NAŠ KRŠ, XIII, 22 (1987)

IZBOR MJESTA I INTENZITETA MJERENJA NIVOA PODZEMNIH VODA U KRŠU

SELECTION OF LOCATIONS AND INTENSITY OF LEVEL MEASUREMENT OF KARST UNDERGROUND WATERCOURSES

Izet AVDAGIĆ, Zavod za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Sarajevu

Uvod

Hidrološke specifičnosti krša su brza infiltracija palih kiša, mala akumulativna sposobnost u zoni sitne pukotinske poroznosti, te velika provodnost i stvaranje povremenih površinskih i podzemnih akumulacija u zonama krupnih pukotina i prostorno velikih diskontinuiteta. Posljedica ovakvih karakteristika je da slivovi, ili njihovi dijelovi izgrađeni od karstifikovanih karbonatnih stijena, imaju slabo razvijenu mrežu površinskih vodotoka, pošto se provodna i kolektorska mreža nalazi pretežno u podzemlju. Položaj podzemnih provodnika zavisi o dubini erozionog bazisa, odnosno stepena karstifikacije. U ovisnosti od pojave i veličine akumulacionih prostora dolazi do većeg ili manjeg zadržavanja voda u slivu. Režim oticanja je neravnomjeran i to u prvom redu zbog neravnomjernosti ulaza, a transformacija i retardacija oticanja ovisi o pomenutim kraškim karakteristikama. Za kraške terene su karakteristični i nekraški segmenti sa kojih se, posebno u visinskim dijelovima sliva, vode disponiraju u kraško podzemlje.

Oticanje iz kraškog sliva, premda ovisi o tipu krša i stepenu karstifikacije, u principu može biti ograničeno površinom proticajnog presjeka provodnika na nekoj od dionica. Takvo stanje provodnosti pojedinih

Introduction

Hydrological specific features of the karst are fast infiltration of rain falls, low storage capability in the zone of low fracture porosity, as well as high conductivity and formation of temporary surface and underground reservoirs in the zones of large cracks and spatially high doscontinuities. The result of such characteristics is the fact that catchment areas or their parts composed of karst carbonate rocks have a poor network of surface streams since the conducting and collecting network is mainly underground. Location of underground conducting strata depends on the depth of erosion basis, i.e. karstic degree. Longer or lesser water retention in catchment area takes place depending on the occurrence and size of storage areas. Outflow regime is non-uniform primarily due to inflow nonuniformity, and outflow transformation and retardation depend on mentioned karst characteristics. Karst terrains are also characterized by non-karst segments wherefrom the waters are disposed into karst underground, particularly from the high parts of catchment area.

Although it depends on the karst type and karstic degree, outflow from the karst catchment area may be limited, in principle, by surface of flow section of

dijelova sliva dovodi, pri većem prilivu voda, do brzog dostizanja kapaciteta oticanja, koje praktično, vrlo malo ovisi o podizanju nivoa u slivu. Mala poroznost i niska akumulativna sposobnost pukotinskog sistema ima za posljedicu brzi porast nivoa podzemnih voda, tako da pri nailasku većih voda intenzitet porasta često iznosti 20 i više metara na sat. Porast nivoa odvija se do kote neke veće površinske ili podzemne akumulacije, koja može da prihvati vodnu masu i omogući transformaciju vodnog vala. Najčešća je pojava sprege više akumulacija, tako da se formira režim oticanja u ovisnosti u toj sprezi i režimu ulaza.

Za korištenje voda u kršu neophodno je poznavanje prirodnih uslova među kojima su najznačajnije sljedeće veličine: položaj pojedinih (glavnih) provodnika u slivu i podzemlju, te poznavanje količina koje tim provodnicima otiču u pojedinim situacijama. Ova dva parametra su ključna za provođenje odgovarajućih tehnoekonomskih analiza, odnosno izbora najpovoljnijeg rješenja.

Pristup

U definiranju režima voda u kraškim hidrološkim sistemima polazi se od pretpostavke da se kretanje vode u kršu vrši povlaštenim pravcima - provodnicima i da van tih provodnika nema značajnijeg kretanja. Akumuliranje vode vrši se u podzemnim i površinskim akumulacijama, u sitnom pukotinskom sistemu i u provodnicima koji dreniraju te sisteme. Tečenje u akumulacijama odvija se u laminarnom režimu, dok se u provodnicima koji predstavljaju drenažnu mrežu pobrojanih akumulacija to tečenje odvija u turbulentnom režimu.

Oticanje u kraškim hidrološkim sistemima potrebno je analizirati u skladu sa karakteristikama krša, pošto one nameću postupke mjerenja, a i metode analiza u svrhu određivanja oticanja i režima voda. Sa hidrogeološkog stanovišta radi se o dva tipa krša; plitkom i dubokom. U zonama plitkog krša transport vode je vrlo brz što

conducting stratum in one of the sections. Such state of conductivity of particular catchment area parts brings about, at larger water inflow, fast reach of outflow capacity which, practically, depends very little on level rise in the catchment area. Low porosity and low storage capability of fracture system result in fast rise of underground waters level so that, upon occurrence of flood waters, intensity of rise amounts frequently 20 metres and more per hour. Level rise takes place until it reaches elevation of some larger surface or underground reservoir capable of receiving the water mass and enabling transformation of water wave. The most frequent phenomenon is conjunction of several reservoirs so that outflow regime is formed depending on such conjuction and inflow regime as well.

To utilize the karst waters it is necessary to know natural conditions amongst which the following features are the most significant: location of particular (main) conducting strata both in catchment area and underground as well as knowledge of quantities outflowing through these conducting strata in particular situations. These two parameters are key features for the application of relevant technological and economical analyses, i.e. selection of the most suitable solution.

An approach

When defining water regime in karst hydrological systems, one should start from the assumption that water flow in the karst area takes place along distinctive directions - conducting strata and that no significant flow takes place beyond these conducting strata. Water storage takes place in underground and surface reservoirs, in small fracture system and conducting strata draining these systems. Flow in reservoirs is in laminar regime, while in conducting strata representing drainage network of mentioned reservoirs this flow is in turbulent regime.

Outflow in karst hydrological systems should be analysed in accordance

omogućavaju po dimenzijama razvijeni provodnici, koji rijetko imaju suženja, tako da pri većim vodama ne dolazi do značajnijeg usporenja i transformacije vodnog vala. Ovo oticanje se u dobroj mjeri približava oticanju u slabo bodopropusnim terenima i u većem broju slučajeva moguće je primijeniti standardne hidrometrijske metode. U dubokom kršu, koji je predmet ovog rada, problem oticanja je složeniji.

U postupku za definiranje oticanja potrebno je za sliv odrediti položaje glavnih provodnika, pripadajuće slivne površine, postaviti mjerne objekte te izvršiti potrebna mjerenja i tariranje mjernih mjesta. Pod tariranjem se podrazumijeva određivanje zavisnosti (linije) proticaja od nivoa vode za pojedina hidrološka stanja. Sa podacima mjerenja u vremenu i linijama proticaja za odgovarajuća hidrološka stanja određuju se oticanje i režim voda u slivu.

Definiranje podslivova i glavnih provodnika u kraškom slivu je složeno, ali rješivo za modernu geologiju i njene metode. Problematika je obično kombinirana sa određenim hidrološko-hidrauličkim postupkom za rješavanje promjene geometrije na mjernoj dionici, odnosno na kontrolnom proticajnom profilu.

Lokacija mjernih mjesta veza je, uz rješavanje podslivova i glavnih provodnika, i za korisničke potrebe. Hidrološkohidraulički problem je da izbor mjernog mjesta mora biti u sklopu hidrološkog sistema i da se obezbijedi zatvorenost takvog sistema, jer se jedino u tom slučaju može provesti kvalitetno tariranje odabranih mjernih mjesta po podslivovima.

Izbor mjesta mjerenja

Površina kraškog sliva i njegovih interesantnih dijelova te položaji glavnih provodnika određuju se geološkim metodama. Sliv sa hidrološkog gledišta čine prijemna površina za ulaze, akumulacioni prostori i provodnici.

with karst characteristics since they impose measuring procedures as well as the methods of analyses for the purpose of outflow and water regime determination. From the hydrogeological view–point, there are two types of the karst: shallow and deep. In the shallow karst zones, water transportation is very fast being made possible by a large conducting strata with rare narrow parts so that no considerable retardation and transformation of water wave occur in case of flood waters. This outflow considerably reaches the outflow in poor water-permeable terrains and, in majority of cases, it is possible to apply standard hydroelectrical methods. The problem of outflow in deep karst, being the subject of this paper, is much more complex.

When defining the outflow, it is necessary to determine the locations of main conducting strata and pertaining gathering grounds for the catchment area concerned, as well as to set measuring structures and make required measurements and calibration of measuring points. Calibration implies determination of the flow line dependence on water level for the particular hydrological situations. Outflow and waters regime in the catchment area are determined on the basis of measurement data within a certain time and flow lines for the particular hydrological situations.

Definition of subsidiary catchment areas and main conducting strata in karst catchment area is very complex but solvable for modern geology and its methods. The problems are usually combined with certain hydrological-hydraulic procedure for solution of geometry change in measured section, i.e. in the control flow profile.

Location of measuring points is related to the users' requirements as well, in addition to solution of subsidiary catchment areas and main conducting strata. Hydrological-hydraulic problem lies in the fact that selection of measuring point must be within the scope of hydrological system and to provide closeness of such system since

Broj i položaj provodnika određuju *obim dekompozicije sliva na podslivove.*

Na sl.1. daje se prostorna skica kraškog sliva sa glavnim provodnicima i podslivovima na kojima su naznačena mjerna mjesta za registraciju nivoa, razlika nivoa i proticaja. Prema terenskim mjerenjima podslivovi se ponašaju kao linearni rezervoari. Definiraju *se kao i sliv s tim što se područje analizira* znatno detaljnije, pošto se karakteristike prostora, osim po površini, moraju odrediti i po dubini.

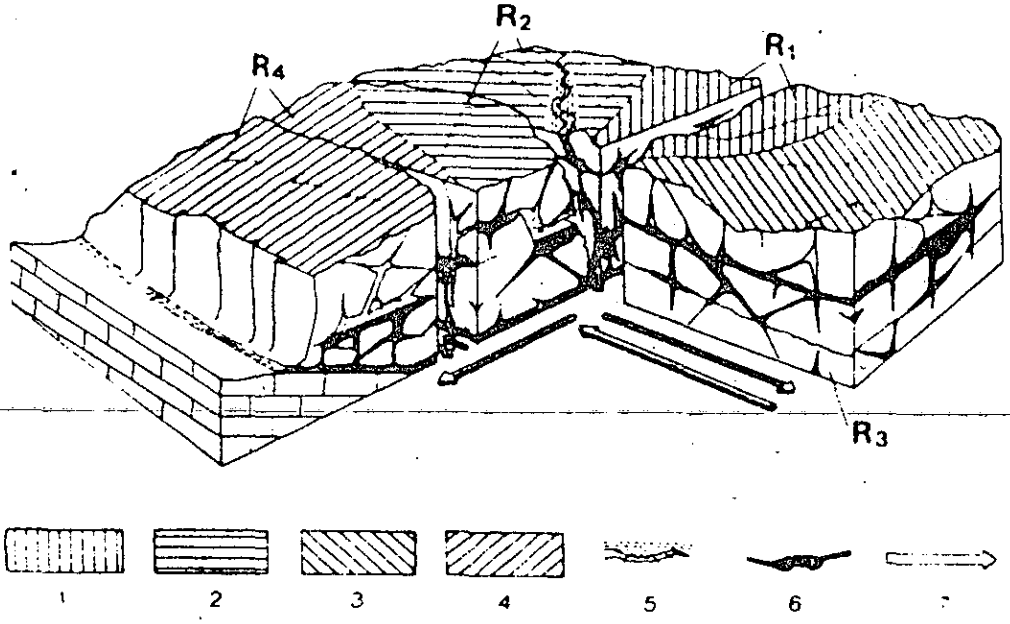
U tom pogledu od posebnog značaja su karakteristike provodnika i akumulacija voda. Pod akumulacijama se podrazumijeva-

quality calibration of selected measuring *points per subsidiary catchment* areas can only be made in such particular case.

Selection of measuring points

Surface of the karst catchment area and its interesting parts and locations of *main conducting strata as well are* determined by geological methods. From the hydrological viewpoint, catchment area consists of receiving surface for inflows, storage areas and conducting strata.

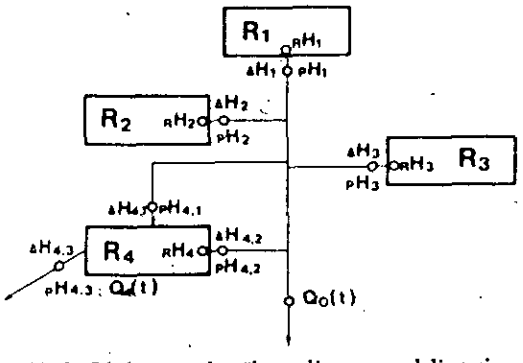
Number and location of cunducting strata define the scope of catchment area



Sl. 1.Šema kraškog sliva razloženog na podslivove (Tehnika prikaza Bakolowicz); 1, 2, 3, 4 – Označavaju slivne površine rezervoara R_1, R_2, R_3 i R_4, 5 – Povremeno plavljeno kraško polje, 6 – Podzemna voda u pukotinskom sistemu i akumulacijama, 7 – Pravci kretanja podzemnih voda glavnim provodnicima.

Fig. 1. Layout of the karst catchment area decomposed on subsidiary gathering grounds (Bakolowicz view technique); 1, 2, 3, 4 – Indicate gathering grounds of reservoirs R_1, R_2, R_3 and R_4, 5 – Occasionally flooded karst polje; 6 – Underground water in fracture system and reservoirs; 7 – Flow directions of underground waters through main conducting strata

ju aktivni prostori u koje tokom hidrološkog ciklusa vode dolaze i iz njih odlaze. Nehomogenost terena po dubini i površini ima za posljedicu da veličine prostora ispunjenih vodom u funkciji visine imaju nepravilne promjene. Ova zavisnost koja je šematski prikazana na sl. 3. može se svesti na dijelove sa približno konstatntnim karakteristikama s tim da se na prijelazu sa jednih vrijednosti na druge javljaju diskontinuiteti.



Sl. 2. Blok šema kraškog sliva sa podslivovima, provodnicima i mjernim mjestima

Fig. 2. Block diagram of catchment area with subsidiary gathering grounds, strata and measuring points conductiong

Zavisnost prikazana na sl. 3. ne može se odrediti u pogledu površina u apsolutnim vrijednostima, ali se mogu odrediti visine ili proticaji pri kojima dolazi do promjena karakteristika površina. Za ovu svrhu se koristi linija recesije proticaja ili vodostaja (sl. 4):

$$Q(t) = Q(t_o)\, e^{-\lambda / A\,(t-t_o)} \qquad (1)$$

u kojoj je:

$Q(t)$ – proticaj u vremenu t
$Q(t_o)$ – proticaj u vremenu t_o
λ – koeficijent, karakteristika provodnosti
A – efektivna površina rezervoara

Za generalno rješavanje odnosno određivanje parametara i A raspolažemo sa dva sistema zavisnosti: recesionim linijama (H-t ili Q-t) i sa linijama proticaja u nedefiniranoj razmjeri (H-Q ili H-ΔH).

decomposition into subsidiary gathering grounds.

Figure 1. shows layout of karst catchment area with main canducting strata and subsidiary gathering grounds, while Figure 2. is a simplified block diagram of catchment area with subsidiary gathering grounds indicating measuring points for recording of levels, level differences and flows. According to field measurements, subsidiary gathering grounds behave like linear reservoirs. They are defined as the catchment area, except that the area should be more detailed analysed since the space characteristics are to be defined not only per surface but also per depth.

With this respect, characteristics of conducting strata and water reservoirs are of special importance. Reservoirs imply the active spaces with water inflow and outflow during hydrological cycle. Terrain nonhomogeneity both per depth and surface results in irregular changes of the size of water filled spaces as per height function. This dependence, being schematized in Figure 3., may be reduced to parts with approximately constant characteristics with discontinuities appearing during transition from certain values to others.

Dependence shown in Figure 3. cannot be defined in absolute value, as regards the surfaces, but heights of flows during which the change of surface characteristics takes place can be defined. For this purpose, recession line of flow or water level (Fig. 4) is used:

$$Q(t) = Q(t_o)\, e^{-\lambda / A\,(t-t_o)} \qquad (1)$$

where is:

$Q(t)$ – flow in time t
$Q(t_o)$ – flow in time t_o
λ – coefficient, conductivity characteristic
A – effective reservoir surface

Two dependence system are avialable for general solution, i.e. determination of

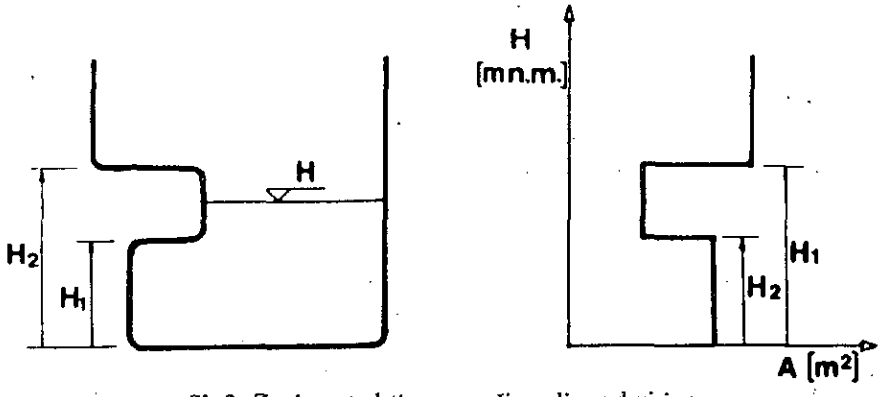
Potreban intenzitet mjerenja nivoa vode

Nivoi vode mjere se u rezervoarima i provodnicima. Ako želimo da odredimo oticanje iz jednog rezervoara, za njegovo definiranje potrebno nam je da poznajemo razliku nivoa vode rezervoara i neke tačke provodni-

parameters and A: by recession lines (H-t or Q-t) and by flow lines with nondefined scale (H-Q or H-H).

Required intensity of water level measurement

Water levels are measured in reservoirs and conducting strata. If outflow from



Sl. 3. Zavisnost aktivne površine sliva od visine
Fig. 3. Dependence of the catchment area active surface on the height

ka (ΔH). Do proticaja možemo doći i pomoću razlike nivoa vode na početku i kraju neke mjerne dionice na samom provodniku (sl. 5).

Proticaji pojedinih rezervoara obično se ne mjere direktno u podzemnim provodnicima već kao sumarni izlaz iz sliva na površini terena. Za konstantne karakteristike glavnog provodnika, odvodnika ili dovodnika voda u rezervoar, u nekom dijapazonu hidroloških stanja, proticaji u njima su određeni razlikama nivoa voda koje se mjere. U području hidroloških stanja sa konstantnim karakteristikama može se postaviti dovoljan broj jednačina kontinuiteta za sliv iz kojh se mogu odrediti karakteristike svake mjerne dionice.

Nivoi i razlike nivoa vode za proračun proticaja treba da budu reprezentativni kako za određivanje karakteristika mjerne dionice tako i za određivanje pada nivoa odnosno pijezometarske linije. Pri proračunu proticaja na cijeloj amplitudi stanja potrebno je da bude ispunjen uslov ustaljenosti.

one reservoir is to be defined, then it is necessary to know the water level difference of reservoir and some point of condusting stratum (H). Flow may be also defined by means of water level difference at the beginning and end of some measuring section on the conducting stratum itself (Figure 5.)

Flows of particular reservoirs are usually not neasured in underground conductiong strata but as cumulative outlet from the catchment area on the terrain surface. For constant characteristics of main conducting stratum, waters supply and drainage channels to the reservoir, within certain range of hydrological states, flows in them are defined by differences of water levels being measured. A sufficient number of continuity equations for the catchment area may be set within the range of hydrological states with constant characteristics, to be used for definition of characteristics of each measuring section.

Levels and water level differences

Intenzitet mjerenja određuju karakteristike sistema, koje se mogu razložiti na karakteristike sredine i karakteristike ulaza. Karakteristike sredine predstavljaju konstantu, a određena varijabilnost može se pojaviti u složenim sredinama sačinjenim od podslivova - rezervoara koji su međusobno spregnuti.

Ulaze u kršu predstavljaju padavine i koncentrisani doticaji. Padavine, kao što je poznato predstavljaju slučajnu veličinu, dok koncentrisani doticaji iz nekog dijela sliva ili varijabilno iz drugog sliva, obično su transformisane veličine padavina.

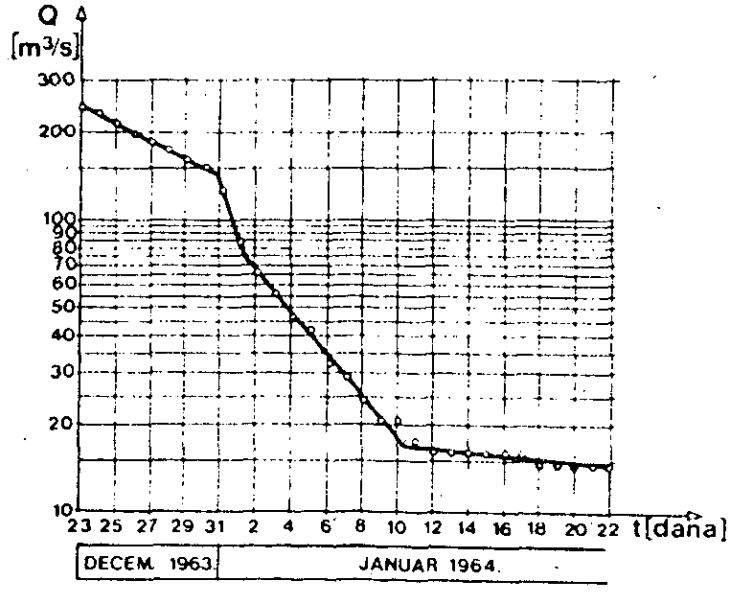
U obradi podataka o mjerenjima primjenjuju se razni pristupi među kojima su ekstremni statistički i deterministički. Za statistički pristup koristi se obično konstantna diskretizacija intervala vremena mjerenja. Odabrani interval za ovaj pristup koristi se kao uobičajen, a često je on i procjenjen po osjećaju ili prenešen na osnovu iskustava sa sredinom koja nije uporediva sa kraškom sredinom. U tom smislu najčešće se koriste in-

for the flow calculation should be representative both for determination of measuring section characteristics and drop of level, i.e. piezometric line. When calculating the flow on the entire state amplitude, stability condition should be met.

Measuring intensity is defined by the system characteristics which could be decomposed into characteristics of medium and characteristics of entry. Medium characteristics represent a constant, while a certain variability may occur in complex media composed of subsidiary gathering grounds -- reservoirs being interconnected.

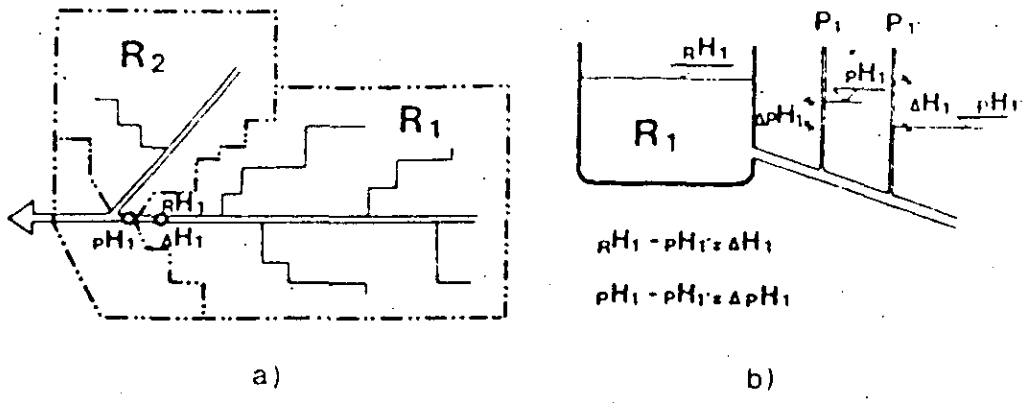
Entries in the karst are represented by precipitations and concentrated inflows. As it is known, precipitations are random value, while concentrated inflows from some part of the catchment area or, variably, from other catchment area, are usually transformed values of precipitations.

When processing measuring data, various approaches are applied with static



Sl. 4. Linija recesije Vrela Bune

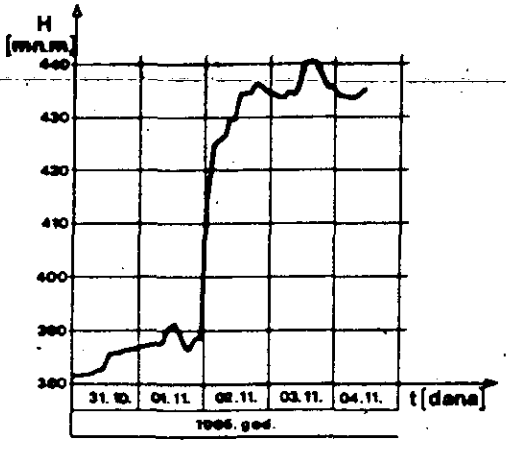
Fig. 4. Line of the River Buna Spring recession



Sl. 5. Skica kraškog sliva (a) i Šematizacija podsliva sa rezervoarom i provodnikom (b)

Fig. 5. Diagram of karst catchment area (a) and schematization of secondary catchment subarea with reservoir and conducting stratum (b)

tervali vremena koji su uobičajeni za granularnu sredinu 1, 2, 7 pa i 10 dana. Međutim, mjerenja u kršu pokazuju da se često javljaju u određenim dijapazonima promjene nivoa od nekoliko desetina metara u toku jednog sata. Jasno je da se u takvim uslovima mogu napraviti značajne greške ukoliko pokušamo da sa takvim sistemom mjerenja za kratko vrijeme od jedne do dvije godine opišemo karakteristike sredine i režim voda.



Sl. 6. Nivogram na pijezometru u Fatničkom polju

Fig. 6. Level graph on piezometer in the Fatničko polje

and determinative approaches as extreme ones. A constant discretization of measuring time intervals is usually used for the static approach. Selected interval for this approach is used as common, but usually it is also estimated by one's professional sense or on *the basis of experience gained in the medium* which is not comparable with karst medium. With this respect, time intervals common for granular medium of 1, 2, 7 and even 10 days are most frequently used. However, measurements made in the karst indicate that level changes of several *tens of metres* within one hour frequently take place within certain ranges. It is obvious that considerable errors may be made under such conditions if one should try to describe characteristics of medium and waters regime by such measuring system and for a very short time of one to two years.

A modern measuring technique enables us to obtain data necessary for insight into the karst medium characteristics applying high intensity measurements, with time interval to one hour and during one hydrological year or shorter but more complete hydrological occurrence. Only after knowledge of characteristics of the medium concerned, regime modelling, i.e. measuring intensity may be initiated. When doing this

Savremena mjerna tehnika nam omogućava da sa mjerenjima velikog intenziteta, sa vremenskim intervalom do jedan sat, u toku jedne hidrološke godine ili kraće ali potpunije hidrološke epizode, dodemo do podataka potrebnih za uvid u karakteristike kraške sredine. Tek nakon upoznavanja karakteristika te sredine može se pristupiti modeliranju režima odnosno intenziteta mjerenja. Pri tome se pored karakteristika sredine mora voditi računa i o svrsi mjerenja: da li se vrše samo radi definiranja režima nivoa podzemnih voda, ili će se ta mjerenja koristit i za definiranje proticaja.

Zaključak

Geološka analiza prostora omogućava definiranje zona tokova podzemnih voda u kršu, dok konkretni izbor lokaliteta uslovljava koncept korištenja. Intenzitet mjerenja nivoa zavisi od karakteristika sredine, veličine, te pristupa u definiranju hidrološkog odnosno hidrogeološkog problema. U zonama većih ili manjih akumulacionih kapaciteta mjerenja se mogu vršiti slabijim ili većim intenzitetom, ali dovoljno intenzivno da omoguće reprezentativnu registraciju značajnijih promjena nivoa u zavisnosti od pojava na ulazima i na pregnutim dijelovima sistema sliva. Intenzitet mjerenja, odnosno vremenski razmak između dva mjerenja, može se kretati od nekoliko minuta do nekoliko dana. Savremena tehnika omogućava rješavanje problema intenziteta mjerenja u dva koraka. U prvom koraku mjerenja se vrše vrlo intenzivno radi definiranja karakteristika sistema, a u drugom se, nakon upoznavanja karakteristika sistema, određuje potreban intenzitet mjerenja za definiranje karakteristika režima.

the purpose of measurement, in addition to the medium characteristics, should be taken into consideration, i.e. whether they are made only for the purpose of definition of underground waters level regime or these measurements will be used for the flow definition,

Conclusion

Geological analysis of the spaces enables definition of the underground water flow zones in the karst, while the real selection of location conditions the utilization concept. The intensity of levels measurement depends on the medium characteristics, size as well as an approach to definition of hydrological or hydrogeological problem respectively. In the zones of higher or lower storage capacities, measurements may be made by lower or higher intensity, but sufficiently intensive to ensure representative recording of more significant changes of levels, depending on the ossurences in entries and conjuncted parts of the catchment area system. Measuring intensity, i.e. time interval between two measurements may range from several minutes to several days. A modern technique enables solution of the measuring intensity problem in two steps. In the first step measurements are very intensively made in order to define the system characteristics while in the second step, after familiarization with the system characteristics, required measuring intensity for definition of the regime characteristics is determined.

Literatura

P. STOJIĆ, M. MILIČEVIĆ, P. MILANOVIĆ, *Pijezometri kao sredstvo istraživanja u kršu,* Hidrologija i vodno bogatstvo krša, Zbornik Jugoslovensko-američkog simpozijuma u Dubrovniku, Zavod za hidrotehniku GF, Sarajevo, 1976.

M. VUKOVIĆ, *Određivanje parametara vodonosne sredine i faktora bilansa u dvoslojevitoj i višeslojevitoj poroznoj sredini, analizom prirodnog režima,* Bilans podzemnih voda, Jugoslovenski komitet za međunarodnu hidrološku deceniju, Beograd, 1967.

P. MILANOVIĆ, *Hidrogeologija karsta i metode istraživanja*, Hidroelektrane na Trebišnjici – Institut za korištenje i zaštitu voda na kršu, Trebinje, 1979.

P. HABIČ, *Vodna gladina v notrenjskem in primorskem krasu Slovenije*, Slovenska akademija znanosti in umetnosti, Acta Carsologica – Krasoslovni zbornik, XIII/2, 1984, Ljubljana, 1986.