

**PREUČEVANJE VERTIKALNEGA PRENIKANJA  
VODE NA PRIMERIH PLANINSKE IN POSTOJNSKE  
JAME**

(Z 10 SLIKAMI IN 4 TABELAMI)

**THE STUDY OF VERTICAL WATER PERCOLATION IN THE  
CASE OF PLANINA AND POSTOJNA CAVES**

(WITH 10 FIGURES AND 4 TABLES)

**JANJA KOGOVŠEK, PETER HABIČ**

SPREJETO NA SEJI  
RAZREDA ZA PRIRODOSLOVNE VEDE  
SLOVENSKE AKADEMJE ZNANOSTI IN UMETNOSTI  
DNE 29. MAJA 1980

## VSEBINA

1. UVOD .....	133
2. PREGLED PROBLEMATIKE .....	133
3. OBSEG OPRAVLJENEGA DELA .....	134
4. IZBIRA VZORCEV IN OPIS VZORČNIH MEST .....	134
5. METODE DELA .....	134
6. REZULTATI IN DISKUSIJA .....	136
6.1. Način vertikalnega prenikanje vode .....	136
6.2. Kemijsko učinkovanje pri vertikalnem prenikanju vode .....	137
6.3. Vodni val .....	140
6.4. Razmerje med trdoto in pretokom .....	142
6.5. Letne količine pretekle vode in odnešenih karbonatov .....	143
6.6. Razmerje karbonatna trdota – električna upornost .....	144
6.7. Izločanje karbonatov .....	145
7. SKLEPI .....	145
The Study of Vertical Water Percolation in the Case of Postojna and Planina Caves (Summary) .....	146
Literatura .....	147

UDK 551.444 (497.12-14)

**Kogovšek Janja in Peter Habič: Preučevanje vertikalnega prenikanja vode na primerih Planinske in Postojnske jame. Acta carsologica 9, 000-000, Ljubljana, 1980, lit. 31.**

Prenikanje vode skozi 100 m debel jamski strop je bilo merjeno v letih 1977 do 1979. Ugotovljeno je razmerje med padavinami in pretoki curkov v jamah, analizirane so trdote in temperature, prevodnost in druge kemijske lastnosti vode. Z barvanjem je spremljan potek prenikanja ter hitrost in razporeditev vode. Izračunane so raztopljene in odnešene količine karbonatov v teku leta, posebej pa je analiziran vpliv močnega naliva na pretok ter mehanično in kemično denudacijo.

UDC 551.444 (497.12-14)

**Kogovšek Janja and Peter Habič: The Study of Vertical Water Percolation in the Case of Postojna and Planina Caves. Acta carsologica 9, 000-000, Ljubljana, 1980. Lit. 31.**

The water percolating through 100 m thick roof was measured in the years 1977 to 1979. The rate between the precipitations and trickle discharges in the caves was stated, hardness and temperature were analysed as well as conductivity and other chemical properties of the water. By water tracing the course of percolating, velocity and water distribution were controlled. During the year dissolved and transported carbonate quantities were calculated, specially the influence of shower to discharge and mechanical and chemical denudation was analysed.

Naslov - Address:

mag. Janja Kogovšek  
dr. Peter Habič

Inštitut za raziskovanje krasa SAZU  
Titov trg 2  
66230 Postojna, Jugoslavija

## 1. UVOD

V okviru teme »preučevanje vertikalnega prenikanja vode na primerih Planinske in Postojnske jame«, ki sta jo finansirala Raziskovalna skupnost Slovenije in Zveza vodnih skupnosti Slovenije, smo preučevali dinamiko vertikalno penikajoče vode in kemijska dogajanja na njeni poti pri izbiranih curkih v obeh jamah. Ugotavljali smo tudi porazdelitev nekaterih elementov v sigah, kamnini in penikajoči vodi, kar je posebej opisano v prispevku J. Kogovšek »Porazdelitev nekaterih elementov pri nastajanju sig v kraških jamah«.

Voda v naravi neprestano kroži, v ta ponavljajoči se proces je vključen tudi človek kot njen porabnik. Rezultat vsestranske uporabe vode so odpadne vode, ki jih narava danes že ne zmore več sama čistiti. Ta problem je najbolj pereč na kraškem svetu, kjer ima voda v prepustnih kamninah praktično neomejeno pot in onesnaženje lahko prodre do podtalnice in prek neznanih kanalov do izvirov, tako da se uničujejo osnovni viri pitne vode.

Še vedno pa le malo poznamo dinamiko penikanja padavinske vode v krasu, poti, po katerih se pretaka od površja skozi kamninske sklade, njeno zadrževanje v podzemlju ter vpliv številnih faktorjev pri kemijskem učinkovanju ob stiku z različnimi snovmi na njeni poti.

## 2. PREGLED PROBLEMATIKE

Kemične in hidrološke lastnosti penikajoče vode so v jamah preučevali Smith in Mead (1960), Raušer, Štelcl, Vlček (1965), Stenner (1966), Pitty (1966), Drew (1968; 1969), Mangin (1975), Gemiti, Merlak (1976) Gams (1967; 1972; 1976), Bakalowicz (1977), Nicod (1977), Bray (1977) in drugi.

Večinoma so merili temperaturo, pretok in pH vode, določevali trdoto vode, prosti CO<sub>2</sub> ter nekatere druge elemente. Z raziskovanjem kemijskega ravnotežja v sistemu voda-zrak (CO<sub>2</sub>) – karbonat so se ukvarjali predvsem Roques (1962; 1964; 1969; 1972; 1973), Thraillkill (1976), Miserez (1973; 1975) in Picknett (1976).

Na območju Postojnske jame je I. Gams z meritvami kemijskih in hidroloških lastnosti skušal osvetliti dinamiko in faktorje korozijske intenzitete, kot tudi izločanje apnenca v jami. Na osnovi njegovih zaključkov in naših prvih orientacijskih meritev smo sklepali, da morajo na intenzivnost korozije vplivati številni faktorji: količina, oblika in intenziteta padavin, hitrost in način penikanja, ki se odražajo v pretoku curkov oziroma kapljanju, vegetacija, debelina prsti in količina CO<sub>2</sub> v njej ter kamninska zgradba jamskega stropa. Ti faktorji se med seboj prepletajo, tako da imamo opraviti s kompleksnim sistemom dogajanja.

Zato je smiselno postopno spoznavanje zapletenega sistema na čim bolj enostavnih primerih, kjer lahko spoznamo in uvrednotimo osnovne zakonitosti vertikalnega penikanja in kemijskega dogajanja v krasu.

### 3. OBSEG OPRAVLJENEGA DELA

V letu 1976 smo začeli z mesečnimi meritvami pretoka, temperature, pH, proste ogljikove kisline in trdot prenikajoče vode v Planinski jami. V letu 1977 smo med curki izbrali le tri značilne in tedensko merili zgoraj omenjene količine. Pretok in temperaturo vode curka 1 smo beležili zvezno, kot tudi padavine in temperaturo zraka in tal v globini 30 cm na površju nad Planinsko jamo. Vzporedno smo v Postojnski jami merili pretok in temperaturo kapnice in curkov ter določevali pH in trdote vode. Te meritve smo nadaljevali še v letu 1978 in 1979, tako da smo zaključili dva celoletna ciklusa opazovanj.

V obeh jamah smo začeli tudi z meritvami odlaganja karbonatov. Z merjenjem specifične upornosti vzorcev in karbonatne trdote pa smo skušali ugotoviti njuno medsebojno razmerje. Na površju nad Planinsko jamo smo preučili sestavo rastja in zemljin, reliefne oblike in geološko zgradbo v območju opazovanih curkov.

Način in hitrost prenikanja ter povezavo vodnih poti v jamskem stropu smo skušali bolje spoznati s sledilnim poskusom z uraninom ob suši z umetnim dodajanjem vode ter v naravno namočenih razmerah z injiciranjem uranina in rhodamima FB, prvega v vrtačo in drugega na površju nad curkom 1.

Ker so nam mesečne in kasneje tedenske meritve podale le sezonska nihanja temperature in trdot vode, ne pa tudi nihanja ob naraščanju in upadanju pretoka, smo se odločili za opazovanje vodnega vala. Vodni val smo imenovali reakcijo curka na vsakokratni naliv in obsega naraščanja pretoka do maksimalne vrednosti ter upadanje s približevanjem začasnemu pretoku pred padavinami. Tak vodni val smo analizirali pri curku 1 v Planinski jami.

### 4. IZBIRA VZORCEV IN OPIS VZORČNIH MEST

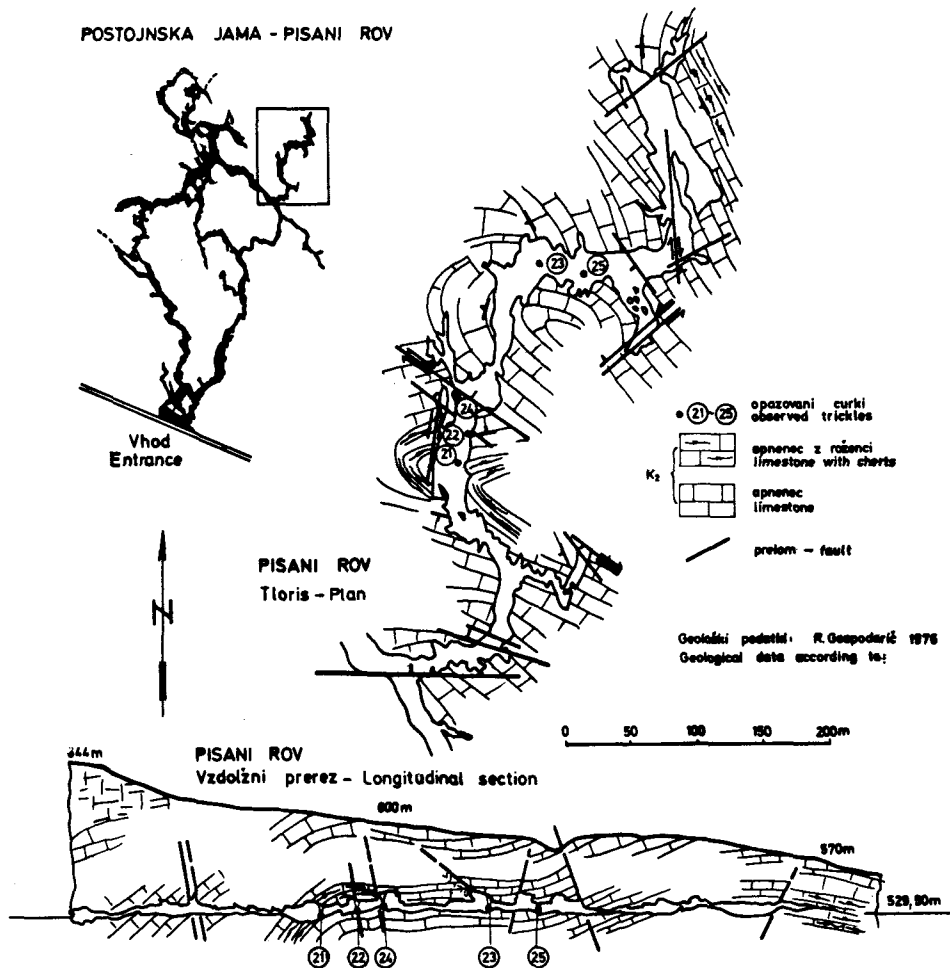
V Planinski jami smo v deževnem obdobju pregledali položaj stalnih in občasni curkov, ki jih podaja slika 1. Temeljiteje pa smo preučili curek 1 blizu vhoda. Na stropu rova je ob prečnem prelomu neizrazit čokast stalaktit, skozi katerega teče voda v curku na sigast podstavek. Odtok vode lahko spremljamo še 10 m do struge Unice. Neposredno nad curkom 1 je 10 m debel skalnat strop. Površje je pokrito z do 50 cm debelo plastjo rjavordeče prsti in tanko plastjo humusa ter poraslo z mešanim gozdom bukve (*Fagus*) in jelke (*Abies*). Neposredno nad jamo je več vrtač, ki so večinoma razporejene ob prelomih. Vhodni del Planinske jame je izoblikovan v spodnje krednih skladovitih apnencih, med katerimi je vložek apnenodolomitne breče. Le-ta je tik nad curkom 1 na površju, nato pa njene plasti vpadajo pod kotom proti SW, tako da jo zasledimo v jami med Sotočjem in Golgoti pri curkih 6, 7 in 8.

Nad Pisanim rovom Postojnske jame je 70–90 m debel strop. Voda priteka v curek 22 ob vzhodni steni po ozkem kaminu ob prelomu. Prelom seka teme antiklinale, ki jo tvorijo turonijski ploščati apnenci z roženci, nad katerimi so neskladoviti in skladoviti radiolitni apnenci (R. Gospodarič 1976). Curek 23 je globlje v rovu. Tam voda kaplja na stalagmit in odlaga sigo po dnu rova. Površje nad Pisanim rovom je pokrito s tanko plastjo rdečerjave kraške ilovice in obraslo z mešanim gozdom. Neposredno nad rovom ni vrtač, Pisani rov pa se odlikuje po kapniškem bogastvu različnih oblik in generacij sige. (sl. 2.).

### 5. METODE DE LA

Na površju nad Planinsko jamo smo s pluviografom zvezno merili količino padavin, s termografom pa temperaturo zraka in prsti v globini 30 cm. Pretok curkov v jami smo

POSTOJNSKA JAMA - PISANI ROV



Sl. 2. Postojnska jama, Pisani rov, položaj opazovanih curkov

Fig. 2. Postojna Cave, Pisani rov, the situation of experimental trickles

merili z menzuro in štoparico. Le pri curkih 1 in 6 v Planinski jami smo kasneje zvezno merili pretok, temperaturo vode in zraka. Temperaturo vode smo sicer določali s termometrom na desetinko stopinje natančno.

Vodnim vzorcem smo v laboratoriju določevali:

- pH elektrometrično s pH-metrom,
- električno upornost elektrometrično s konduktometrom,
- karbonatno, kalcijevo in magnezijevo trdoto titrimetrično po standardnih postopkih.

Izločanje karbonatov iz kaplajoče vode in curkov smo ugotavljali z razlikami v karbonatni trdoti in električni upornosti vode med dvema ali več zaporedno ležečimi vzorčnimi mesti. Vzorcem zemljin s površja nad vhodnim delom Planinske jame smo določevali vsebnost: vlage, organskih snovi, karbonatov, v vodi topnih nitratov, kloridov, fosfatov in sulfatov ter pH, barvo in zrnavost.

Preden smo izvedli sledilna poskusa v Planinski jami, smo preučili površje in geološko zgradbo nad curkom 1 ter skušali oceniti območje, od koder se voda steka v ta curek. Pri prvem sledilnem poskusu v sušnem obdobju smo zvrtili v ilovnatem dnu izbrane vrtače nad curkom 1 več vrtin. V najglobljo med njimi (3,5) smo vtili koncentrirano raztopino uranina (1,78 kg v 50 l vode) in jo zalili s 14 m<sup>3</sup> vode (2 krat po 7 m<sup>3</sup> v 90 minutah). Vzorčevali smo curek 1 in druge curke v bližini.

Drugi sledilni poskus z uraninom in rhodaminom FB smo izvedli v naravnih pogojih v deževnem obdobju. V že omenjeno vrtačo smo vtili raztopino uranina (315 g v 20 l vode), po površju nad samim curkom pa raztopino rhodamina FB (260 g v 30 l vode). Takoj po vlitju barve smo začeli z rednim vzorčevanjem in merjenjem pretokov curkov v neposredni bližini curka 1, kot pri prvem sledilnem poskusu ter opazovali izvir X v strugi Unice. Fluorescenco zajetih vzorcev so nam določali na ZVS, Hidrologija (ing. M. Z u p a n) v Ljubljani s spektrofluorimetrom Perkin Elmer 204. Uporabljeni barvili se pri določevanju med seboj ne motita (H. B e h r e n s, M. Z u p a n, M a r t i n a Z u p a n 1976).

Ob opazovanju vodnega vala smo v jami zvezno beležili pretok curka 1 in zajetim vzorcem vsako uro določevali v laboratoriju po že omenjenih postopkih karbonatno trdoto, električno upornost, pH ter količino suspendiranih snovi s tehtanjem osušenega (105°C) suspenza. Količina vode, ki je v času vodnega vala pritekla skozi curek 1 smo določali planimetrično iz zvezne krivulje pretoka. Na enak način smo določili celoletno količino vode, ki je pritekla v jamo skozi curek 1.

## 6. REZULTATI IN DISKUSIJA

### 6.1. NAČIN VERTIKALNEGA PRENIKANJA VODE

Prenikanje vode skozi 100 m debel jamski strop je zelo različno. Na mnogih mestih kapljajo s stropa le posamezne kapljice in pretok se v teku leta malo spreminja. Tako kapljanje lepo ponazarjajo stalagmiti in stalaktiti v Pisanem rovu Postojnske jame. V aktivni vodni Planinski jami je takih oblik manj, pogostejši pa so izdatnejši vodni curki, ki bolj nihajo v pretoku in jih označujejo večje sigaste kope ali bolj izprana tla. Navezani so na izrazitejše razpoke in prelome. Pri stalnih curkih smo med minimalnim in maksimalnim pretokom opazili precejšnje razlike. Pretok manjših curkov manj niha, večjih pa znatno bolj, kar je razvidno iz tabele 1:

Tabela 1 - Table 1

Curek	23	22	8	1	6	
Q min	0,05	0,03	0,5	1,8	12	1 h <sup>-1</sup>
Q max	6	55	60 <sup>1</sup>	1350(12000) <sup>2</sup>	1620(15000) <sup>2</sup>	1 h <sup>-1</sup>

<sup>1</sup> celotnega pretoka ni mogoče meriti

<sup>2</sup> registrirani maksimalni pretoki



Poleg stalnih curkov pa imamo tudi občasne, ki so aktivni ob dežju, ali pa presahneje šele pod daljšem sušnem obdobju.

Prve občasne meritve pretoka curkov v Planinski jami in zvezne registracije padavin na površju so pokazale le grobo medsebojno odvisnost. Kasnejša zvezna registracija pretoka curka pa je podala točno sliko nihanja pretoka in omogočila izračun hitrosti reagiranja pretoka v jami na padavine. Curki ne reagirajo vedno enako na padavine, kar je odvisno od vremenskih razmer, temperature zraka in prsti, količine, intenzivnosti in oblike padavin ter vegetacijskih razmer. Pri curku 1 je vplivalo na spremembo pretoka v namočenem obdobju že 5 mm padavin, po daljšem sušnem obdobju pa je pretok narasel šele, ko je skupna vsota občasnih padavin preseгла 70 mm.

Dvoletni potek padavin in pretoka podajata sliki 3 in 4. Padavine se po letih znatno razlikujejo po razporeditvi in količini. V obdobju 1977/78 je padlo 1889 mm, v obdobju 1978/79 pa 2237 mm padavin. Podobne razlike se kažejo tudi v letnem poteku pretokov.

Največje spremembe v pretokih so v času vodnih valov. Izgleda, da vpliva na oblikovanje minimalnega vodnega vala različna količina in intenzivnost padavin, odvisno od začetnega pretoka curka v jami, oziroma zapoljenosti neznanega »rezervoarja« v stropu jame. Posebne razmere v pretokih curkov vladajo v zimskem obdobju, ko na površju leži sneg in občasno nastopajo zmrzali in odjuge.

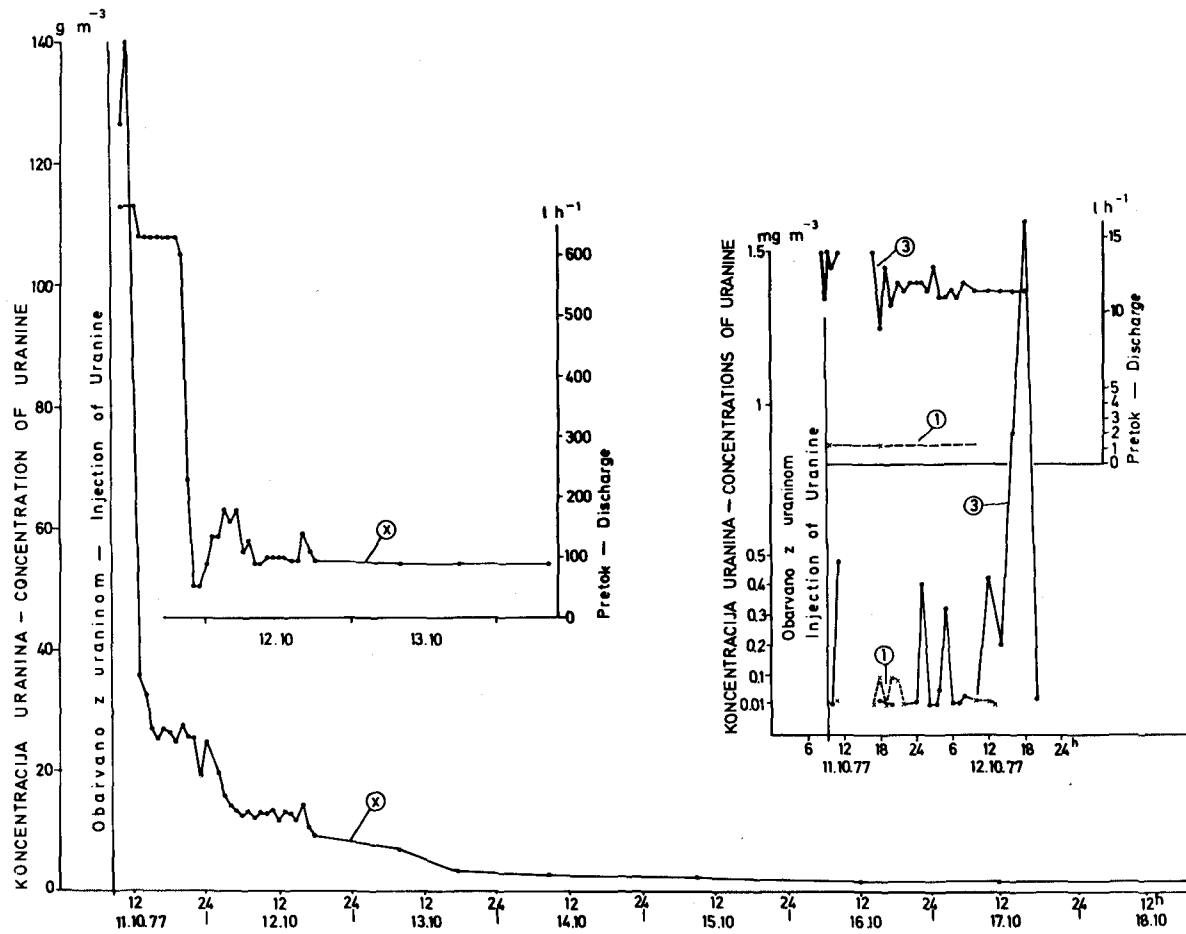
Ker opazovanja in meritve curkov niso dale dovolj podrobnega vpogleda v način in hitrost prenikanja vode skozi jamski strop Planinske jame, smo izvedli dva sledilna poskusa. Pri prvem sledenju se je pojavil uranin v izviru X ob strugi Unice, približno dve uri po vlitju uranina in prve cisterne vode, kar da slutiti, da gre za dokaj direktno povezavo vrtače s tem izviro. Vodna pot pa je verjetno še vedno sestavljena iz številnih med seboj povezanih vodnikov, ki na različne načine napajajo izvir X. To dokazujejo počasen odtok vlite vode (dobre 3 dni), sekundarni impulzi koncentracije barvila in pretoka izvira X ter pojav barve v curkih 1 in 3 (sl. 5).

Drugo sledenje v naravno namočenih razmerah je potrdilo ugotovitve prvega poskusa. Čeprav dva dni po vlitju uranina ni bilo dežja, se je izvir X obarval že 9 ur po vlitju barve, kar nakazuje znatno počasnejše pretakanje v sušnem obdobju kot v namočenem. Curek 3 se je obarval že dobro uro po začetku dežja, ko je padlo ~ 10 mm padavin, to je skoraj 2 dni po vlitju barve. To kratkotrajno obarvanje se je ponovilo še po končanem vodnem valu. Sklepamo, da je prišlo zaradi povečanja pretoka do močne razredčitve in je koncentracija uranina padla pod mejo detekcije. Pri curku 1 je naraščanje in nato upadanje pretoka curka oblikovalo vodni val, medtem ko barve nismo zaznali, kar je verjetno vzrok v majhni količini vlitega uranina in veliki količini pretekle vode skozi ta curek. Ker pri prvem sledilnem poskusu pri curkih 1 in 3 ni prišlo do povečanja pretoka, zaznali pa smo obarvanje, sklepamo, da obstaja povezava med vrtačo in curki, vendar pa mora odtekat voda v tej smeri v zelo majhni količini. Torej se curka 1 in 3 v pretežni meri napajata izven območja vrtače (sl. 6).

Rhodamin FB smo določili v izviru X in curku D, vendar se je pojavil le kratek čas in blizu meje detekcije, tako da ne moremo napraviti kakršnihkoli zaključkov.

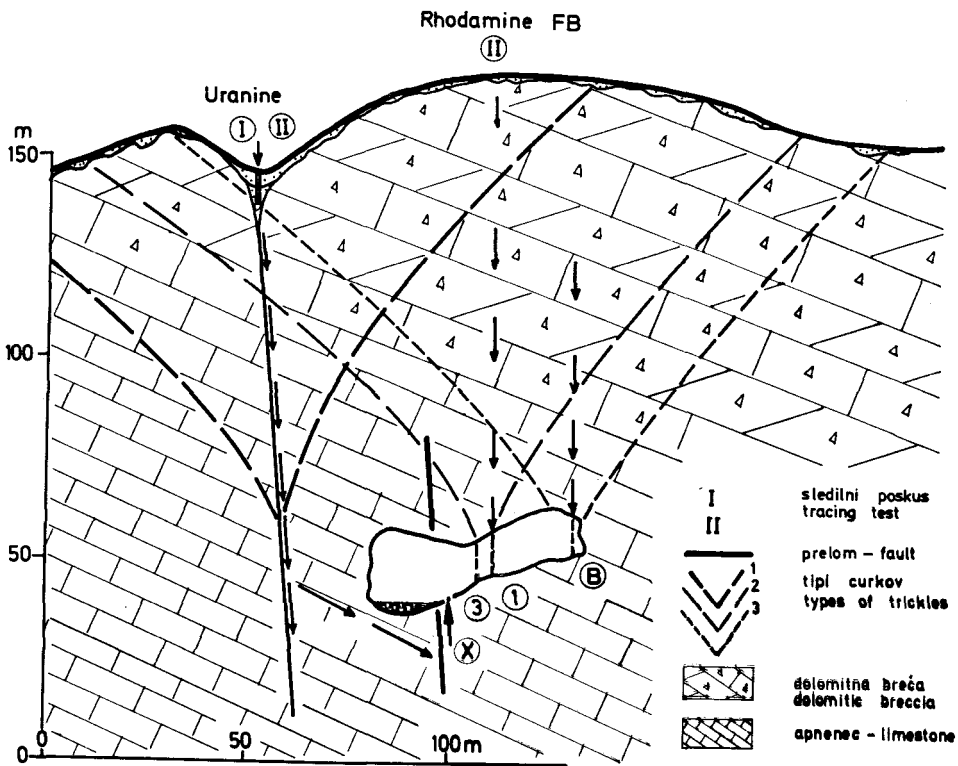
## 6.2. KEMIJSKO UČINKOVANJE PRI VERTIKALNEM PRENIKANJU VODE

Analiza deževnice, ki je v okviru natančnosti titrimetrične določitve brez trdote, je pokazala, da vsebuje  $1 \text{ mg l}^{-1} \text{ Cl}^{-}$  in  $4,3 \text{ mg l}^{-1} \text{ NO}_3^{-}$ , koncentraciji  $\text{SO}_4^{2-}$  in  $\text{PO}_4^{3-}$  pa sta bili pod mejo detekcije. Deževnica prenika skozi plast zemljin, ki jo sestavljajo: tanka plast humusa, rjava prst, rumena glina, rdečkasta glina in razpadla skala s primesmi gline s površine kamninske osnove. Te plasti vsebujejo do 0,03 % kloridov, pod 0,005 % nitratov in pod 0,0001 % fosfatov. Humus in rjava prst vsebujeta približno 50 % nekarbonatnega peska, gli-



Sl. 5. Rezultati sledenja vertikalnega prenikanja pri curku 1 v Planinski jami 1977

Fig. 5. The results of vertical percolation tracing at trickle 1 in Planina Cave in 1977



Sl. 6. Tipi curkov v prečnem prerezu Planinske jame

Fig. 6. Trickle types in cross-section of Planina Cave

ne, predvsem melj, le vzorec razpadajoče skale vsebuje 72% karbonatov. Verjetno ta material v znatni meri prispeva k dvigu vrednosti karbonatov v prenikajoči vodi. Od površja v notranjost pH narašča; humusu smo določili pH = 5,5, rdečkasti glini pa pH = 7,7.

Kemijska sestava prenikajoče vode zavisi od načina prenikanja ter od številnih snovi, s katerimi pride na svoji poti v stik in jih lahko raztaplja. Na hitrost raztapljanja apnenca vpliva tudi njegova tekstura. Drobnozrnati se v splošnem hitreje raztaplja kot grobozrnati. Tekstura vpliva na pozornost, ta pa je sorazmerna topnosti apnenca (M. M. Sweeting 1976).

Vsi opazovani curki imajo pretežno karbonatno in kalcijevo trdoto in le do 8% magnezijeve trdote, razen vode curka 1 v Planinski jami, ki vsebuje do 35% magnezijeve trdote. Ta voda penika najprej skozi debelejšo plast apnene dolomitne breče, ki v notranjost tako vpada, da voda drugih curkov v jami penika predvsem skozi debelo-skladoviti apnenec, zato vsebuje njihova voda nizko magnezijevo trdoto. Topnostni produkt za  $MgCO_3$  je znatno večji ( $2,6 \cdot 10^{-5}$  pri  $12^\circ C$ ) kot za  $CaCO_3$  ( $0,99 \cdot 10^{-8}$  pri  $15^\circ C$ ), kar tudi pojasnjuje večjo koncentracijo Mg v vodi curka 1.

Vrednosti tedenskih meritev pH nihajo preko leta do 0,5 enote in nismo mogli ugotoviti nobenih odvisnosti s trdoto vode (sl. 7 in 8 v prilogi, enako kot sl. 4).

Primerjava celoletnega poteka temperatur zraka na površju, tal v globini 30 cm ter zraka in prenikle vode v Planinski jami je pokazala zmanjševanje amplitud nihanja temperature od površja proti notranjosti jame. Tako vidimo, da se padavinska voda pri prenikanju s površja proti notranjosti jame v topli polovici leta ohlaja, v mrzlem obdobju pa segreva. Tedenske, kot tudi mesečne meritve temperatur in trdot vode curkov v Planinski jami dokazujejo njihovo sezonsko nihanje, le da trdote zaostajajo za temperaturami za dober mesec (sl. 7 in 8). Količina raztopljenih karbonatov zavisi od načina pretakanja vode po razpoložljivih poteh in količine CO<sub>2</sub>, ki ga raztaplja predvsem na svoji poti skozi zemljine. Koncentracija CO<sub>2</sub> v le-teh je odvisna od razvoja vegetacije oziroma temperatur na površju.

Del organskih snovi v tleh se hitro mineralizira, del pa se humificira in razpade šele v teku let ali desetletij. Mineralizacijo pospešujejo tudi pogoste navlažitve in osušitve tal. Laboratorijski poskusi mineralizacije so pokazali, da navlaženju sledi relativno močno razvijanje CO<sub>2</sub>. Po treh mesecih pa se koncentracija CO<sub>2</sub> ustali na določeni značilni vrednosti za posamezne vrste tal (P. Schachtschabel, H. P. Blume, K. H. Hartge, U. Schwertmann 1976).

Najvišje trdote smo zabeležili septembra, oktobra in novembra, ko se končuje obdobje rasti, kot tudi daljše sušno obdobje z minimalnim spiranjem skozi jamski strop. S časom, ki je potreben za mineralizacijo odmrle vegetacije in za učinkovanje nastalega CO<sub>2</sub> s padavinsko vodo in kamninami v jamskem stropu, bi lahko nekako pojasnili zakasnitev porasta in upada trdot za porastom in upadom temperatur. Pri tem pa moramo upoštevati še možnost zadrževanja prenikajoče vode v »rezervoarju« jamskega stropa.

V letih opazovanja (1977/78 in 1978/79) smo zabeležili razlike med minimalnimi in maksimalnimi temperaturami in trdotami vode curka 1, kot tudi razlike v letnem poteku temperature oziroma trdot, kar je verjetno posledica drugačnih vremenskih razmer v obeh letih (tabela 2 in sl. 7 in 8).

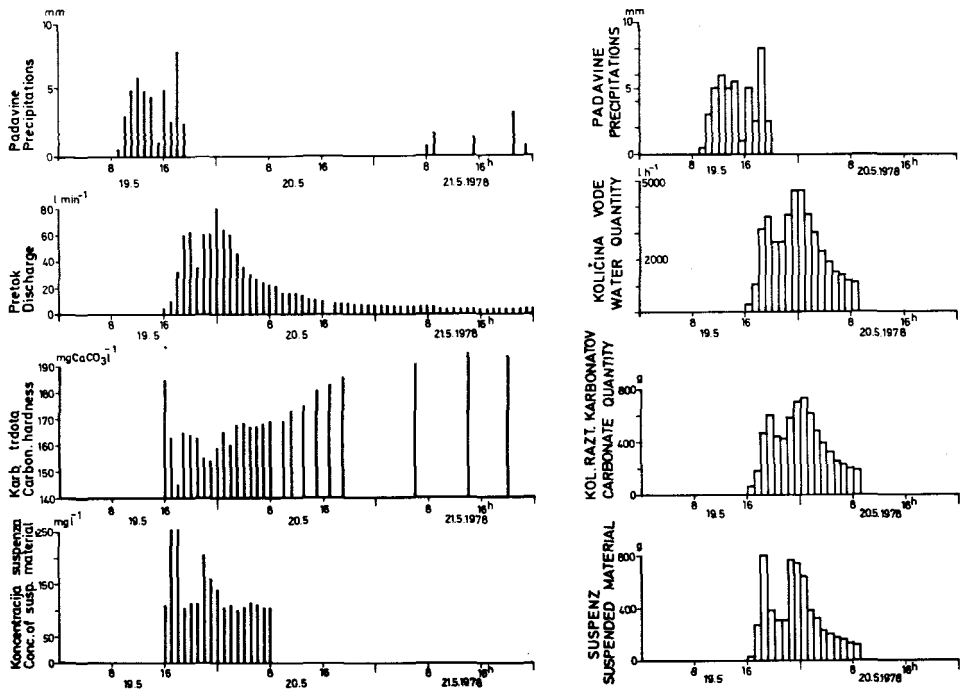
Tabela - Table 2

	T min	T max	Karbonatna trdota min	max	Celokupna trdota min	max
1977/78	6,1	12,6	170	259	185	263
1978/79	7,4	12,0	160	240	170	265
	°C		mg CaCO <sub>3</sub> l <sup>-1</sup>			

Temperature curkov 21 in 23 v Pisanem rovu so skoraj stalne (7,9–8,3°C), kot tudi karbonatne trdote (165–200 mg CaCO<sub>3</sub> l<sup>-1</sup>), ki za razliko od curkov v Planinski jami ne kažejo sezonskih nihanj. Vzrok je verjetno v načinu pretakanja. V Planinski jami pogojujejo precej direkten odtok prelomi in razpoke, v Pisanem rovu pa gre verjetno za močno dušenje pretoka skozi manj razpokane kamnine.

### 6.3. Vodni val

Iz slike 9 je razvidno, da je neenakomeren naliv, ko je v 10 urah padlo 45 mm padavin, sprožil s 6-urno zakasnitvijo pri curku 1 v jami vodni val. Ta je po 4 urah dosegel svoj prvi višek (63 l min<sup>-1</sup>). Pojemanju padavin je sledilo zmanjšanje pretoka, ponovnemu intenzivnejšemu dežju pa drugi višek (80 l min<sup>-1</sup>). Potek prvega viška je dokaj skladen s pretokom padavin, kar pa ne velja za drugi višek. To si razlagamo kot postopno zapolnjevanje in zadrževanje vode v »rezervoarju« jamskega stropa, ki je verjetno odvisno od narave posameznih, zelo različnih elementov celotnega spleta povezav dovodnih poti curka 1.



Sl. 9. Podatki o vodnem valu

Fig. 9. Data about the water pulse

Tudi enakomeren upad vodnega vala, ko so padavine že prenehale, in zakasnitev reakcije pretoka na padavine si lahko razložimo s prisotnostjo »rezervoarja«.

Ob začetnem naraščanju pretoka je karbonatna trdota upadala in ob upadanju vodnega vala naraščala (od 145 do 195 mg CaCO<sub>3</sub> l<sup>-1</sup>). V vmesnem delu vodnega vala pa smo opazili odklon od tega poteka, ki verjetno odraža nihanje pretoka in mešanja vode v že omenjeni zgradbi »rezervoarja«.

Pri poskusu smo ugotovili, da voda curka 1 prinaša tudi suspendiran material, ki pri običajnem tedenskem vzorčevanju ni bil skoraj nikoli viden, vzorci so bili le občasno motni. Zato smo sklepali, da voda prinaša zelo majhne količine suspenza. Vsakournna merjenja suspenza, ki ga voda prinaša v jamo, pa kažejo naraščanje koncentracije suspenza (do 255 mg l<sup>-1</sup>) ob naraščanju pretoka, ko ima voda večjo erozijsko moč. Slika 9 prikazuje tudi urne količine prenikle vode, raztopljenih karbonatov in suspenza. Na količino odnešenih karbonatov vpliva predvsem količina vode, medtem ko je vpliv karbonatne trdote manjši. Časovni potek odnešenih karbonatov je skladen s pretoki vodnega vala. Za transport suspenza pa je odločilnega pomena koncentracija suspenza kot pa količina vode.

V srednjem delu vodnega vala, ki obsega 17 ur, je preteklo skozi curek 1 42 m<sup>3</sup> vode, 6,8 kg raztopljenih karbonatov in 5,9 suspendiranega materiala. V vodnem valu sta torej korozija in erozija približno enakovredni.

#### 6.4. RAZMERJE MED TRDOTO IN PRETOKOM

Odvisnost karbonatne trdote in količine odnešenih karbonatov od pretoka prikazuje slika 10.

Urni podatki v vodnem valu curka 1 podajajo dvojno odvisnost karbonatne trdote od pretoka. Ob naraščanju pretoka nismo mogli določiti natančnejše matematične odvisnosti zaradi premajhnega števila podatkov. Razmerje med trdoto in pretokom ob upadanju vodnega vala pa podaja enačba:

$$H = k \frac{1}{Q_v} + H_0 \quad \text{oz.} \quad H = 214,8 \frac{1}{Q_v} + 158,7 \quad (r = 0,9997) \quad 2$$

$H$  – karbonatna trdota (v mg  $\text{CaCO}_3 \text{ l}^{-1}$ )

$k$  – koeficient upadanja ( $\text{mg min}^{-1}$ )

$Q_v$  – pretok ( $\text{l min}^{-1}$ )

$H_0$  – začetna trdota – trdotni prag (v mg  $\text{CaCO}_3 \text{ l}^{-1}$ )

$r$  – koeficient korelacije

Razmerje med karbonatno trdoto in pretokom ob upadanju pretoka curka 1 v vodnih valih po tedenskih meritvah v teku leta pa podaja funkcija:

$$H = 25,838 \frac{1}{Q_v} + 192,0 \quad (r = 0,998) \quad 1$$

Enako smo izračunali tudi za curek 6:

$$H = 28,44 \frac{1}{Q_v} + 126,2 \quad (r = 0,9915)$$

Obe funkciji (za curek 1 in 6) imata podoben potek, razlikujeta se le v začetni trdoti. Funkcija 1 združuje neko povprečno dogajanje ob upadanju pretoka na osnovi tedenskih meritev prek leta.

Funkcija 2 podaja potek dogajanja ob upadanju vala, dogajanje ob naraščanju pretoka pa bo potrebno še podrobneje preučiti. Pri opazovanem vodnem valu oblikujeta krivulji ob naraščanju in upadanju pretoka histerezno zanko.

Količine odnešenih karbonatov v času, ki smo jih izračunali na osnovi karbonatnih trdot in pretoka, so linearno odvisne od pretoka. Ob upadanju vodnega vala jih lahko izrazimo s funkcijo:

$$Q_m = k \cdot Q_v + Q_{m0} \quad \text{oz.} \quad Q_m = 0,1587 Q_v + 0,2148 \quad (r = 0,9997) \quad 3$$

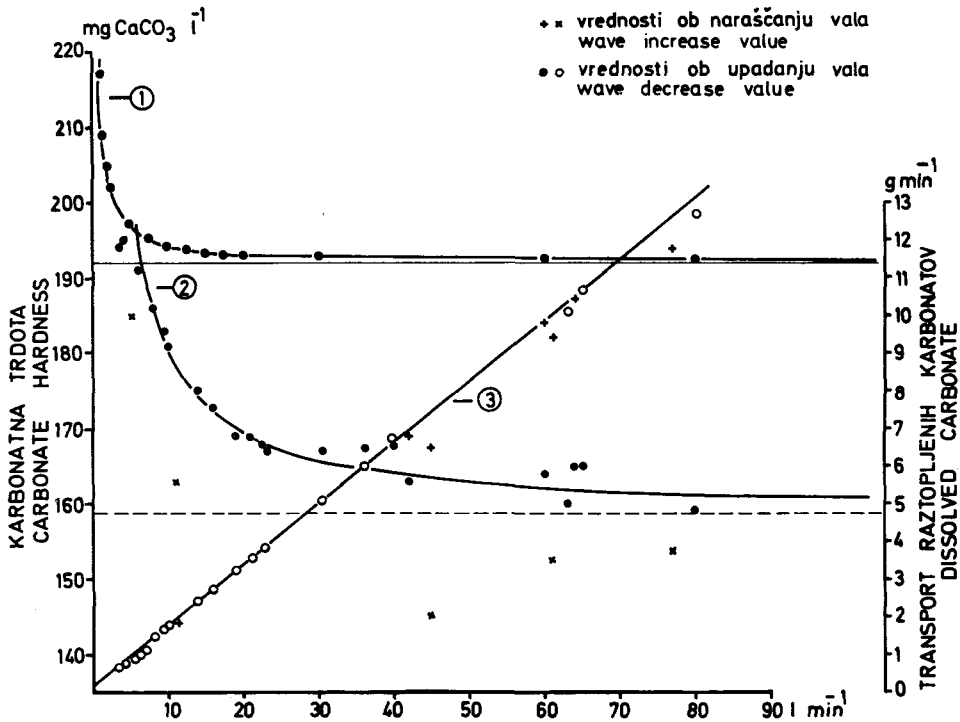
$Q_m$  – pretok raztopljenih karbonatov ( $\text{g min}^{-1}$ )

$Q_v$  – volumski pretok ( $\text{l min}^{-1}$ )

$k$  – sorazmernostni koeficient ( $\text{g l}^{-1}$ )

$Q_{m0}$  – konstanta ( $\text{g min}^{-1}$ )

Ob naraščanju pretoka je opaziti manjše odklone od tega linearnega poteka.



Sl. 10. Razmerje med pretokom in trdoto vode ter raztopljenimi karbonati

Fig. 10. The rate between discharge and water hardness and dissolved carbonates

6.5. LETNE KOLIČINE PRETEKLE VODE IN ODNEŠENIH KARBONATOV

Za curek 1, 6, 22 in 23 smo za obdobje 1977/78 izračunali celoletne količine prenikle vode in raztopljenih karbonatov na osnovi tedenskih meritev pretoka in trdot (tabela 3).

Tabela 3 - Table 3

Curek	1	6	22	23	
Količina vode	1500	1600	57	13	m <sup>3</sup>
Količina karbonatov	310	232	6	2	kg

Ker so bile te meritve pretežno ob nizkih in srednje velikih pretokih, sklepamo, da so dobljene vrednosti prenizke. Te meritve namreč niso zajele višjih pretokov vodnih valov. Natančnejše količine smo izračunali za curek 1, kjer smo zvezno beležili pretok. Tako izmerjena letna količina vode znaša 1900 m<sup>3</sup>. Na podlagi te količine vode in njene poprečne letne karbonatne trdote smo izračunali količino odnešenih karbonatov, ki jih voda raztopi pri prenikanju skozi jamski strop.

Tabela 4 podaja letne količine za leti 1977/78 in 1978/79.

Tabela 4 - Table 4

Leto	Količina vode	Količina raztopljenih karbonatov	Padavine
1977/78	1900 m <sup>3</sup>	380 kg	1890 mm
1987/79	2000 m <sup>3</sup>	430 kg	2240 mm

Iz teh vrednosti smo ocenili zbirno območje vode, ki se steka v ta curek, na okrog 1000 m<sup>2</sup>. Povprečna letna korozijska intenziteta znaša tedaj 148 m<sup>3</sup> km<sup>-2</sup> in je več kot enkrat višja od poprečne vrednosti za Slovenijo (I. G a m s 1972).

Povprečno trdoto smo določili z upoštevanjem tedenskih meritev in vpliva vodnih valov. Če pa bi upoštevali kar tedenske ali celo mesečne vrednosti trdot, bi bile izračunane vrednosti odnešenih karbonatov do 8% višje. V primeru, da bi imeli merjene le tedenske vrednosti pretoka in karbonatne trdote, pa bi bila letna količina odnešenih karbonatov kar za 18% manjša.

#### 6.6. RAZMERJE KARBONATNA TRDOTA - ELEKTRIČNA UPORNOST

Hem (1970), Corbel (1969), Doroschewski in Rodier (1966), Richard in Nguyen Van Lu (1961), ki jih navaja Bakalowicz (1974), govore o linearni odvisnosti med mineralizacijo in električno prevodnostjo. Bakalowicz (1974) je pri povprečni mineralizaciji upošteval ione: HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> in ugotovil, da njeno razmerje z električno prevodnostjo ni enako za vse kraške vode, ampak da vsak sistem določuje njegova geokemična sestava.

Naše vode vsebujejo pretežno karbonatno trdoto, nekaj Cl<sup>-</sup> (1 mg l<sup>-1</sup>) in SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (do 10 mg l<sup>-1</sup>), od kationov pretežno Ca<sup>2+</sup>, nekaj Mg<sup>2+</sup> (do 3 mg l<sup>-1</sup>), razen curka 1 in mikrokoličine Na<sup>+</sup> (< 1000 ppm) in drugih kovin (Fe, Al...).

Študirali smo razmerje karbonatna trdota - električna upornost. Ker karbonatna trdota ne zajema celotne mineralizacije vode, nista popolnoma primerljivi, vendar je njuna razlika sorazmerno konstantna. Predpostavili smo različne funkcije odvisnosti in z metodo najmanjših kvadratov preizkušali njihovo ustreznost. Izkazalo se je, da za manjše število točk najbolj ustreza logaritmčna porazdelitev.

$$\ln H = - 1,063 \ln R + 4,45 \quad r^2 = 0,952$$

H - karbonatna trdota (mg CaCO<sub>3</sub> l<sup>-1</sup>) - območje 100 - 220 mg CaCO<sub>3</sub> l<sup>-1</sup>  
R - električna upornost (KΩ)

Za vse meritve od 10/4-1978 dalje pa smo dobili:

$$\ln H = - 0,951 \ln R + 4,511 \quad r^2 = 0,902$$

Tudi linearna funkcija se precej dobro približuje razporeditvi naših točk, vendar slabše kot logaritmčna. Za omejeno število točk smo dobili:

$$H = - 244,9 R + 298,3 \quad r^2 = 0,919$$



## 6.7. IZLOČANJE KARBONATOV

Izločanje karbonatov smo merili v Pisanem rovu in Planinski jami.

V Pisanem rovu je temperatura kapnice praktično konstantna ( $\sim 8^\circ\text{C}$ ) in se tudi pri polzenju po zasigani poti ne spreminja – torej temperatura tu ne vpliva na izločanje karbonatov. Opazili pa smo vpliv pretoka vode. Višji pretoki zmanjšujejo izločanje, vendar nismo ugotovili njunega odnosa. Verjetno pa tu nastopajo še drugi vplivi (višina koncentracije karbonatov v vodi itd.), ki jih do sedaj še nismo uspeli določiti. V Pisanem rovu se je izločalo iz vode do  $75\text{ mg CaCO}_3\text{ l}^{-1}$ .

V Planinski jami so razmere bolj zapletene. Kapnica curka 1 se je na svoji poti po jamskem dnu, kjer smo merili izločanje, od novembra do aprila ohlajala (do  $4^\circ\text{C}$ ). Ker topnost  $\text{CaCO}_3$  z naraščajočo temperaturo, pri konst.  $\text{P CO}_2$ , pada (P i c k n e t t 1976), ohlajanje vode v našem primeru zavira izločanje karbonatov. Višjim temperaturam kapnice sledijo z manjšo zakasnitvijo ( $\sim 1$  mesec) tudi karbonatne trdote (od avgusta do decembra), ko smo opazili večje izločanje. Hkrati pa se kaže vpliv padavin, ki se odraža v večjih pretokih in zelo skromnem izločanju. Voda opazovanega curka vsebuje do 35 % magnezijeve trdote, vendar smo ugotovili, da se iz vode izloča predvsem  $\text{CaCO}_3$ , magnezij pa le neznatno, kar je vzrok v večjem topnostnem produktu  $\text{MgCO}_3$  v primerjavi s  $\text{CaCO}_3$ .

## 7. SKLEPI

Prenikanje vode skozi jamski strop je zelo različno. V Pisanem rovu večinoma enakomerno kapljajo s stropa le posamezne kapljice, ki gradijo kapniške oblike, v Planinski jami pa imamo izdatnejše vodne curke, ki močno nihajo v pretoku in so navezani na izrazitejšje razpoke in prelome. Minimalni in maksimalni pretoki različnih curkov so lahko v razmerju 1 : 100 do 1 : 1000 ali celo 1 : 5000.

Pretok curkov je odvisen od razpokanosti in zakrasedlosti kamnin, obsega drenažnega sistema ter intenzivnosti in količine padavin. Sistem povezav vodnikov padavinske vode, ki napajajo curek, nam je še vedno le malo znan in iz dobljenih rezultatov lahko sklepamo, da je drenažni sistem curka sestavljen iz številnih, različno prepustnih vodnikov oziroma »rezervoarja«, kjer se voda lahko tudi zadržuje. Drenažni sistemi pa se med seboj še prepletajo. Na letno izdatnost curka pa vpliva tudi obseg drenažnega sistema, zato so letne količine vode različnih curkov lahko celo v razmerju 1 : 100. V tem vidimo bistvo razčlenjevanja kraškega površja.

Temperatura prenikle vode in njene trdote pri curkih z večjo oscilacijo pretoka prek leta sezonsko nihajo, le da trdote zaostajajo za temperaturami za dober mesec. Od leta do leta pa so opazne razlike v tem poteku, kar je odraz drugačnih vremenskih razmer. V Pisanem rovu so nihanja trdot znatno manjša. Na raztapljanje karbonatnih kamnin vpliva  $\text{CO}_2$  v prsti, kjer ga padavinska voda raztaplja.

Sele zvezna opazovanja in podrobno spremljanje vodnega vala pa je podalo pravo sliko dogajanja, ki je osnovni element dogajanj tekom leta. Tu smo opazili, da prinaša voda v jamo poleg kemično raztopljenega tudi suspendiran material in da imamo tako na površju in stropu jame dva različna doprinosa k zakrasedanju.

Korozija in erozija sta predvsem odvisni od količine prenikajoče vode. Količina padavin in razlike v prepustnosti kamnin zato bistveno vplivajo na razčlenjevanje kraškega površja. Tako je npr. nad Planinsko jamo kraška denudacija znatno učinkovitejša v območju drenažnega sistema vrtač kot pa v predelu med vrtačami.

Opazovani vodni val je pokazal, da sta erozija in korozija ob nalivih enako učinkoviti. Takrat je  $42\text{ m}^3$  vode v 17 urah raztopilo skoraj 7 kg karbonatov in prineslo v jamo 6 kg suspenza. Celoletni izračun za ta curek pa znaša  $\sim 2000\text{ m}^3$  prenikle vode in 400 kg raz-

topljenih karbonatov. Ocena površine, s katere se steka ta voda, pa je okoli 1000 m<sup>2</sup>. Količina odnešenih karbonatov (masni pretok) je linearno odvisna od volumenskega pretoka.

Razmerje med pretokom in karbonatno trdoto podaja ob upadanju pretoka hiperbolična funkcija.

Razmerje med karbonatno trdoto in električno upornostjo je za vsak sistem specifično in ga bolje podaja logaritična funkcija kot linearna.

Izločanje karbonatov je v veliki meri odvisno od režima in pretoka, poleg tega pa so pomembni še drugi vplivi, ki jih še nismo uspeli podrobneje opredeliti. V posameznih curkih je delež karbonatov, ki se izločajo, zelo različen. Pri nekaterih curkih v opazovanem obdobju sploh nismo ugotovili izločanja, pri drugih le občasno, pri nekaterih pa se karbonati izločajo vse leto. Pri teh se je že na kratki razdalji v jami izločalo od 0 do 40 % karbonatov, predvsem CaCO<sub>3</sub>, medtem ko se MgCO<sub>3</sub> izloča v precej manjši meri. Temu je vzrok večji topnostni produkt za MgCO<sub>3</sub> v primerjavi s CaCO<sub>3</sub>.

Trdote kraških izvirov so potemtakem rezultat zelo različno intenzivnega raztapljanja in izločanja karbonatov, pretoki pa seštevke mnogih zelo različnih curkov prenikajoče vode.

### Summary

#### THE STUDY OF VERTICAL WATER PERCOLATION IN THE CASE OF POSTOJNA AND PLANINA CAVES

Three years we studied on the chosen experimental area of Planina and Postojna (Pisani rov) Caves the vertical water percolation of precipitations and chemical events on its way from the surface through karstified limestone in the underground.

On the surface the air and soil temperatures and precipitations were continuously registered; in the cave we have monthly, later weekly, while at trickle 1 continuously registered water temperature and discharge. In the laboratory pH and hardnesses were defined. Two water tracings with fluorescent dyes were done, water pulse was observed, geological structure of the cave roof and of the surface above the cave were studied.

From obtained results we can conclude that the drainage system of the observed trickle 1 is composed by several, differently pervious conductors, 'storages' respectively, where the water could be retained. The drainage systems of neighbour trickles are mixed with the others.

Minimal and maximal discharges of different trickles occur in the rate 1:100 up to 1:1000 or even 1:5000. The extent of drainage system influences to annual trickle capacity therefore the annual water quantities of different trickles can occur in the rate 1:100. This seems to be the essential property of karst surface dissection.

In the Planina Cave the temperatures of percolating water and its hardnesses seasonally oscillate and the lapse of their curves changes from year to year; in Pisani rov the hardness oscillations are considerably smaller being possibly the effect of different percolating manners. Continuous registration and detailed observations of water pulse have shown that the water pulse presents the basic process during the vertical water percolation. We saw that the water transports into the cave chemically dissolved and suspended material. In observed water pulse at trickle 1 the corrosion and erosion were equally efficient, as 42 m<sup>3</sup> of water dissolved almost 7 kg of carbonates and transported into the cave almost 6 kg of suspended load. The annual quantity for the period 1977/78 amounts for trickle 1 to 1900 m<sup>3</sup> of percolating water and 380 kg of dissolved carbonates; the surface being estimated to 1000 m<sup>2</sup>, giving annual corrosion intensity of 148 m<sup>3</sup>km<sup>-2</sup>.

On the base of calculated rate between carbonate hardness and discharge during discharge decrease in the water pulse and in all registered water pulses during the year we got the hyperbolic function dependency.

$$H = k \frac{1}{Q_v} + H_0$$

By the same way was calculated that the quantity of transported carbonates presents linear function of volume discharge

$$Q_m = k \cdot Q_v + Q_{mo}$$

Thus there are two different processes influencing to karstification: chemical solution and mechanical transport, both extremely depending on quantity of percolating water.

The rate between carbonate hardness and electrical resistivity is specific for each system and is better presented by logarithmical than by linear function.

The carbonate precipitation extremely depend on régime and discharge, but there are still other influences which are not yet defined in detail.

Consequently the karst sources hardnesses result from different intensive solution and carbonate precipitation, while the discharges present the sum of several, sharply different trickles of percolating water.

### Literatura

- Bakalowicz, M., 1974: Géochimie des eaux d'aquifères karstiques. Relation entre minéralisation et conductivité. *Annales de Spéléologie* 29/2, 167-173. Paris.
- Bakalowicz, M., 1977: Relation entre la dynamique des eaux du karst et les procès de karstification. *Proc. of the 7th International Congress of Speleology*, 10-12. Sheffield.
- Behrens, H., Martina Zupan, M. Zupan, 1976: Methodik und Ergebnisse der Direktmessung der Fluoreszenztracer. *Steirische Beiträge zur Hydrogeologie*, 125-149. Graz.
- Bray, L.G., 1977: The role of organic matter in limestone solution in the Ogoff Ffynnon Ddu Streamway. *Proc. of the 7th International Congress of Speleology*, 65-68. Sheffield.
- Drew, D.P., 1968: Tracing percolation waters in karst area. *Transactions of the CRG* 10(2), 107-114.
- Gams, I., 1967: Faktorji in dinamika korozije na karbonatnih kamninah slovenskega dinarskega in alpskega krasa. *Geografski vestnik* 38, 11-68. Ljubljana.
- Gams, I., 1972: Effect of runoff on corrosion intensity in the northwestern Dinaric karst. *Transactions of CRG* 14(2), 78-83.
- Gams, I., 1976: Variations of total hardness of karst waters in relation to discharge. *Karst processes and relevant landforms*, ISU, 41-59. Ljubljana.
- Germitti, F., E. Merlak, 1976: The influence of the surface ground on the chemical characteristics of the percolating water in karst soils. *Karst processes and relevant landforms*, ISU, 61-70. Ljubljana.
- Gospodarič, R., 1976: Razvoj jam med Pivško kotlino in Planinskim poljem v kvartarju. *Acta carsologica* 7, 5-139. Ljubljana.
- Mangin, A., 1974, 1975: Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. *Annales de Spéléologie*, 1974, 29/3, 283-332; 29/4, 495-601; 1975, 30/1, 21-124. Paris.
- Miserez, J.J., 1973: Géochimie des eaux du karst jurassien. Contribution physico-chimique à l'étude des altérations. Thèse, 1-313. Université, Neuchâtel.
- Nicod, J., 1976: Variation du CO<sub>2</sub> dans les sols. *Karst processes and relevant landforms*, ISU, 27-30. Ljubljana.
- Picknett, R. G., 1973: Saturated calcite solutions from 10-40°C. *Transactions of CRG* 15(2), 67.
- Picknett, R. G., 1976: The chemistry of cave waters. *Iz: The Science of Speleology*, 1-593(213). Academic Press, London.
- Picknett, R. G., 1977: Rejuvenation of aggressiveness in calcium carbonate solutions by means of magnesium carbonate. *Proc. of the 7th International Congress of Speleology*, 346. Sheffield.
- Picknett, R. G., 1977: Foreign substances and calcite solubility in carbonated waters. *Proc. of the 7th International Congress of Speleology*, 348. Sheffield.
- Pitty, A. F., 1966: An approach to the study of karst water. *Univ. Hull Occ. Paper in Geogr.* 5.

- Raušer, J., O. Štelcl, V. Vlček, 1965: Principal characteristics of karst water in central European area according to the results from Moravian Karst. Problems of the speleological research 1, 85-105. Praga.
- Roques, H., 1962: Considération théoriques sur la chimie des carbonates. Annales de Spéléologie 17/1, 2, 12 in 241. Paris.
- Roques, H., 1964: Contribution à l'étude statique et cinétique des système gaz carbonique - eau - carbonate. Annales de Spéléologie 19/2, 255. Paris.
- Roques, H., 1969: Problemes de trasfert de masse posés par l'évolution des eaux souterraines. Annales de Spéléologie 24, 455. Paris.
- Roques, H., 1972: Sur une nouvelle méthode graphique d'étude des eaux naturelles. Annales de Spéléologie 27/1, 79. Paris.
- Roques, H., 1972: Etude expérimentale de la cinétique de précipitation de carbonates de calcium. Annales de Spéléologie 27/2, 273. Paris.
- Roques, H., A. Girou, 1972: Influence de l'agitation du milieu sur les vitesses de précipitation de calcium. Annales de Spéléologie 27/3, 577. Paris.
- Roques, H., C. Ek, 1973: Etude expérimentale de la dissolution des calcaires par une eau chargée de CO<sub>2</sub>. Annales de Spéléologie 28/4, 549. Paris.
- Schachtschabel, P., et al., 1976: Lehrbuch der Bodenkunde, 59. Stuttgart.
- Smith, D. J., G. Mead, 1962: The solution of limestone. Proc. of the Spel. Soc., 2, 9. Univ. of Bristol, Bristol.
- Stenner, R. D., 1966: The variation of temperature and hardness in St. Guthbert's Swallet, a progress report. Belfry Bull. 21(1), 117-121.
- Sweeting, M. M., 1976: Present problem in the karst denudation research in the world. Karst processes and relevant landforms, ISU 7-15. Ljubljana.
- Thraillkill, J., 1976: Karbonatna ravnoteža u kraškim vodama. Hidrologija i vodno bogatstvo krša. 1-692 (595). Sarajevo.