlandes typische Schuppenstruktur), so folgen die Oberflächenagentien mit der Abschrägung der Bruchkante, es entstand eine Böschung ohne Zuhilfenahme der Erosion.

Denken wir uns nun im Waldgebiete des Karstes eine, wenn auch sehr flache Mulde. Das Wasser wird den porösen Boden an der tiefsten Stelle verlassen. Um uns das zu vergegenwärtigen, denken wir uns eine flache, mit Humusboden ausgekleidete, siebartig durchbrochene Schüssel. Wenn wir auf diese Schüssel Regen fallen lassen, so ist es klar, daß die Schüsselporen an der tiefsten Stelle am meisten Wasser liefern werden. Je näher dem oberen Rand, desto weniger. Direkt proportional der Wasserlieferung aus den Poren ist die Sättigung der Bodenschicht und Geschwindigkeit der Wasserbewegung. In unserer Waldmulde findet dasselbe statt. Nachdem aber die Lösungsfähigkeit des Wassers direkt proportional ist der Bodensättigung und der Zirkulationsgeschwindigkeit, so wird der Boden der Mulde viel rascher tiefer gelegt als die Ränder. Zudem werden die Kalkklüfte unter dem Muldenboden viel rascher ausgeweitet, als an den Rändern, weil sie intensiver durchströmt werden. In dem Maß als der Boden tiefer sinkt, folgt das natürliche Erdreich nach und wird mit seinem natürlichen Böschungswinkel die Steilheit der Dolinenhänge in der sub «Böschung» geschilderten Weise festlegen. Eine Doline muß mit Notwendigkeit entstehen. Den Anstoß dazu kann jede noch so unscheinbare Hohlform geben, es genügt, daß das Wasser an jener Stelle durch lange Zeit hindurch, wenn auch nur um ein Differentiale, mehr löst, als in seiner Umgebung. Diese Erklärung der Dolinenentstehung ist tatsächlich zwingend.

Eine ähnliche Rolle wie die Humusdecke spielt offenbar, wenn auch in weit schwächerem Maßstab, die Schneedecke. Es schwankt die spezifische Schneetiefe nach Dr. SCHREIBER zwischen 6·6 und 34 mm. Er nennt als Mittelwert 16 mm. In einer flachen Mulde, welche mit Schnee bedeckt ist, wird die Menge des gelieferten Tropfwassers nach einem ähnlichen Gesetz gegen die Muldenmitte hin zunehmen wie in der mit Boden ausgekleideten. Daher auch das Maß der chemischen Denudation. Man muß auch bedenken, daß der Schnee weit kohlen-säurereicher ist, als das gewöhnliche Regenwasser (nach TH. HEINRICH: die Schneedecke. Prometheus IV). Wenn auch die jährlichen Denudationsdifferenzen verschwindend klein sind, so müssen sie sich doch im Laufe der geologischen Zeiträume mit Notwendigkeit zu sichtbaren

Werten summieren. Eines ist zudem klar: Nachdem die verteilende Wirkung der Schneedecke auf das Wasser keine so intensive ist und die Lösungsfähigkeit der einen Waldboden passierenden zurückbleiben wird, so wird die Niederbringung des Muldenbodens verhältnismäßig langsam erfolgen und es werden keine so steilen Dolinenhänge zustande kommen, wie in Dolinen unter Waldboden. Es sind daher auch die Dolinen, welche wir auf den Plateaus unserer Kalkalpen beobachten, meist sehr flache Gebilde. Desgleichen Dolinen im verkarsteten Terrain (d. h. in Karstebenen, in welchen seinerzeit durch periodische Inundation der Wald vernichtet worden ist.)

Typisch ausgebildete Gehänge mit einem Böschungswinkel von $30-35^\circ$ können nur unter Urwaldbedeckung gebildet werden. So haben wir bewiesen. Wo daher ein solches Gehänge auftritt, dort können wir mit Recht behaupten, daß der Wald erst durch Menschenhand vernichtet worden ist; andererseits muß zugegeben werden, daß ein Fluß, etwa ein Poljenfluß, welcher sein Bett in eine Poljenebene einlaugt (d. h. in eine Ebene, welche der Denudation ihre Entstehung verdankt und vor geologischen Zeiträumen ihre Waldbedeckung eingebüßt hat) niemals ein Erosionstal, mit geböschten Gehängen, sondern bloß eine Klamm mit senkrechten Wänden erzeugen kann. Wir finden für diese Konsequenz unserer Böschungstheorie die schlagendsten Beweise in den Karstebenen. Um nur zwei typische Beispiele anzuführen: Korana und Reka, welche in Schluchten mit Tiefen bis zu 100 m die öden Karstplateaus durchfließen. Die Steilwände ihrer Täler sind durch nichts anderes zu motivieren als durch die Abwesenheit der Gehänge bildenden Faktoren. Cvijić erwähnt diese Schluchten mit senkrechten Wänden als Charakteristikum für die von Flüssen durchzogenen Karstplateaus. Da müßte man sich doch unwillkürlich fragen, wieso treten diese Schluchten so häufig auf, wo doch gerade die minimale Geschwindigkeit der Karstflüsse auf sanft geböschte Talgebilde weisen sollte, wenn die geneigte Böschung tatsächlich nur eine Begleiterscheinung der langsam in die Tiefe arbeitenden Flußerosion repräsentiert.

Ich habe ferner weiter oben die konservierende Eigenschaft der Lehmdecke hervorgehoben. Die zähe Konsistenz dieses Materiales drückt den Lösungseffekt des die Oberfläche passierenden Wassers auf ein Minimum hinunter. Zu dieser Tatsache bringt Dr. Cvijić auf S. 84 seiner «Morphologischen und glazialen Studien» einen sehr interessanten Beleg. Er sagt: «Es ist von Interesse, daß sich über diesen alten Schuttkegeln (an den Poljenrändern) gegenwärtig sehr seichte oder gar keine Rinnen und Täler befinden — um so viel hat das Gelände um das Polje her seit der Neogen- und Glazialperiode bis zur Gegenwart

durch Denudation an Höhe abgenommen.» Das Gelände um das Polje hat an Höhe abgenommen, das lehmbedeckte Polje und sogar der Schutt ist geblieben. Dieses merkwürdige Nebeneinander kann doch nicht ohne Ursache sein, in einem Land, wo die Oberflächenerosion eine verschwindend kleine Rolle spielt.

Nachdem wir nun die Bildung der Detailreliefformen des Karstes, der Gehänge und der Dolinen, behandelt haben, können wir an die Untersuchung der Ursachen der Poljenbildung schreiten.

Die Frage nach der Entstehung von Poljen im allgemeinen und des Gačkopoljes im speziellen habe ich im 6. Abschnitt ausführlich behandelt. Die Ergebnisse, zu welchen ich gelangt bin, widersprechen sämtlichen mir bekannten Poljentheorien. Ich muß mich infolgedessen mit ihren Hauptvertretern GRUND und CVIJIČ, auseinandersetzen. GRUND hat die Erfahrungen, auf welchen er seine Theorie basiert, in Westbosnien gesammelt. Auf die Entstehung der westbosnischen Poljen kann ich nicht eingehen. Ich kenne diese Poljen aus eigener Anschauung nicht. Wohl aber habe ich, wie schon im ersten Abschnitt erwähnt, Bedenken allgemeiner Natur gegen die Auffassung der Poljes als abgesunkenen Rest einer alten Einebnungsfläche. Sie gipfeln in zwei Fragen. Die erste lautet: Warum wurden die alten Einebnungsflächen auch dort konserviert, wo sie nicht durch limnische Sedimente geschützt waren? Wenn man das durch reine Denudation geschaffene formenreiche Relief von Innerkroatien gesehen hat, so wird man die Unfähigkeit der Absenkungstheorie, diese Frage einwandfrei zu beantworten, als große, wenn nicht unheilbare Schwäche empfinden. Die zweite lautet: Ist die Einebnung weiter, bergiger Kalkterrains durch die Tätigkeit von Flußläufen überhaupt möglich oder nicht? Diese zweite Frage werde ich am Schluß dieses Kapitels eingehend diskutieren, wenn ich mir einmal über das Wesen der Erosion im allgemeinen klar geworden bin. Den Gegenpol zur GRUNDSchen Absenkungstheorie bildet die Ausräumungstheorie von CVIJIČ. Sie ist nicht so präzise gefaßt, kann daher auch schwerer widerlegt werden. Im Jahre 1898 teilte CVIJIČ in seinem Karstphänomen die Poljen in 1. Echte Muldenpoljen, 2. Abriegelungspoljen und 3. Aufbruchspoljen. Über die Entstehung dieser Poljenarten spricht er sich noch unklar aus und schließt mit den Worten «Wie nun in einzelnen Fällen die Entstehung der Poljen zu denken ist, muß durch eingehende Untersuchungen derselben festgestellt werden.» Deutlicher wird es hingegen in seinem «Morphologischen und glacialen Studien aus Bosnien etc.» II. Teil, Karstpoljen. Er schildert dort die Entstehung eines Poljes etwa wie folgt: «Mehrere Karstmulden («Uvalas») wachsen zusammen,

die Querriegel werden denudiert. Die Denudation wirkt weiter, weswegen eine solche Anzahl starker Quellen bloßgelegt werden kann, daß an der Sohle Flüsse entstehen, die im Karst von Ponoren aufgeschluckt werden müssen. Anfangs muß in solchen Poljen der Zufluß des Wassers größer als der Abfluß sein, da die Ponore noch nicht genügend erweitert sind. Außerdem werden sie oft verstopft. Infolge dieser beiden Ursachen tritt der Fluß aus seinem Bette aus, schwankt an der Sohle des Poljes auch weiter fort hin und her, indem er diese eben macht. Auf diese Weise entstehen an der Sohle eines Poljes Verebnungsflächen, u. zw. durch Flußerosion und durch Verebnungsarbeit der großen Wassermassen der zeitweiligen Inundationen.» Und wenige Zeilen später: «Aus den letzteren Ausführungen ist es klar, daß die Flüsse in den Poljen eine sekundäre Erscheinung sind; sie gelangen zur Entwicklung, nachdem an den Karstmuldensohlen Ebenen entstehen und die Uvalas in Poljen verwandelt werden.» Wenn man die Poljenerklärung des Herrn Prof. Dr. Cvijić aufmerksam durchliest, so bemerkt man zunächst, daß der Poljenfluß dasjenige schon vorfinden muß, was er später erst schaffen soll — die Einebnung. Wir wollen uns jedoch über diesen Widerspruch hinwegsetzen und die Einebnungstätigkeit des Poljenflusses analysieren. Einebnung ist Erosion und zwar Erosion in horizontalem Sinn. Fassen wir den Begriff Erosion scharf ins Auge und zwar Erosion in festem homogenen Gestein. Wir leiten einen Fluß in ein bestehendes Gerinne mit rauhen Wandungen, mit Zacken und Vorsprüngen. Der Fluß besitze Gefälle. Sein Wasser steht daher unter der Wirkung zweier Kräfte; der beschleunigenden Schwerkraft und der verzögernden Reibung. Das Ergebnis dieser Kraftwirkungen ist ein Beharrungszustand: die konstante mittlere Geschwindigkeit, soferne wir konstanten Profilsradius und konstante Wandbeschaffenheit im Gerinne voraussetzen. Mit anderen Worten: die beschleunigende Kraft der Schwere hat sich in Reibungsarbeit umgesetzt. Die Natur dieser Reibungsarbeit erkennen wir am klarsten in dem Pulsieren der Strömungsgeschwindigkeit. Ein Massenelement des Wassers besitzt eine bestimmte Geschwindigkeit und stößt gegen einen Vorsprung der Sohle. Die Reibungsarbeit setzt sich nun zusammen aus der inneren Flüssigkeitsreibung, entsprechend der Wasserfadendeformation und der Deformationsarbeit in der Vorsprungsmasse. Die Deformationsarbeit in der Vorsprungsmasse ist es nun, welche uns interessiert. Die wirkende Kraft ist die an der Oberfläche vernichtete Geschwindigkeitskomponente der bewegten Masse. Die hervorgerufene Deformation muß solange eine rein elastische bleiben, solange die Kraft kleiner ist als die Gesteinsfestig-

keit. Nachdem auf der Flußsohle auf eine unendlich kleine Gesteinsfläche auch nur eine unendlich kleine bewegte Wassermasse kommt, so erkennen wir, daß eine Überschreitung der Gesteinsfestigkeit unmöglich stattfinden kann. Obendrein geht die Bewegung des Wassers derart vor sich, daß ein Minimum an innerer Reibungsarbeit geleistet wird, genau so, wie sich die Spannungen in einem elastischen Körper derart verteilen, daß die Summe der inneren Deformationsarbeit ein Minimum wird. Die Wassermasse gleitet daher nicht, sondern sie wälzt sich über die rauhe Sohle hinweg. Die Wasserfäden tangieren die höchsten Unebenheiten, zwischen den Unebenheiten bleiben tote Räume und diese toten Räume werden mit Sinkstoffen ausgefüllt. An eine Eintiefungs- oder Erosionsarbeit ist somit in geschiefreiem Fluß nicht zu denken, selbst wenn er mit großer Geschwindigkeit sein Bett durchheilen würde. Ganz anders liegen die Verhältnisse im geschiefbeführenden Fluß. Denken wir uns einen einzelnen über der Sohle treibenden Stein. Er besitzt eine endliche Masse m und eine Geschwindigkeit v . Seine lebendige Kraft beträgt $\frac{m v^2}{2}$ und ist endlich. Dieser Stein stößt nun gegen den Vorsprung. Die Berührungsfläche ist, wenn wir von seiner elastischen Deformation absehen, unendlich klein. Auf dieser unendlich kleinen Fläche geht die Vernichtung der endlichen lebendigen Kraft vor sich, das heißt ihre Umwandlung in Deformationsarbeit. Auf ihr ist die Möglichkeit gegeben, daß die Gesteinsfestigkeit von der momentan wirkenden, nach innen sich fort-pflanzenden Druckkraft überschritten wird, einige Vorsprungsteilchen werden abgelöst. Es ist nun klar, daß eine häufige Wiederholung dieses Vorganges die Abtragung des Vorsprungs nach sich ziehen muß. Sobald jedoch sämtliche Vorsprünge beseitigt sind, hört die reine Erosion auf. Es gibt keine Kollisionen mehr zwischen Stein und Fläche. Wir sehen daher auch in echten Erosionsschluchten fast ausschließlich glatte, vorsprungslose Formen. Die Beziehungen zwischen Geschiebe und Sohle ändern sich, an die Stelle der Erosion tritt die Korrosion. Wenn wir die Korrosion auf ihr Wesen untersuchen, so finden wir, daß sie sich zur Erosion verhält wie die Biegezugfestigkeit zur Druckfestigkeit. Die Erosion arbeitet an der Beseitigung der makroskopischen, die Korrosion an der Beseitigung mikroskopischer Reliefformen. Fast jedes Gestein ist mehr oder weniger körnig. Wenn man eine Kornschicht beseitigt, kommt die nächste zum Vorschein. Den Wirkungen der Erosion ist mit der Beseitigung der Unebenheiten ein Ziel gesetzt, die Korrosion hingegen wirkt ins Unendliche fort. Der wichtigste Unterschied zwischen Erosion und Korrosion ist jedoch folgender. Bei der

Erosion wirkt eine endliche Druckkraft auf unendlich kleine Fläche, die Zerstörung erfolgt durch Überwindung der Druckfestigkeit. Die Korrosion hingegen wirkt tangential und zerstört durch Überwindung der Zugfestigkeit. Nachdem nun die Gesteinskörner von einander durch feine Fugen getrennt sind, so ist es klar, daß die Kraftwirkung eine verhältnismäßig kleine zu sein braucht, um eine zerstörende Wirkung hervorzurufen. Trotzdem involviert sie große und größte Wassergeschwindigkeiten, um zur Geltung zu gelangen.

Wenn man nun die von mir scharf und ohne Zuhilfenahme einer Hypothese aus den Gesetzen der Mechanik entwickelten Begriffe der Erosion und Korrosion im Auge behält, wird man bald die Unmöglichkeit des von Herrn Dr. Cvijić unternommenen Erklärungsversuches erkennen. Der Fluß kommt aus einer Grundwasserquelle, daher geschiefbefrei. Die Quelle selbst breche an einem Ende des Uvalakomplexes hervor. Das Quellwasser wird nun eine Mulde nach der anderen füllen und am entgegengesetzten Ende der Senke in einigen Ponoren verschwinden, wenn solche vorhanden. Die Mulden sind, sofern sie das Wasser nicht verlieren, durch Kaskaden miteinander verbunden. Diese Verbindungsstücke werden sich auf chemischem Wege eintiefen. Nun soll aber der Fluß, um diese Kämmen abzutragen, «weiter fort hin und her schwanken.» Dazu fehlt ihm jedoch die Ursache. Wenn er die Kämmen durchsägt hat, wird er wohl eine Weile in der lehmigen Sohlenauffüllung mäandern können, sobald er jedoch den Fels erreicht, hat seine Bewegungsfreiheit ein Ende. Ohne Schuttmaterial kann er nicht mäandern. Es ist also gar keine Möglichkeit vorhanden, daß sich ein Polje bildet, gar ein Polje von vielen Quadratkilometern ohne Gefälle.

Nachdem nun das Wesen der Erosion festgelegt erscheint, kann auch die Frage beantwortet werden, welche ich bei der Erörterung der Grundschen Poljentheorie offen gelassen habe. Ist die Einebnung eines Kalkgebirges durch Flußtätigkeit möglich?

Um die Einebnungsleistungen der Karstflüsse richtig einzuschätzen, will ich eine kleine Betrachtung anstellen. Denken wir uns ein breites Flußtal im bewaldeten Kalkgebirge; die Sohle sei mit Schotter aufgefüllt und der Fluß mäandere in der Auffüllung. Nun nähere sich sein Lauf an irgend einer Stelle dem Talhange und greife ihn an. Kann er durch diesen Angriff die Talsohle dauernd verbreitern oder nicht? lautet meine Frage. Wir haben bei der Diskussion der Entstehung geneigter Gehänge gefunden, daß der jährliche Denudationsbetrag unter sonst gleichen Umständen für jeden Böschungswinkel eine konstante Größe ist. Er ist eine Funktion der jährlich produzierten Kohlensäure und der Durchströmungsgeschwindigkeit des Bodens und repräsentiert

ein Maximum; wir haben ferner gesehen, daß die maximale Gehänge-
neigung durch den natürlichen Böschungswinkel des Gehängematerials
eindeutig bestimmt ist. Es kann daher der Fluß durch seinen Angriff
den Fortschritt der Gehängedenudation unmöglich beschleunigen. Die
Gehängeböschung kann er auch nicht vergrößern. Er kann bloß den
Gehängefuß unterspülen, er kann seine Kurve in das Gehänge ein-
schneiden, die geneigte Böschung wird durch eine steile Felswand
ersetzt, die Humusdecke der oberen Gehängepartien rutscht nach und
anstatt die Abtragung der Gehänge beschleunigt zu haben, hat der
Fluß dem Gehänge die denudationsfördernde Deckschicht ge-
raubt. Rings um den angegriffenen Teil arbeitet die Gehängedenuda-
tion mit konstanter Geschwindigkeit in die Tiefe und der bloßgelegte
Streifen wächst als steile Felspartie aus dem Gehänge hervor, ein
weithin sichtbarer Protest gegen die Störung der Denudationsarbeit.
Wie oft konnte ich diese ebenso schöne wie rätselhafte Erscheinung
in den Flußtälern der Ostalpen beobachten.¹ Sie scheint übrigens nicht
auf das Kalkgebirge beschränkt zu sein. Ich führe die Entstehung der
wildromantischen, zerklüfteten Granitpartien, welche im Donautal
zwischen Melk und Krems aus den glatten, sanften, buchgrünen
Hängen brechen, auf dieselbe Ursache zurück. Der Schlag jedoch,
welchen ich durch meine einfache Betrachtung gegen die Theorie von
der Einebnung weiter Kalkgelände durch Erosionswirkung geführt habe,
ist so schwer, daß sie ihn wohl kaum verwinden wird. Flüsse können
die Einebnung von Kalkgebirgen unter der Waldgrenze höchstens
etwas beschleunigen, sofern sie dicht nebeneinander auftreten, aber
nie bewirken! Bewirkt wird die Einebnung bloß durch die Denudation.
Und gegeben ist, wie ich im 6. Abschnitt ausführlich dargelegt habe,
das Einebnungsniveau nicht durch den Meeresspiegel sondern durch
den lokalen Inundationswasserspiegel. Daher das staffelförmige Auf-
treten von Poljen, ihre Gefällslosigkeit und bedeutenden Höhenunter-
schiede bei geringer Distanz. Die Inundation hat dem Wald die Existenz-
möglichkeit genommen; das Quellgebiet wurde von Sumpfpflanzen be-
siedelt und der Poljenboden wurde mit Lehm überdeckt. Als nun
später die Wanne durch ein Quertal aufgeschlossen wurde und als der
Karstwasserspiegel durch das Auftreten neuer tektonischer Störungen

¹ Es ist interessant festzustellen, daß die auf Beseitigung der Vegetations-
decke durch Unterspülung und intensive Erosion zurückgeführte Entstehung der
merkwürdigen Rückfallkuppen am Semmering, im Yosemite-Tal in Californien ein
vollkommen analoges, wenn auch weit großartigeres Gegenstück besitzt. Diese
Rückfallkuppen begleiten das tief in die Hochfläche eingeschnittene Flußtal zu
beiden Seiten wie die Überreste halberstörter Randwälle.

gesenkt wurde, blieb eine öde, teils lehmbedeckte, teils kahle Fläche zurück, der Poljenboden ist teils verkarstet, teils in eine Steppe verwandelt. Der Poljenfluß durchzieht das kahle Gelände und tieft sich infolge des Lösungsvermögens seines Wassers in die felsige Fläche ein. Humus ist keiner vorhanden, es fehlen die Bedingungen zur Bildung von geneigten Hängen, die Seiten des Tales müssen durch senkrechte, zum mindesten sehr steile Felswände gebildet werden, ein Charakteristikum für die meisten unserer großen Karstflüsse, wie auch Cvijić in seinem «Karstphänomen» erwähnt. Die steilen Felswände beweisen uns auf das klarste, daß die von der Schlucht durchschnittene Ebene bereits verkarstet war, als der Fluß noch in dem Boden des unaufgeschlossenen Poljes erodierte. Die Verkarstung selbst datiert von dem Augenblick, da der denudierte Boden des Senkungsfeldes den Inundationswasserspiegel erreicht hat. Der Karstwasserspiegel ist längst gesunken, liegt heute oft über 100 m unter dem alten Poljeniveau. Das bewaldete Bergland rings um das Polje ist in zahlreiche abflußlose Hohlformen zerschnitten, längst in die Tiefe gesunken. Nur der Poljenboden ist wie erstarrt; er ist zu ewiger Dauer verurteilt. Der Wald meidet die verkarstete Fläche, nur der bescheidene Wacholder und anspruchslose graue Kräuter nisten zwischen den weißen, kahlgebrannten Steinen. Und die zahlreichen, flachen Dolinen sind schüchterne Versuche der Natur, die weiten, abflußlosen Hohlformen nachzubilden, welche die Denudation rings um das Polje im bewaldeten Bergland unaufhörlich und in größtem Maßstab schafft.

Wenn nun die Denudation im Hochland einen Poljenboden hervorbringt, sobald das denudierte Land das Inundationsniveau erreicht, so muß mit Notwendigkeit dieselbe Erscheinung im tiefsten möglichen Inundationsniveau auftreten, an der Meeresküste. Hier sogar in besonders hohem Maß, nachdem das Inundationsniveau ein wesentlich konstanteres ist, als im gebirgigen Hinterland, wo jede neue Dislokation eine neue Absenkung hervorbringt, wo ferner die Poljenbildung an den Raum zwischen den Randklüften eines Senkungsfeldes gebunden ist. Wo sind nun diese «Küstenpoljen»? Aus dem Quarnero und dem Quarnerolo, zwischen der Ostküste Istriens und dem kroatischen Küstengebirge ragen die langgestreckten, steilen, felsigen dalmatinischen Inseln. Wenn man etwa vom Vratnikpaß die wilden Gebirgskämme übersieht, so möchte man in den Meeresarmen gewaltige Wassertiefen vermuten. Ein Blick auf die Seekarte der nördlichen Adria, zeigt uns jedoch, daß sich zwischen den wilden Inselgebirgen eine Flachsee breitet mit nahezu konstanter Tiefe. Ich will die wichtigsten Daten der Seekarte rekapitulieren: Im Golf von Fiume, zwischen Veglia,

Cherso und der Festlandsküste schwankt die Meerestiefe zwischen 61 und 66 m. Im Kanal von Farasina: 61 m, Quarnero nördlich von Arsa: 50 bis 53 m, nördlich von Promontore 49 bis 53, Canale die Mezzo: Im Norden 66, steigt bis auf 86 m im Süden, hart am Fuß des Stari Stan. (Hart an der Küste, von Cherso NE, an der engsten Stelle des Canale della Corsia, eine besonders tiefe Stelle mit 114 m.) Quarnerolo zwischen Cherso und Veglia nördlich vom Parallelkreis Cap Promontore: in der Mitte 96, im Süden und Norden 80 m. Südlich vom Promontoreparallel: 78—84. Canal Maltempo ist eine Mulde mit 40—45 m. Bei Selce sieht man eine Einschnürung, dann folgt der Canale della Morlacca mit 56 m und im Norden konstantes Sinken des Meeresbodens bis auf 76 m zwischen Sv. Juraj und Pervicchio.

Vom Cap Promontore streicht ein breiter unterseeischer Rücken mit 40 bis 48 m Wassertiefe im Bogen von der istrianischen Halbinsel zu den Inseln Unie und Lussin. Auf der ebenen Fläche sitzt ein isolierter Kegelberg, die Scoglio Gagliola mit Kote 4. Erst eine von Sebenico in südlicher Richtung etwa parallel zum Monte Maggiore-Hauptkamm streichende Rinne mit mehr als 200 m Wassertiefe setzt der Flachsee eine Grenze. Weder in den Golf von Fiume, noch in den Quarnero und Quarnerolo mündet ein Fluß von Bedeutung. Das Küstengebirge entwässert sich teils durch submarine, teils durch Strandquellen. Auf die Einschwemmung von Sedimenten kann daher die Entstehung des so auffallend ebenen Meeresbodens nicht zurückgeführt werden, die Ebenen haben bereits bestanden, bevor sie noch von der See überflutet wurden, kurz, wir haben die Poljenlandschaft vor uns, deren Existenz wir mit Notwendigkeit annehmen mußten. Sie stimmt in ihren orographischen Grundzügen vollkommen mit unserer Poljenserie des innerkroatischen Hochlandes überein: Flächen, nahezu ohne Gefälle, durch denudierte Bergzüge von einander getrennt, staffelförmig nach der alten Küste hin absinkend, die Höhendifferenzen zwischen zwei benachbarten Poljen im Verhältnis zu ihrer kürzesten Entfernung sehr groß. Ein Beispiel. Das Quarnero-Polje hat kein Gefälle. Der enge Canale di Mezzo hingegen auf kaum 10 km ein Gefälle von 10 m, der Canale della Morlacca ein Gefälle von 36 m, ganz analog dem starken Gefälle des nördlichen Gačkaarmes und des Lika-Durchbruchstales von Kossinj. Beide Kanäle mündeten in ein gefällsoses Polje, in den heutigen Quarnerolo. Und daß wir es in unseren Flachseebecken nicht etwa mit «Strandterrassen», sondern mit echten Poljen zu tun haben, beweisen die Süßwasserschichten der Insel Pago und die Braunkohlenflöze, welche die Süßwasserschichten der Inseln begleiten. Genau so, wie wir heute noch wahre Urwälder

von Sumpfgewächsen in den Quellenregionen von Zirknitz und in den Quellenregionen des Reifnitzer Beckens antreffen, so waren auch die Quellgebiete der adriatischen Poljen von Sumpfwäldern bedeckt. Diese Poljenböden, wenige Meter unter dem Meeresspiegel, zwischen steilen Randgebirgen, welche als langgestreckte Inseln aus der Flachsee ragen und noch vor 300 Jahren mit prachtvollen Buchenwäldern bestanden waren, sind auffallend genug in ihrer Analogie zu den Poljen des Hochlandes und, wie ich in einer späteren Abhandlung an der Hand der Tektonik von Buccari und Veglia zeigen werde, muß auch dem letzten Gebirgsschube eine Periode der Poljenbildung vorangegangen sein. In den großen Längstälern an der adriatischen Küste wechseln auffallend regelmässige Flachseebildungen mit den Spuren zerrissener Steilküsten und zerquetschter Gebirgszüge, eine Erscheinung, welche die aufnehmenden Geologen zur Annahme von Doppelfalten neben typischer Schuppenstruktur verleitet hat.

Wenn ich nun die Resultate meiner Betrachtungen zusammenfasse, so tritt mein Gegensatz zu den Auffassungen der Karstautoren über die Geschichte des Karstreliefs auf das schärfste hervor. Was die Anschauungen über die bei der Bildung von Reliefformen wirksamen Kräfte anbetrifft, habe ich mich in den vorstehenden Zeilen klar genug ausgesprochen. Nun will ich aber die zweite und zwar die weitaus wichtigere und allgemeinere Seite des Problemes kurz streifen. Was ich darüber sagen werde, ergibt sich restlos aus dem bisherigen Inhalte dieses Abschnittes. Wenn man die verschiedenen Abhandlungen über Karstmorphologie aufmerksam liest, so muß man insbesondere über eine Tatsache staunen: das Wasser findet überall diejenigen Verhältnisse, welche es braucht. Die Poljen wären nach GRUND abgesunkene Reste einer alten Einebnungsfläche. Sie sind nun im ganzen innerkroatischen Hochlande an jeder Stelle genau so tief abgesunken, daß sie vom tiefsten Karstwasserspiegel geschnitten werden. Also in einer merkwürdig regelmäßigen, staffelförmigen Reihenfolge. Die Flüsse durchziehen das Polje ohne zu verschwinden, ja sie durchsägen sogar (wie im Lika- und im Gačkagebiet) trennende Gebirgsrücken. Und gerade an den Poljenrändern finden sie derart klüftige Gesteinspartien daß sie verschluckt werden. Die Tendenz eines versiegenden Flusses müßte es naturgemäß sein, auf dem kürzesten Wege in die Tiefe zu gelangen. Statt dessen gehen, etwa im Gebiete von Planina und in vielen anderen, Höhlen und weite Klüfte schräg in den Berg, auf dem kürzesten Wege zur nächsten Hohlform. Vaclusequellen könnten, wenn die Theorie der Karstgerinne richtig wäre, an jedem beliebigen Punkte eines Poljes zum Vorscheine kommen. Statt dessen treten sie

genau an den Rändern der Hohlformen auf. Dieses Zusammentreffen von Faktoren, welche eine geregelte Wasserzirkulation geradezu bedingen, ist so auffallend, daß es ungerechtfertigt wäre, dieses Zusammentreffen dem bloßen Zufall zuzuschreiben. Schon aus diesem Grunde müßte man sich Mühe geben zu erkennen, ob nicht gerade die Hohlformen ein Produkt der hydrographischen Verhältnisse sind und nicht — wie man bisher angenommen hat — umgekehrt. Die Diskussion der Karsthydrographie und der Karstdenudation aus rein physikalischen Gesichtspunkten hat mich zu demselben Resultate geführt.

Das Fazit meiner Untersuchungen ist somit folgendes: Das Relief des Karstgebietes ist ein direktes, von Erosionswirkungen beinahe unbeeinflusstes Produkt seiner Grundwasser und mithin seiner Klüftigkeits- und Dichtigkeitsverhältnisse. Man darf daher aus der Karstographie auf die Klüftigkeit und Wasserführung der Gebirgsglieder schließen. Eine Erkenntnis von großer Tragweite für sämtliche wasserbaulichen Unternehmungen in Karstgebieten. Sie gestattet die rationelle Durchführung exakter Vorarbeiten.

ANHANG.

Karstdenudation und Alpenrelief.

Die Verschiedenheit der Denudationsfrage unter verschiedener Bodenbedeckung, rasche Abtragung unter Wald, langsame in Steppengebiet, hat das heute bestehende, eigenartig gegliederte, mannigfaltige Relief der Karstgebiete hervorgebracht. Es liegt kein zwingender Grund vor zu leugnen, daß die Wirkung derselben Ursache auch in der äußeren Erscheinung ganzer Gebirgssysteme hervortreten wird, wenn diese Systeme zum Teil oder aber ganz aus kalkigem Gesteinsmaterial bestehen oder bestanden haben.

Man denke sich einen von mächtigen Schichten kalkiger Sedimente überlagerten Teil der Erdkruste durch seitlichen Gebirgsschub zu einer Gebirgsfalte hoch über den Meeresspiegel, über Baum- und Schneegrenze emporgestaucht. Der zentrale Teil der Falte wird von einer Decke ewigen Schnees überlagert. Die Schmelzwasser, welche durch die Klüfte des Firnes niederrinnen und in den Spalten des klüftigen Kalkes frieren, lockern und sprengen das Gestein. Den Transport des abgesprengten, in die Unterseite der Firnmasse eingefrorenen Trümmerwerkes, besorgt das bewegte Eis. Der Schutt wird talabwärts befördert und die Abtragung der zentralen Partien der Sedimentendecke geht auf diese Weise relativ rasch vor sich. Die Randpartien der Gebirgsfalte befinden sich unterhalb der Baumgrenze. Sie sind mit Urwald bestanden und die chemische Denudation wird rasch in die Tiefe arbeiten. Zwischen dem bewaldeten Rand und dem firnbedeckten Inneren jedoch befindet sich eine breite Zone, welche weder der springenden Wirkung des frierenden Schmelzwassers der Eisregion, noch der zersetzenden Wirkung des säuregesättigten Niederschlagswassers der Waldzone ausgesetzt ist. Wie ein Gebirgswall wird diese Zone nach geologischen Zeiträumen chemischer und mechanischer Zerstörungsarbeit über die denudierte Waldregion emporragen und das ausgeräumte Zentralgebiet umgeben; durch die Erosion der Flüsse, welche den Gletscherströmen entspringen, in isolierte Massive zer-

schnitten, jedoch mit wenig reduzierter Höhenlage der Kämme und der Plateaus. Die denudierende Wirkung des direkten Niederschlages beschränkt sich auf der Oberfläche dieser Zone auf die Erzeugung flacher Schneedolinen. Man bedenke ferner: Das Emporstauen einer Gebirgsfalte durch seitlichen Gebirgsdruck bringt notwendig die Entstehung von Hohlräume und Massendefekten im Innern der Erdkruste mit sich. Die zahlreichen Längs- und Querbrüche im Gebirgskörper sind die Folgeerscheinungen. Die Zerstörung und Abtragung einer Gesteinsmasse von gewaltiger Mächtigkeit im zentralen Teil der Bodenschwelle inmitten eines unzerstörten Randwalles wird den Gleichgewichtszustand der Gebirgsmasse im höchsten Grad ändern und die Entlastung des Mittelteiles wird bedeutende Längsbrüche am Innenrand des Randwalles zur Folge haben. Das durch die Zerstörung der Gewölbekappe gewissermassen frei gewordene Gewicht der Randwalle preßt sich in die lokal gelockerte Erdkruste hinein.

In der Natur werden zahlreiche Faktoren in die geschilderte Entwicklungsgeschichte der Gebirgsfalte störend eingreifen. Zunächst ist die Falte schon in den ersten Stadien ihrer Entstehung den formenbildenden chemischen und mechanischen Einflüssen ausgesetzt. Die Wirkung dieser Einflüsse wird in den späteren Stadien der Gebirgsbildung den Verlauf der Gletscherströme und die Ausbildung der Flußsysteme bestimmen. Auch werden petrographische Verschiedenheiten im Bau der obersten Decke im späteren Relief zum Ausdruck kommen. Insbesondere Einlagerungen kalkarmer oder kalkfreier Massen. In großen Zügen müsste jedoch das Endergebnis der Entwicklung mit der theoretisch abgeleiteten Grundform übereinstimmen.

Wenn man das morphologische Gesamtbild der Alpen betrachtet, muß man bekennen, daß die Übereinstimmung mit der theoretischen Grundform eine vollständigere ist, als man mit Rücksicht auf die mögliche Anzahl störender Faktoren erwarten würde. In fast geschlossener Zone begleiten die nördlichen und südlichen Kalkalpen die jeder Kalkbedeckung beraubten Zentralketten. Überblickt man die Kalkalpen als Ganzes, etwa von der Spitze des Großglockners, scheinen ihre Gipfel und ihre Plateaus in einer horizontalen Linie zu liegen. De facto zeigt es sich, daß sich ihre Plateaus in einer nahezu konstanten Höhe, etwas über und etwas unter 2000 Meter und sonst gerade zwischen Firngrenze und Baumgrenze befinden. Eine Tatsache, welche schon für sich allein zu denken gibt. Sollte diese auffallende Erscheinung einem puren Zufall zuzuschreiben sein? Gewaltige Längsbrüche begleiten die Innenränder der Kalkalpen und folgen fast mit aller Schärfe dem Verlauf der Kalkgrenze, schärfer als es die Theorie ver-

langt. Und zwar sind die Zentralalpen der stehengebliebene Teil. Als ob die Kalkmassive unter ihrem Gewicht in die Tiefe gesunken seien. In steilen, von schroffen Felswänden durchsetzten Hängen brechen die Plateaus gegen die sanfter geböschten, niedrigen Hügel der bewaldeten Voralpen ab. Denn aus der Entstehung der Böschung im Kalkgebirge durch chemische Denudation geht hervor, daß an der Grenze zwischen Steppe und Wald keine Möglichkeit einer Böschungsbildung besteht. Ebenso wie die Flußtäler quer durch alte Poljenböden keine geneigten Böschungen, sondern steile Cañonwände zeigen, weil im steppenbedeckten Kalkgebirge keine Böschung entstehen kann. Und steil und felsig sind auch die Hänge der meisten Quertäler, welche die Kalkalpen in isolierte Massive zerteilen.

Die Entstehungsgeschichte der nördlichen und südlichen Kalkalpenketten mit allen ihren morphologischen Eigentümlichkeiten war bis dato in Dunkel gehüllt. Wenn man sich klar macht, daß die mit wenigen Strichen skizzierte Theorie imstande ist, eine große Anzahl der unerklärten Erscheinungen aus einer einzigen gemeinsamen Ursache zu deduzieren, so wird man ihren Wert und den Wert ihrer Elemente richtig einschätzen.

1910.

Tage	Januar			Februar			März			April			Mai			Juni		
	Otočac	Gospic	Udbina	Otočac	Gospic	Udbina	Otočac	Gospic	Udbina	Otočac	Gospic	Udbina	Otočac	Gospic	Udbina	Otočac	Gospic	Udbina
1	—	3·2	—	7·7	22·2	10·1	9·1	27·6	9·1	1·6	47·8	20·1	2·9	21·0	14·0	—	—	0·1
2	—	0·9	0·4	4·6	22·9	68·2	—	—	—	0·4	—	9·1	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	1·3	22·6	0·4	—	—	—	2·8	23·6	22·1	1·6	4·5	3·0	—	9·3	10·0
4	—	—	0·1	4·6	4·2	11·0	—	—	—	27·2	58·2	3·1	10·3	3·0	3·2	—	8·1	12·7
5	—	—	—	84·5	12·3	20·9	—	—	—	—	—	14·1	3·0	—	—	30·6	6·3	12·5
6	—	—	—	0·7	—	—	—	—	—	—	—	0·6	1·9	14·8	0·4	10·5	—	22·0
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8·4	0·5	—	—	—	—	19·9	16·0	5·8
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5·3	0·8	—	—	—	—	3·8	0·1
9	—	—	—	28·0	—	3·1	—	—	—	—	—	0·3	16·8	9·0	20·4	—	6·3	—
10	—	—	—	8·0	7·5	—	—	—	—	3·5	46·6	8·0	21·5	17·2	19·6	—	—	—
11	—	—	—	—	18·9	4·0	—	—	—	19·2	—	5·7	1·1	2·8	0·1	14·2	1·6	20·0
12	1·5	6·3	2·7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3·2	4·7	5·2	2·4	21·4	0·3
13	44·9	58·6	24·2	4·5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6·8	—
14	27·3	52·5	16·9	—	—	0·7	—	—	—	—	—	—	—	8·6	0·3	17·3	69·8	41·0
15	—	—	—	4·2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18·4	3·4	0·4
16	—	—	—	—	—	—	16·4	8·3	24·2	—	—	—	—	—	—	17·5	2·2	1·3
17	—	—	—	16·5	—	19·0	6·2	2·4	3·1	—	15·5	2·1	—	—	—	7·8	3·6	15·0
18	3·3	7·6	4·0	—	—	—	—	5·4	4·2	26·0	12·6	22·1	—	—	—	0·2	0·4	—
19	—	3·5	12·4	—	—	—	—	—	1·3	31·3	9·7	5·1	—	—	—	—	0·6	—
20	—	2·1	0·9	3·2	—	—	1·5	15·9	2·0	—	—	—	—	—	—	7·4	—	—
21	—	—	—	—	—	—	3·5	3·0	8·1	2·8	—	0·9	0·9	—	—	0·9	—	—
22	13·0	—	18·0	—	3·5	0·1	—	—	—	—	—	—	16·0	3·1	0·7	—	—	—
23	16·3	32·6	10·2	—	5·3	—	—	—	—	6·4	12·5	10·4	17·4	2·8	0·1	—	—	—
24	—	0·9	2·0	—	—	—	—	3·2	0·4	—	5·3	—	4·4	—	—	—	—	—
25	23·0	4·1	—	—	—	—	—	—	0·3	0·4	2·3	0·1	—	—	—	6·8	—	—
26	22·6	85·3	51·0	—	—	6·2	—	—	—	3·9	6·1	0·2	—	—	2·1	—	—	—
27	3·0	9·2	3·2	—	—	—	—	—	—	2·3	7·2	7·6	—	—	20·0	21·5	32·4	10·2
28	2·5	0·8	21·3	—	34·8	10·0	—	—	—	—	3·1	2·0	5·5	13·5	9·2	0·9	5·6	—
29	3·3	—	—	—	—	—	—	2·1	—	—	—	—	0·8	—	4·3	—	—	—
30	3·7	28·6	1·8	—	—	—	6·0	—	0·8	3·4	2·5	0·2	—	—	2·1	—	—	—
31	53·7	1·3	—	—	—	—	1·6	3·6	0·6	—	—	—	—	3·5	—	—	—	—
Summe	218·1	297·5	169·1	167·8	154·2	153·7	44·3	71·5	54·1	139·6	258·8	134·6	107·3	108·5	104·7	178·3	197·6	151·4

Jährliche Niederschlagsmenge :

1910.

Tage	Juli			August			September			Oktober			November			Dezember		
	Otočac	Gospić	Udbina	Otočac	Gospić	Udbina	Otočac	Gospić	Udbina	Otočac	Gospić	Udbina	Otočac	Gospić	Udbina	Otočac	Gospić	Udbina
1	—	—	—	—	—	—	2·0	—	—	—	—	—	4·8	25·6	11·2	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—	—	4·8	2·0	—	—	—	7·8	20·2	2·1	—	3·5	—
3	—	—	—	—	—	—	6·5	2·0	—	—	—	—	52·8	3·3	35·0	—	—	—
4	—	11·6	5·6	6·0	2·6	4·3	1·5	0·5	—	—	—	—	0·1	6·2	11·4	—	—	—
5	15·5	6·3	42·0	—	—	—	31·5	42·8	26·1	—	—	—	—	10·0	—	—	—	4·8
6	2·0	17·8	0·3	3·3	3·2	—	37·6	20·4	28·2	1·3	—	0·1	11·0	15·2	—	—	—	—
7	8·3	—	10·4	—	—	—	4·1	—	—	0·8	—	6·2	31·2	41·6	40·2	7·3	20·3	5·3
8	55·5	56·6	47·2	0·3	1·3	—	—	—	—	25·8	33·5	38·9	—	—	—	8·3	41·2	54·9
9	—	9·6	0·4	—	—	—	—	—	—	45·5	61·1	30·0	—	—	—	4·4	—	—
10	—	—	—	3·7	8·9	3·9	—	3·5	—	2·5	30·0	—	—	—	1·8	—	4·1	—
11	—	—	—	6·5	11·8	6·1	33·3	28·9	4·3	20·8	14·4	17·3	17·2	31·2	38·7	8·8	28·8	4·1
12	—	—	—	—	—	—	23·7	9·9	27·2	—	—	—	15·5	6·3	5·8	5·0	14·3	23·0
13	—	—	—	—	—	—	4·7	7·4	12·5	—	—	—	—	0·5	0·2	9·0	21·0	13·4
14	—	—	—	—	—	—	2·0	11·6	0·8	—	—	—	—	—	—	15·2	89·3	93·6
15	—	—	—	—	—	—	28·5	21·8	10·0	—	—	—	31·1	—	4·6	3·0	11·5	20·0
16	—	—	35·4	—	—	—	—	0·8	17·9	—	—	—	—	72·2	47·1	—	0·6	0·4
17	—	—	—	—	—	—	3·6	—	—	—	—	—	—	22·2	15·0	—	—	—
18	—	—	—	1·9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0·5	—	—	—	—
19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	37·3	16·2	38·5	46·9
20	4·4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2·6	5·0	6·3	—	2·7
21	34·7	0·6	—	—	—	—	2·2	24·9	10·2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22	—	—	—	—	—	—	14·2	70·6	61·0	73·5	49·3	37·9	165·2	—	0·7	—	—	—
23	—	—	—	—	—	—	24·2	37·8	15·2	7·3	32·2	22·0	—	5·8	—	—	—	—
24	5·3	—	7·2	18·8	47·8	27·9	4·5	25·4	12·0	11·8	13·8	19·2	—	—	—	—	—	—
25	3·8	33·6	—	—	—	—	10·6	11·4	9·9	—	0·8	1·4	8·5	—	—	—	—	—
26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	13·6	10·8	3·2	17·0	5·3	30·0
27	14·6	20·3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9·1	1·6	—	25·3	—
28	—	10·5	6·9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0·3	—	—	—	23·4	33·4
29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4·5	4·5	—	—	—	—	7·5	10·3	4·0
30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11·8	2·3	—	—	—	—	4·4	19·5	3·1
31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14·7	50·0	48·3	—	—	—	3·1	8·6	—
Summe	144·1	166·9	155·4	40·5	75·6	42·2	231·7	321·5	237·3	217·3	291·9	221·3	356·1	283·3	260·9	115·5	365·5	336·6

Otočac — — — — — **1960·6** *mm*
Gospić — — — — — **2592·8** «
Udbina — — — — — **2021·3** «

1911.

Tage	Januar			Februar			März			April			Mai			Juni		
	Otočac	Gospić	Udbina	Otočac	Gospić	Udbina	Otočac	Gospić	Udbina	Otočac	Gospić	Udbina	Otočac	Gospić	Udbina	Otočac	Gospić	Udbina
1	2.2	6.5	—	—	—	—	—	—	—	—	15.0	9.4	7.2	35.2	72.1	2.2	2.6	5.1
2	1.0	3.6	—	—	—	—	2.2	—	—	—	—	—	0.2	9.2	15.0	5.0	—	—
3	5.4	—	0.3	—	3.2	1.2	—	—	—	—	3.6	1.2	2.2	36.8	14.7	—	—	—
4	10.1	15.5	20.0	—	0.3	10.3	—	—	—	12.3	17.8	7.0	5.8	8.4	2.5	—	—	2.4
5	7.8	22.5	6.0	—	—	0.8	—	—	—	1.4	21.6	6.5	1.0	—	0.3	1.0	—	—
6	1.9	10.7	10.7	—	—	—	—	—	—	2.6	11.2	12.0	10.6	10.0	22.0	—	—	—
7	10.2	15.3	—	—	—	—	—	—	—	0.7	—	13.8	4.7	3.4	5.4	0.7	8.4	2.1
8	—	6.2	0.2	—	—	—	—	—	—	7.2	18.6	28.9	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	22.5	6.3	25.0	—	—	1.5	—	—	—
10	—	—	—	—	—	1.4	—	—	—	—	—	—	—	2.5	—	—	—	—
11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	17.4	—	—
12	—	—	—	—	0.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21.1	—	—
13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.6	—	—
14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.5	0.4	—	—	—	28.7	—	—
15	—	—	—	—	—	—	15.6	24.5	10.2	—	—	0.2	—	—	—	37.1	—	—
16	—	—	—	—	—	—	4.7	10.6	12.0	—	—	—	—	—	—	24.0	10.5	—
17	—	—	—	—	—	—	7.3	—	9.1	—	—	—	—	—	—	—	22.9	—
18	—	—	—	—	—	—	2.2	—	—	—	—	—	4.8	—	0.6	—	1.9	—
19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10.2	6.0	35.0	—	32.3	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.4	3.0	16.4	—	29.8	—
21	—	—	—	—	—	—	7.2	6.5	17.0	—	—	—	1.5	—	0.4	—	9.2	—
22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.1	—	—	—
23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
24	—	—	—	—	—	0.1	0.7	—	—	—	—	—	2.6	—	0.4	—	—	—
25	—	—	—	—	25.3	8.2	—	8.5	—	—	—	—	1.3	11.2	—	—	—	—
26	—	—	—	—	—	—	17.6	28.6	36.4	—	—	—	—	—	—	—	2.3	—
27	—	—	—	9.9	—	10.0	5.5	—	4.7	—	—	0.1	—	—	—	—	—	—
28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7.2	5.8	23.9	17.2	—	—	—	—	—
30	—	—	0.1	—	—	—	—	—	1.2	4.0	0.8	3.6	18.5	—	—	—	—	—
31	—	2.7	0.3	—	—	—	1.3	7.6	1.3	—	—	—	2.7	21.0	25.6	—	—	—
Summe	38.6	83.0	37.6	9.9	29.4	32.0	64.3	86.3	91.9	57.9	107.2	132.0	93.9	146.7	212.0	137.8	119.9	9.6

Jährliche Niederschlagsmenge :

1911.

Tage	Juli			August			September			Oktober			November			Dezember		
	Otočac	Gospić	Udbina	Otočac	Gospić	Udbina	Otočac	Gospić	Udbina	Otočac	Gospić	Udbina	Otočac	Gospić	Udbina	Otočac	Gospić	Udbina
1	—	—	—	—	—	0·3	—	—	—	41·2	30·8	83·1	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60·8	65·6	112·3	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3·0	39·5	30·0	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1·0	6·8	—	—	—	—	—	—	—
5	—	3·8	—	0·8	3·2	0·1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5·3	2·4	—	—	4·9	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6·4	11·2	0·1	1·5	33·5	0·4
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6·8	9·8	—	14·1	7·3	39·4
10	9·3	9·8	—	—	—	—	15·4	—	—	1·8	5·8	—	—	—	4·7	26·8	9·2	23·0
11	—	2·6	—	—	1·5	0·6	—	15·2	0·3	11·7	—	3·7	1·6	0·6	—	—	—	—
12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0·2	21·4	—	23·4	13·7	27·6
13	—	—	—	—	33·2	37·0	—	—	—	—	—	—	—	12·4	—	13·7	19·1	3·0
14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0·2	—	—
15	6·0	33·0	—	—	2·3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3·3	10·0	—
16	—	—	—	9·7	1·5	1·0	2·8	11·2	0·2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17	3·0	9·2	—	—	3·4	—	30·3	66·3	34·6	—	—	—	—	—	2·1	29·4	19·2	54·2
18	—	—	—	—	—	—	58·6	50·1	51·0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
19	—	—	—	—	—	—	1·0	0·5	0·2	—	—	—	3·5	16·5	1·3	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	—	2·3	0·4	—	—	—	6·4	56·4	68·9	—	—	—
21	4·2	5·2	3·1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23·7	10·6	11·2	—	16·0	4·0
22	—	—	—	—	—	—	1·8	8·4	2·5	—	—	—	—	3·2	4·7	3·4	31·0	9·8
23	—	—	—	—	—	—	5·0	7·8	17·4	—	1·3	—	—	—	—	—	—	—
24	—	—	—	—	—	—	3·8	3·6	5·9	5·5	11·2	4·2	—	—	—	—	—	2·1
25	—	—	—	1·6	0·5	1·2	3·0	28·7	27·4	9·0	11·5	28·5	15·8	32·2	47·0	—	—	—
26	—	—	—	20·0	2·4	2·1	1·8	3·0	5·1	12·5	11·1	21·9	—	0·6	5·9	15·0	—	18·0
27	—	—	—	19·4	—	7·5	3·5	—	—	0·7	5·1	10·0	0·1	0·1	1·8	—	—	1·9
28	—	—	—	—	—	—	0·4	—	—	0·8	—	0·8	—	—	—	—	6·5	—
29	—	—	0·2	—	—	—	—	—	—	15·3	25·4	9·0	—	—	—	—	—	—
30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11·0	1·1	0·1	—	—	—	—	—	—
31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Summe	22·5	63·6	3·3	51·5	48·0	49·8	127·4	197·1	145·0	174·3	215·2	2305·1	69·8	177·4	147·7	130·8	170·4	183·4

Otočac — — — — — — — — — — **978·7** *m*_m
Gospić — — — — — — — — — — **1444·2** α
Udbina — — — — — — — — — — **1349·3** α

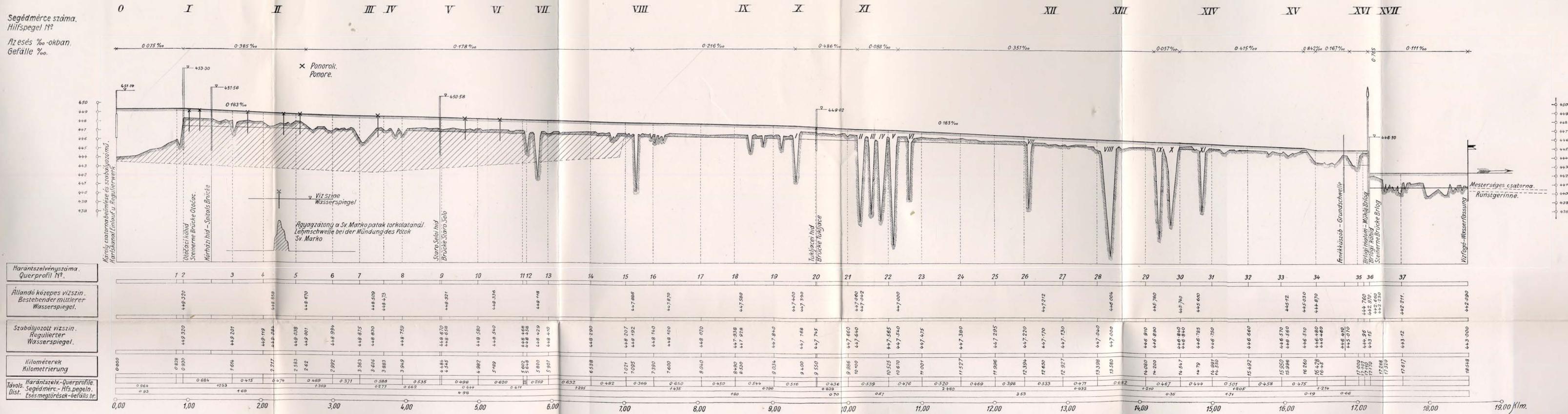
INHALT.

	<i>Seite</i>
Einleitung	255 (3)
1. Situation des Studienobjektes	256 (4)
2. Orographie des Gačkapoljes	261 (9)
3. Quellen, Talweg und Ponore	264 (12)
4. Wasserführung des Gačkaflusses	287 (35)
5. Das Quellgebiet von Sv. Juraj	292 (40)
6. Entstehung des Gačkapoljes	296 (44)
7. Das Karstwasser	314 (62)
8. Auseinandersetzung mit den Karsttheorien	335 (83)
Anhang: Karstdenudation und Alpenrelief	366 (104)

Längsprofil des nördlichen Gačkarms von der Einmündung des Karlskanals bis zu dem bei km 18+546 projektierten Wasserfang.

Maßstab: der Längen 1:25.000,
der Höhen 1:200.

Segédmérce száma,
Hilfspegel N^o
Az esés ‰-okban,
Gefälle ‰.



Detaillierter Situationsplan des ersten Švicasees.

Maßstab: 1:115,200.

