

# REZULTATI POSKUSOV Z MODELI ZAGANJALK

THE EXPERIMENT RESULTS WITH EBB AND FLOW  
SPRING MODELS

RAFAEL PODOBNIK

**Izvleček**

UDK 556.36.08 : 621.65.01

**Podobnik Rafael: Rezultati poskusov z modeli zaganjalk**

Avtor je z modeli preizkusil v literaturi dostopne in lastne zamisli o delovanju zaganjalk. Ugotovil je, da lahko delujejo na različne načine. Razlikuje višinsko, sesalno, pasivno in nihhalno zaganjanje. Pri vseh preizkušenih oblikah delovanja ima zrak bistveno vlogo. Uvaja pojme razvlečena natega, zračna zapora, odprti in zaprti sistem, sesalna zapora, zračni most, sprožilni pretok ter minimalni in maksimalni kritični dotok.

**Abstract**

UDC 556.36.08 : 621.65.01

**Podobnik Rafael: The experiment results with ebb and flow spring models**

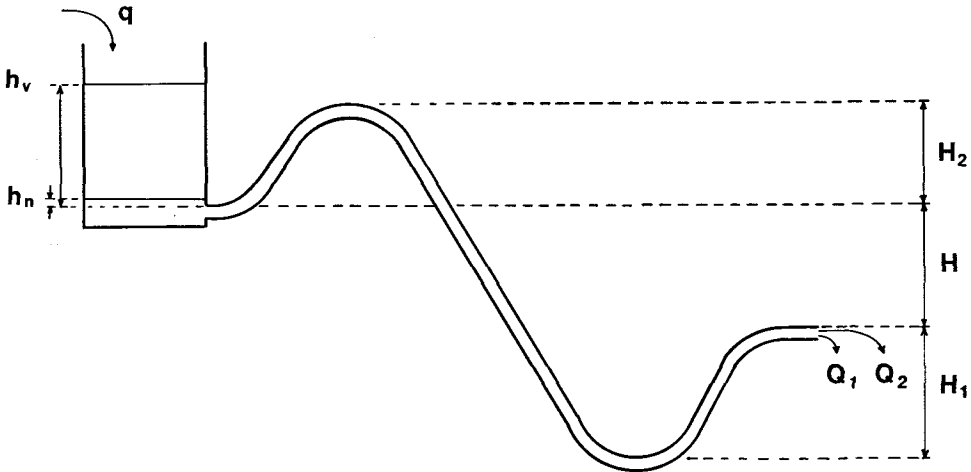
Accessible in literature and on the base of his own ideas the author tested the ebb and flow springs activity. He differs among heigth, pumping, passive and swinging manner of flowing. At all the tested ways of function the air plays an essential role. The author introduces the terms as extended siphon, air block, opened and closed system, pumping block, air bridge, released discharge and minimal and maximal critical inflow.

## UVOD

Zaganjalke so redki in zanimivi kraški izviri, ki periodično spreminjajo iztok vode. Večina strokovnjakov razlaga njihovo delovanje z natego. Vedno znova pa se pojavljajo avtorji, ki vseh opazovanih pojavov ne morejo pojasniti s sistemom natege in iščejo druge razlage. Vprašanj je ničkoliko:

Zakaj voda med zagoni v večini primerov ne preneha teči? Kako razložiti časovne in količinske nepravilnosti zaganjanja? Kaj določa območje delovanja? Ali zaganjanje preneha, če dotok postane enak ali manjši od minimalnih iztokov med delovanjem (P o d o b n i k, 1968; H a b i č, 1970)? Kako lahko Lintvern pri Vrhniku izbruhne ob suši, ko je ocenjeni dotok preko stokrat manjši od maksimalnih iztokov med zaganjanjem (H a b i č, 1970)? Zakaj Zaganjalka v Cerkljanskem Vrhu zaganja na več popolnoma različnih načinov (P o d o b n i k, 1968)? Kako razložiti pojav ciklusov (P o d o b n i k, 1968)? Kakšno vlogo ima zrak? Ali lahko spreminjanje zračnega pritiska vpliva na zaganjanje (B r i d g e, 1923; P o d o b n i k, 1968)?

Da bi razširili znanje o zaganjalkah in odgovorili na katero izmed zastavljenih vprašanj, smo več let s pomočjo modelov raziskovali njihovo delovanje.



## Seznam kratic

- H — višinska razlika med začetkom in koncem cevi (na slikah h)  
 $H_1$  — višinska razlika med koncem in najnižjim delom cevi  
 $H_2$  — višinska razlika med začetkom in najvišjim delom cevi  
 $K_1$  — minimalni kritični dotok  
 $K_2$  — maksimalni kritični dotok  
 l — litri  
 min — minute  
 P — povprečno trajanje periode  
 q — dotok oziroma povprečni pretok  
 $Q_1$  — minimalni iztok  
 $Q_2$  — maksimalni iztok  
 s — sekunde  
 T — trajanje posamezne periode  
 V — prostornina vode, ki se med višinama  $h_n$  in  $h_v$  nabere v zbiralniku (v eni periodi)  
 $h_n$  — najnižja višina vode v zbiralniku, merjena od zgornjega roba svetline cevi  
 $h_v$  — najvišja višina vode v zbiralniku, merjena od zgornjega roba svetline cevi

## ZGODOVINSKI IN TEORETSKI DEL

Uporabljeni viri kažejo, da je Valvasor leta 1689 prvi razložil delovanje zaganjalk z natega. Čeprav so v njegovi dobi še sežigali čarovnice, se ob raziskovanju Lintverna pri Vrhniki ni dal prepričati okoliškim kmetom, ki so trdno verjeli, da skrivnostno obnašanje izvira povzroča zmaj. Odločilni dokaz jim je bil zmajček, ki ga je bila voda prinesla na dan. Sklicevali so se na vrhniškega poštarja, ki je bil ped dolgo in kuščarju podobno žival odnesel domov. Slednje bi bil lahko prvi pisani vir o človeški ribici. Ker Valvasorju zaradi nedoločene omembe ni prinesel prvenstva (Aljančič, 1984), mu ga tem bolj privoščimo na področju razlage delovanja zaganjalk z natega. Nepojasnjena in brez primere v literaturi ostaja njegova potrditev ljudskih pričevanj, ko je dvakrat umetno povzročil izbruh kot milnica bele vode. Prvič je samo suval z drogom, drugič pa je zraven še kričal v iztočno luknjo Lintverna. Valvasor pojav razloži s stanjem, ko je voda v isti višini kot koleno natege in lahko najmanjši gib sproži delovanje. Edinstvena je njegova domislica o povezavi dveh nateg, ki jo je uporabil pri tolmačenju hitrega polnjenja Cerkniskega jezera. Voda iz višje natege se izliva v padajoči krak nižje natege in predčasno sproži njeno delovanje (Valvasor, 1984).

Če razlagamo delovanje zaganjalk z natega oziroma sifonom v hidravličnem smislu (Mangin, 1975), si predstavljamo v vodnem rovu votlino, iz katere pri dnu izhaja kolenasti rov. Ko voda doteka, se istočasno polnita votlina in dvigajoči se del kolenastega rova, dokler voda ne doseže kolena in se prelije navzdol. Voda v padajočem kraku kolenastega rova ob ugodnih pogojih

deluje kot bat v črpalki in srka vodo iz zbiralnika. Ko se votlina izprazni, kolenasti rov vsrka zrak in natega preneha delovati. Zbiralnik se prične ponovno polniti in pojav se ponovi. Darcy je leta 1857 opozoril, da do zaganjanja pride takrat, ko je pretok skozi kolenasti rov večji od dotoka v zbiralnik (cit. Imbeaux, 1930). Skladno s tem je Mangin (1969) s poskusi ugotovil, da mora biti iztok najmanj dvakrat večji od dotoka. Če je razlika med dotokom in iztokom manjša, pride do vrste hitrih in neizrazitih sunkov.

Da bi pojasnil iztekanje vode med izbruhi, je Darcy predvidel možnost, da se vodni rov razdeli v dve veji. Del vode teče preko mehanizma, drugi del pa se po obhodnem rovu izliva neposredno v izvir. Minimalni iztok je enak pretoku skozi obhodni rov. Pri maksimalnem iztoku se mu pridruži voda, ki jo dovaja natega (cit. Imbeaux, 1930). Bridge (1923) meni, da rov s stalnim iztokom lahko izhaja iz zbiralnika ali pa ni povezan z dejavniki, ki botrujejo zaganjanju. Ne moremo mimo bleščečega Darcyjevega razmišljanja, ko razglablja o predpostavki, da iz zbiralnika nekoliko nad ustjem natega izhaja manjši rov z lastnim izvirom. Če ob suši manjši rov odvaja vso vodo, dobimo stalni izvir, medtem ko je zaganjalka suha. Ob večji vodi se vključi natega in oba izvira zaganjata. Nadaljnje večanje dotoka povzroči, da postane iztok v glavnem izviru stalen, mali izvir pa je suh. Zaradi popolnosti dodajamo stanje, ki ga je Darcy predvidel v drugi povezavi. Ko se dotok poveča nad zmogljivostjo natega postaneta oba izvira stalna (cit. Imbeaux, 1930).

Neprekinjen iztok omogoča tudi Manginov mehanizem (1969), ki ne temelji na nategi. Iz zbiralnika izhajata zgornji zračni in spodnji vodni rov. Po krajšem ločenem poteku se združita v skupni rov, ki pada proti izviru. Začetek in konec zračnega rova morata biti v isti višini. Če konec zračnega rova napram njegovemu ustju nižamo, statični pritisk v stičišču obeh rogov potiska vodo v zračni rov in ovira vsrkavanje zraka. Da se vzpostavi zračni tok, se mora gladina v zbiralniku bolj znižati, kot je potrebno pri isti višini obeh koncev zračnega rova. Pri taki postavitvi je Mangin opazoval nepravilno delovanje. V obratnem primeru, ko stičišče obeh rogov dvigamo, naprava dobiva lastnosti natega. Velik iztok imamo toliko časa, dokler je nivo vode v zbiralniku nad ustjem gornjega rova. Ko se vhod v zračni rov odpre, voda v stičišču obeh rogov prične vsrkavati zrak. Iztok se zmanjša. Gladina v zbiralniku se prične dvigati in ponovno zapre zračni rov. Vsrkavanje zraka ni več mogoče in iztok se poveča. Ob ugodnih pogojih se pojav periodično ponavlja. Mangin meni, da lahko samo z opisanim mehanizmom ponazorimo delovanje zaganjalke Fontestorbes v Franciji, za katero so značilne majhne razlike med dotokom in maksimalnim iztokom ter pravilnost zaganjanja. Pomemben je Manginov eksperimentalni in računski prikaz, koliko zračni tok zmanjša vodni tok, če se istočasno pretakata po cevi.

Časovne in količinske nepravilnosti zaganjanja večina avtorjev razlaga s sestavom dveh ali več mehanizmov. Teoretično so lahko vezani vzporedno ali zaporedno. Že Darcy (cit. Imbeaux, 1930) si je zamislil sestavljeno zaganjalko z dvema zbiralnikoma. Višji je večji in ga povezuje z nižjim kolenasti rov z dvema propustnostjo, kot jo ima natega, ki povezuje končni zbiralnik z izvirom. Kombinacija naj bi delovala tako, da bi obdobju pogostih izbruhov sledil daljši presledek, ko bi se polnil večji zbiralnik. Marković

(1963) nepravilnosti v delovanju Homoljske potajnice pojasnjuje s sekundarnimi zaganjalkami, ki se občasno praznijo v primarni zbiralnik. Če sekundarni mehanizmi delujejo med polnjenjem glavnega zbiralnika, skrajšajo čas med zagoni. Kadar pa se vključijo tik pred ali med delovanjem primarne zaganjalke, podaljšajo in okrepijo izbruh.

Bridge (1923) obravnava teorijo z več nategami kot izjemno možnost, nikakor pa v njej ne vidi splošnega obrazca za pojasnjevanje časovnih in količinskih nepravilnosti zaganjanja. Opozarja na redkost periodičnih izvirov. Zdi se mu nesmiselno, da bi z več nategami razlagal delovanje ene zaganjalke, medtem ko številni izviri v okolici ne kažejo nobenih znakov zaganjanja. Kot najverjetnejšo ocenjuje Meinzerjevo teorijo o vsrkavanju zraka skozi stene kolenastega rova. Med delovanjem naj bi natega srkala vodo skozi razpoke kolenastega rova. Če bi v okolici zmanjkalo podtalnice, bi natega vsrkala zrak, ki bi prekinil izbruh. Zaganjanje bi bilo nepravilno. Potrdilo za Meinzerjevo teorijo je dobil v opazovanih Izvira pri Jack's Fork in Millerjevega izvira v državi Missouri in ZDA. Oba izvira izrazito, toda zelo nepravilno zaganjata. Med večtedenskimi merjenji je nekajkrat neznatno deževalo. Čeprav se dotok ni bistveno spremenil, so se razmaki med praznjenji podaljšali. Istočasno so se povečale količine izbruhane vode. Bridge meni, da majhne količine padavin ne vplivajo na dotok vode, pač pa zapolnijo razpoke okrog kolenastega rova. Kot drugo možnost za nepravilno zaganjanje Bridge navaja vpliv zračnega tlaka. Pri visokem barometriškem tlaku naj bi se podtalnica počasneje stekala v zbiralnike kot pri nizkem.

Podobnik (1968) je pri merjenjih Zaganjalke v Cerkljanskem Vrhu ugotovil različne načine zaganjanja, spremembe velikosti maksimalnih iztokov in večjo ali manjšo nepravilnost zaganjanja pri spreminjanju povprečnega pretoka. Nadalje je zabeležil nenadno spremembo maksimalnih iztokov, združitev dveh zagonov v enega, pojav ciklusov pri večjih dotokih in izostanek izrazitega delovanja za dobo enega ciklusa. Posebno zanimivo je bilo prenehanje zaganjanja, ko je dotok postal enak minimalnim iztokom med delovanjem ter ponoven pojav popolnoma nepravilnega zaganjanja pri še nižjem povprečnem pretoku. Avtor meni, da bi večino naštetih pojavov lažje razložil s sistemom z zrakom kot z natego. Sestavljata ga dve negativni in vmesno pozitivno koleno, v katerem se nabira zrak, ki zapira vodi pot. Količina zraka naj bi bila poleg dotoka vode ter oblike in mer zaganjalke iskani tretji dejavnik, ki vpliva na zaganjanje. Podobnik navaja trditve okoliških kmetov, da je zaganjanje pred slabim vremenom močnejše. Avtor ugotavlja, da so deli vodnega rova napolnjeni z zrakom. Pri padanju zračnega tlaka se zrak širi in sprošča v vodni tok. Mehanizem zaganjalke ima na razpolago več zraka in zaganjanje je močnejše.

Darcy je bil prvi, ki je obravnaval učinke, ki jih lahko povzroči zrak v naravnih vodih. Kot primer je navedel vrh v vodnem rovu, v katerem se nabira zrak. Pri nižji temperaturi zrak dopušča vodi pretakanje preko vrha. Če pa se temperatura zviša, se zrak razširi in zapre vodi pot. Na njegovo hipotezo naj bi se naslanjal Mangin, ko je leta 1969 razložil delovanje Fontaine Ronde v Juri v Franciji s pritiskom ogljikovega dioksida (cit. Verdeil, 1962, cit. Mangin, 1969).

Verdeil (1962) ugotavlja, da ne gre za cgljikov dioksid, ampak za zrak, ker se v izviru ne nabira lehnjak. Za Fontaine Ronde navaja, da pri zelo visoki vodi ne zaganja. Pri nižanju dotoka se najprej pojavijo neredni in težko ločljivi zagoni. Najpravilnejše delovanje dobimo ob nizki vodi. Ob zelo nizki vodi zaganjanje preneha. Izvir sestavljata dva bazena, v katerih je vidno sproščanje zraka v obliki mehurčkov ali pravega vrenja. Izhajanje zraka se začne nekoliko pred zgonom, se večja skupaj z njim in preneha malo pred njegovim koncem. Slišno je podzemno šumenje. Ob zelo nizki vodi, ko ni zaganjanja, se v spodnjem bazenu vsakih 10—15 minut ali v še daljših časovnih razmakih sprošča zrak. Ob zelo visokih vodah pa skupaj z zaganjanjem izgine tudi izhajanje zraka. Med prebijanjem bližnjega železniškega tunela je Fontaine Ronde zaradi izhajanja zraka usahnila. Ko so odprtine v tunelu zamašili, je voda pričela iztekati in čez eno uro se je vzpostavilo zaganjanje.

Bridge (1923) je prvi ugotovil, da stranske reže in razpoke ob izbruhu sprejmejo vodo, ki jo ob nižanju gladine postopno oddajajo in podaljšujejo čas upadanja.

Verdeil (1962) poroča, kako so v vrtači v okolici Fontestorbese odkrili šibak intermitentni prepih. Na tem mestu so s težaškim delom odprli Brezno Caoujous, v katerem so na dveh mestih prišli do vode, ki je naraščala in upadala. Če Fontestorbese ni deloval, tudi voda v breznu ni spreminjala višine. V severozahodnem jašku je bilo med delovanjem možno slišati oddaljeno grmenje, odtekanje vode v jugovzhodni dvorani pa je spremljal oglušujoč hrup. Mangin (1969) je v NNW delu opazoval 4,7 m visoko dviganje vode in v SSE prostoru 3,3 m. Pojav tolmačita različno. Verdeil meni, da sta opazovani mesti v zaledju dveh nateg. Mangin trdi, da se nahajata med intermitentnim mehanizmom in izviro. Gladina naj bi se dvignila zaradi pritiska izbruhane vode, podobno kot se dvigne v razbremenilnih jaških pri vodnem udaru.

Fontestorbese ne deluje pri srednjem in visokem vodnem stanju. Mangin navaja, da se delovanje običajno začne sredi julija in konča novembra. Kritični pretok, pri katerem se pojavi zaganjanje, znaša 1,2—1,5 m<sup>3</sup>/s. Brezno Caoujous se nahaja 1120 m jugovzhodno in 100 m višje od Fontestorbese. Voda je okrog 90 m globoko. Pozimi je opazoval višjo gladino vode, pred nastopom intermitence pa nižjo od maksimalnih višin med delovanjem. Maksimum je zabeležil v SSE dvorani 2 min in v izviru 17,5 min kasneje kot v NNW jašku. Minimum nastopi v obeh delih brezna istočasno, v izviru pa se pojavi 29 min pozneje. Čas naraščanja vode v izviru je krajši in čas upadanja daljši kot v breznu.

Verdeil (1962) poroča o intermitentnem sistemu Poudak v Visokih Pirinejih, ki deluje samo ob visokih vodah. V Breznu Poudak je opazoval 4 m visoko dvigovanje vode s periodo 58 min. V 50 m oddaljenem breznu je vodna gladina nihala s periodo 29 min. Verdeil uganka razlaga s kombinacijo dveh nateg. Za izvir Crupet v Belgiji, ki deluje zelo neredno in je njegov izvirni bazen ob deževju suh, trdi, da deluje na osnovi vodnega udara (oz. hidravličnega ovna). Ko se dotok dovolj poveča, naj bi vodni udari izginili. Vsa voda odteka po nižjem vodu in se ne dvigne do višine intermitentnega izvira. Če se

dotok še povečuje, dobimo v izvirnem bazenu najprej stalni nivo vode in končno stalni iztok brez zaganjanja.

M a r k o v i ć (1963) navaja, da Homoljska potajnica med izbruhi preneha teči. Tik pred začetkom iztoka se zasliši 3—4 s dolgo hrumenje, ki spominja na udarce in lomljenje.

Naštevanje podatkov iz literature, ki bi bili lahko pomembni za celovitejšo razlago delovanja zaganjalk, zaključujemo s podatki o Lintvernu. H a b i ć (1970) ugotavlja, da Lintvern deluje, če je dotok manjši od maksimalnega iztoka med delovanjem, ki znaša okrog 400 l/s. Nedvomno gre za zaganjalko z izjemno intenzivnostjo zaganjanja, ki ji v razpoložljivi literaturi ni para. Maksimalni iztoki so osemdesetkrat večji od minimalnih. Posebej preseneča izbruh ob zelo nizki vodi po dvajsetdnevem presledku.

### MATERIAL IN METODE

Uporabljena je bila eksperimentalna metoda. Merjenja smo opravljali v strmi grapi. Vodo smo preusmerili v betonsko korito, ki je nekoč služilo za napajanje majhne elektrarne. Nanj smo pritrdili 6 različno debelih cevi, ki smo jih kot natege uporabljali za dotok vode v zbiralnik. Tudi če so bile vključene vse, se je višek vode prelival preko korita, kar je zagotavljalo enakomeren dotok. Med potokom in koritom smo postavili tri rešetke iz preluknjane pločevine in žičnih mrež, da so zadrževale odpadlo listje in vejice. Za zbiralnik smo uporabili na gornji osnovni ploskvi odprt kovinski sod z notranjim premerom 57 cm in višino 86 cm. V njem sta bila na nasprotnih straneh prilepljena dva metra za spremljanje višine vode. Površina vode v zbiralniku je znašala 25,52 dm<sup>2</sup>. Pri dnu je bil v obod vgrajen kovinski priključek za cev s koristnim premerom 37 cm. Za različne izvedbe vodnega rova nam je služila 12,3 m dolga plastična cev z notranjim premerom 43 mm in 6 mm debelim plaščem. Sorazmerno debele stene so ob primerno velikih polmerih ukrivljanja preprečevale upogibanje cevi pod ostrimi koti, kar bi zmanjšalo njeno prepustnost in motilo poskuse. Pri uporabljenih višinskih razlikah (H ni bil nikoli večji od 2 m) nismo zasledili, da bi podpritisni opazneje stiskali cev. Kljub debelini so bile stene zadosti prozorne, da smo lahko opazovali gibanje in mesta zadrževanja zraka. Namenoma smo izbrali cev večjega premera, da bi se bolj približali razmeram v naravi. Pri merjenjih E 6 in F 7 smo takoj za sodom podaljšali cev z 0,3 m dolgim delom enake vrste. Cevi sta bili povezani s pomočjo 8 cm dolgega kovinskega dela z notranjim premerom 37 mm in stranskim odcepom za dovod zraka, ki pa pri omenjenih merjenjih ni bil uporabljen.

Ob iztoku smo glede na hitrost spreminjanja pretoka vsakih 5, 10 ali 15 s merili dolžino curka. S pomočjo merskih posod in stoparice smo za posamezno dolžino curka trikrat zmerili pretok in izračunali povprečje. Dobljene rezultate smo grafično predočili, pri čemer smo popravili morebitna večja odstopanja. Tudi pri dotočnih ceveh smo najmanj trikrat zmerili pretok in izračunali povprečje. Možna je 15% napaka.



**Model A** (sl. 1) predstavlja razvlečeno natego, ki jo odlikujeta majhna višinska razlika in razmeroma dolg padajoči krak natega. Na modelu A smo opravili merjenje A 1.

**Model B** (sl. 1) je zaprta razvlečena natega. Dobili smo ga tako, da smo modelu A pred izlivom dodali zračno zaporo, ki ni nič drugega kot negativno koleno oziroma sifon v pravem pomenu besede. Na njem smo opravili merjenje B 2.

**Model C** (sl. 2) je odprta natega. Odprti sistem se loči od zaprtega po tem, da nima zračne zapore. Na modelu C smo izvršili merjenji C 3 in C 4.

**Model D** (sl. 3) predstavlja zaprto natego. Nastal je tako, da smo modelu C dodali zračno zaporo. Najnižji del zračne zapore je 35 cm nižji od pozitivnega kolena, ki ji sledi, oziroma 5 cm nižji od konca cevi. Na modelu D smo naredili merjenje D 5.

**Model E** (sl. 3). Modela E in F sta brez pozitivnih in negativnih kolen. Nedvomno predstavljata najenostavnejšo obliko zaganjalke. Kljub preprostosti ali prav zaradi nje takega mehanizma v literaturi nismo zasledili in gre za originalno izvedbo. Z modelom E smo opravili merjenje E 6.

**Model F** (sl. 4) se razlikuje od modela E po večji višinski razliki med začetkom in koncem cevi. Z njim smo izvršili merjenje F 7.

**Model G** (sl. 4) smo dobili tako, da smo modelu F dodali zračno zaporo. Z njim smo izvedli merjenje G 8.

**Model H** (sl. 5) je brez višinske razlike med začetkom in koncem cevi. Deluje lahko samo pod pogojem, da dotok v zbiralnik napeljemo tako, da peni vodo okrog vhoda v cev. Vodni rov sestavljata dve negativni kolena. Posnema sistem z zrakom (Podobnik, 1968). Z modelom H smo opravili merjenje H 9.

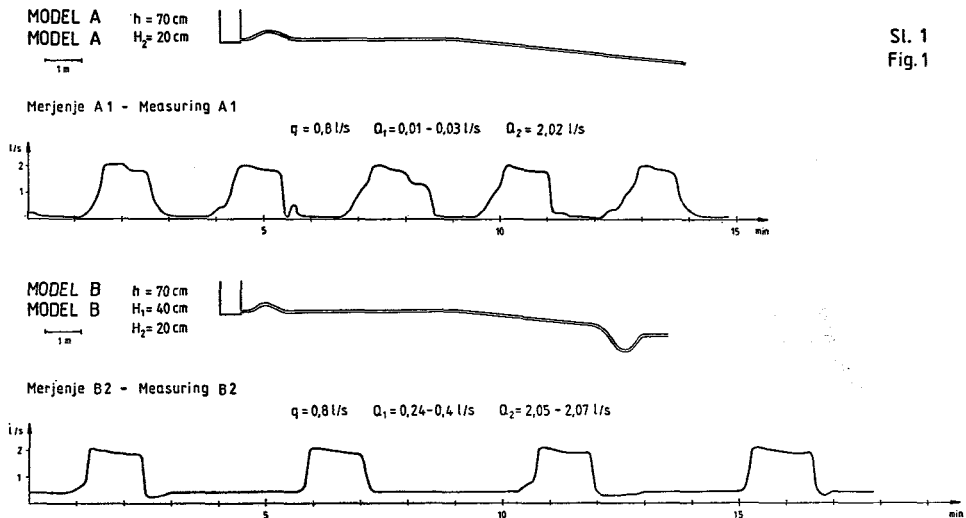
**Model I** (sl. 5) ima negativno koleno takoj za zbiralnikom. Spada med odprte sisteme. Z njim smo izvršili merjenje I 10.

**Model J** (sl. 6) je izveden iz modela I. Sestavljata ga negativno koleno takoj za zbiralnikom in zračna zapora pred ravnim iztočnim delom. Merjenja J 11, J 12 in J 13 se razlikujejo samo po dotoku. Pri merjenjih J 14 in J 15 smo zaganjanju zaradi vodnega padca (višinsko zaganjanje) dodali učinek z zrakom pomešane vode, ki jo povzroča slap v zbiralniku (pasivno zaganjanje).

**Model K** (sl. 8) je posebna zaprta natega. Namesto enega visokega pozitivnega kolena ima štiri nizka kolena z višinami (v smeri toka): 5, 6, 6 in 4 cm. Sledi jim enakomerno padajoči del cevi, ki tekoče preide v sesalno zaporo. Sesalna zapora je plitka oblika zračne zapore. Na modelu K je samo 5 cm nižja od nakazanega pozitivnega kolena, ki ji sledi. Najnižji del sesalne zapore in iztok sta v isti višini. Z modelom K smo izvedli merjenja K 16, K 17 in K 18.

## REZULTATI

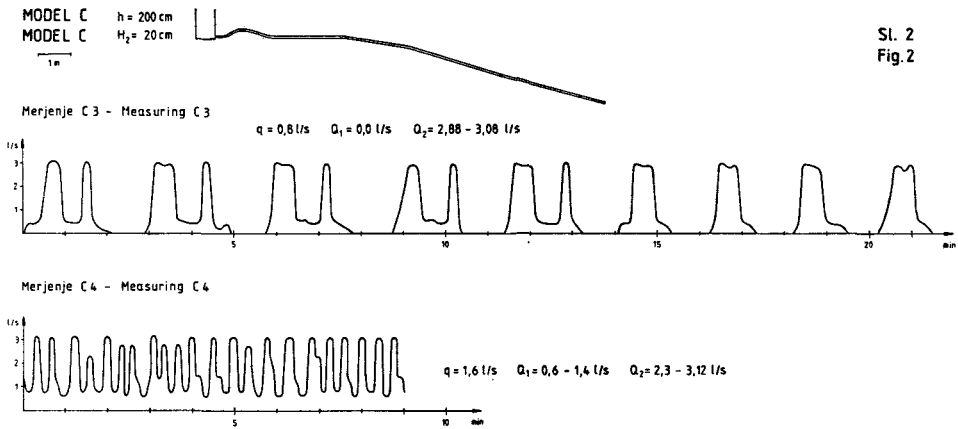
Merjenje A 1 (sl. 1):  $h_n = 1$  cm,  $h_v = 24,5-25$  cm,  $V = 60-61,2$  l,  $P = T = 170$  s. Med zagonom v cevi ni zraka in jo v polnem preseku izpolnjuje voda. Ko voda v zbiralniku upade in ustje cevi vsrka zrak, se iztok hitro zmanjša. Po vsrkanju imamo posebno v vrhu kolena in v ravnem delu cevi večje in manjše mehurje zraka. Istočasno se voda od izliva nazaj nadomešča z zrakom.



Voda, ki je izpolnjevala celotno svetlino cevi (če zanemarimo mehurje zraka), počasi odteka in polni presek vode, se retrogradno ruši kot v vrsto postavljene domine. Polna svetlina vode obstane približno na sredini dvigajočega se kraka kolena, ker se je medtem gladina vode v zbiralniku že toliko dvignila. Od vsrkanja zraka do konca nadomeščanja vode z zrakom je potrebnih okrog 25 s. Voda rabi nadaljnjih 50 s, da se dvigne v vrh kolena. Polna svetlina vode postoji nekoliko sekund v kolenu in prične potovati proti izlivu, do katerega rabi še približno 30 s. Najmanjše ponižanje cevi v ravnem ali padajočem delu deluje kot zračna zapora ter zaustavi prej opisano nadomeščanje vode z zrakom. Čeprav je potek izbruhov različen, se  $T$  in  $Q_2$  ne spreminjata.

Merjenje B 2 (sl. 1):  $h_n = 1$  cm,  $h_v = 27,5 - 33$  cm,  $V = 67,6 - 81,7$  l,  $P = 280$  s,  $T = 270 - 290$  s. Ob vsrkanju zraka nekaj mehurčkov vrže preko zapore v izvir. Potem nosi preko zapore okrog 1 mm velike mehurčke. Počasi se njihova velikost poveča na 3–5 mm, čeprav minimum še traja. V padajočem kraku kolena in v padcu pred zračno zaporo teče voda samo po dnu cevi. Ravni del za kolenom izpolnjuje polna svetlina vode, v kateri so večji mehurji zraka. Po vsrkanju zraka polni lumen vode obstane v vrhu kolena in omogoča neprekinjeni iztok. V vstopnem kraku zapore je gladina vode 15 cm višja kot v izstopnem delu, v katerem njen nivo narekuje višina izliva. Maksimum dobimo tako, da prične voda v polnem preseku potovati od kolena proti izlivu, pri čemer prehajajo preko zapore vedno večji mehurji zraka.

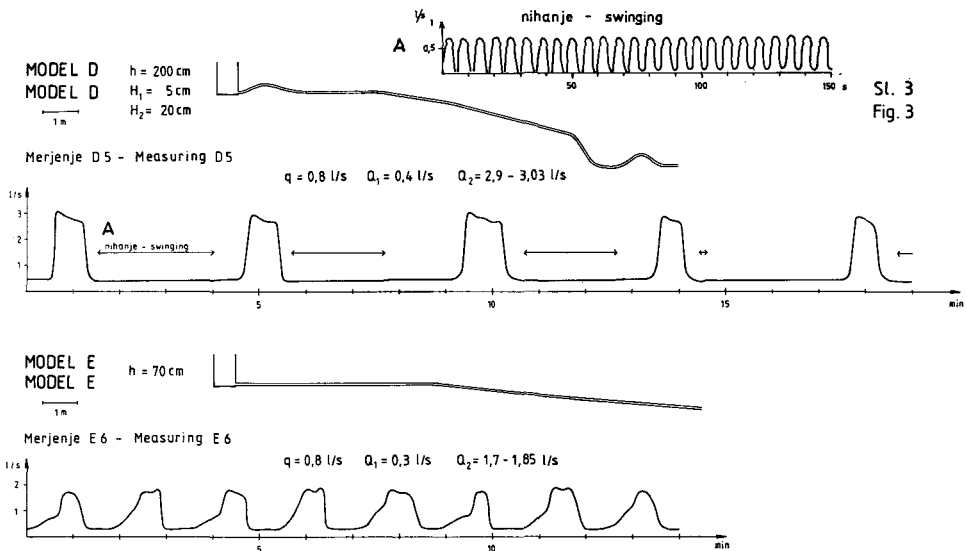
Merjenje C 3 (sl. 2):  $h_n = 1,5$  cm,  $h_v$  širokih vrhov = 22,5 cm,  $h_v$  ozkih vrhov = 3–4,5 cm,  $V$  širokih vrhov = 53,6 l,  $V$  ozkih vrhov = 3,8–7,7 l,  $P$  ciklusov = 165 s,  $P$  enojnih vrhov = 123 s,  $T$  ciklusov = 150–190 s,  $T$  enojnih vrhov = 120–130 s. Obdobja, ko imamo samo en vrh, se izmenjujejo z obdobji, ko običajnemu zagonu sledi še ožji. Po izbruhu polna svetlina vode vztraja



v vrhu kolena, dokler se iz padca ne odteče voda. Nato pade po vstopnem kraku kolena navzdol in obstane okrog 6 cm nad zgornjim robom odprtine cevi. Ko zagonu sledi ožji vrh, polna svetlina vode obstane v začetku ravnega dela za kolenom, odkoder prične potovati proti izlivu.

Merjenje C 4 (sl. 2):  $h_n = 1,5$  cm,  $h_v = 2-6$  cm,  $V = 1,3-11,5$  l,  $P = 24$  s,  $T = 15-33$  s. Zaganjanje je nepravilno. Čas trajanja period ter velikost minimalnih in maksimalnih iztokov se zelo spreminja.

Merjenje D 5 (sl. 3):  $h_v = 1,5$  cm,  $h_n = 28,5-36,5$  cm,  $V = 68,9-89,3$  l,  $P = 252$  s,  $T = 230-280$  s. Po izbruhu voda in zrak obstaneta podobno kot pri

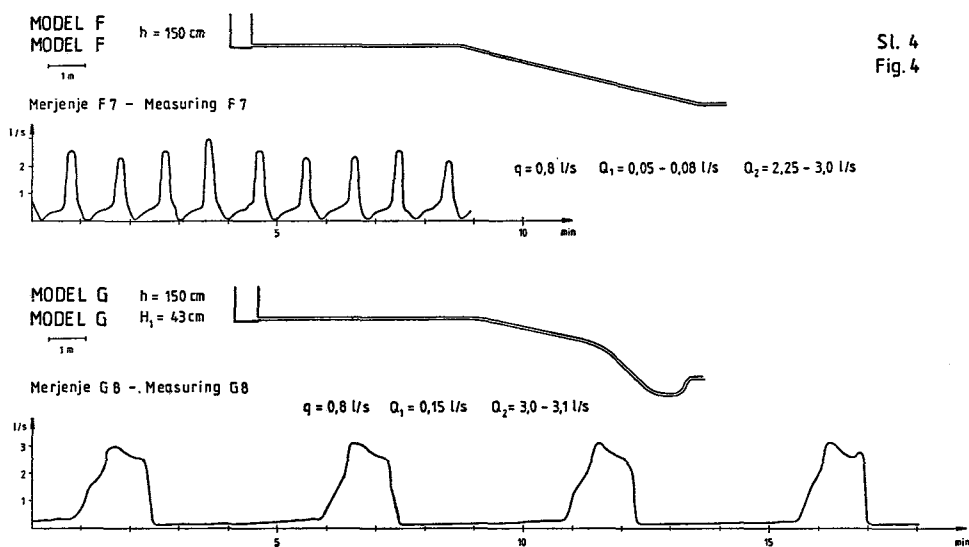


merjenju B 2. V začetku minimuma se pojavi nihanje s periodo 6 s, ki traja toliko časa, dokler je pretok nižji od 0,45 l/s. Polni lumen vode niha preko vrha kolena na razdalji okrog 40 cm. Kmalu se v ravnem delu za kolonom oblikuje okrog 40 cm dolga polna svetlina vode, ki niha sočasno z vodo v kolenu in obeh krakih zapore. V padajočem kraku kolena in ostalem delu cevi med kolonom in zaporo teče voda samo po dnu. Voda se prelije ob vsakem nihaju preko kolena in iz zapore v izvir. Spočetka med nihaji v iztoku preneha teči, kasneje samo narašča in pada. Pri dotoku 0,3 l/s zaprta natega ne dela, pač pa stalno niha na prej opisani način. Iztok se za hip prekine, nato se zlije od 1,5 do 1,7 l vode. Pojav smo imenovali nihalno zaganjanje. Če smo cev podaljšali za 3 m, smo dobili nihanje s periodo 7 s.

Merjenje E 6 (sl. 3):  $h_n = 1,5$  cm,  $h_v = 11$  cm,  $V = 24,2$  l,  $P = 106$  s,  $T = 100-110$  s. Ob vsrkanju zraka ga nekaj prinese v izvir. Razporedi se po vsej cevi v obliki mehurčkov. Istočasno retrogradno nadomešča polni lumen vode v padajočem delu in v prelomu cevi. Kmalu prične voda iz ravnega dela odnašati zrak. Polna svetlina vode zapolni prelom cevi in prične potovati proti izlivu. Ko ga doseže, dobimo maksimalni iztok.

Merjenje F 7 (sl. 4):  $h_n = 1$  cm,  $h_v = 6,5$  cm,  $V = 14$  l,  $P = 58$  s,  $T = 52-67$  s. Obnašanje zraka je podobno kot pri merjenju E 6. Polni lumen vode rabi okrog 15 s, da se v prelomu cevi pomakne 50 cm naprej. Preostalih 7 m do izliva prepotuje v približno 14 s.

Merjenje G 8 (sl. 4):  $h_n = 1$  cm,  $h_v = 44,5-45$  cm,  $V = 111-112,3$  l,  $P = 293$  s,  $T = 280-300$  s. Zrak prvič posrka pri višini vode v sodu od 6 do 1 cm, če jo merimo od zgornjega roba odprtine cevi. Po vsrkanju zraka imamo polno svetlino vode ob zbiralniku (v dolžini 25 cm), na sredi ravnega dela (45 cm) in



Sl. 4  
Fig. 4

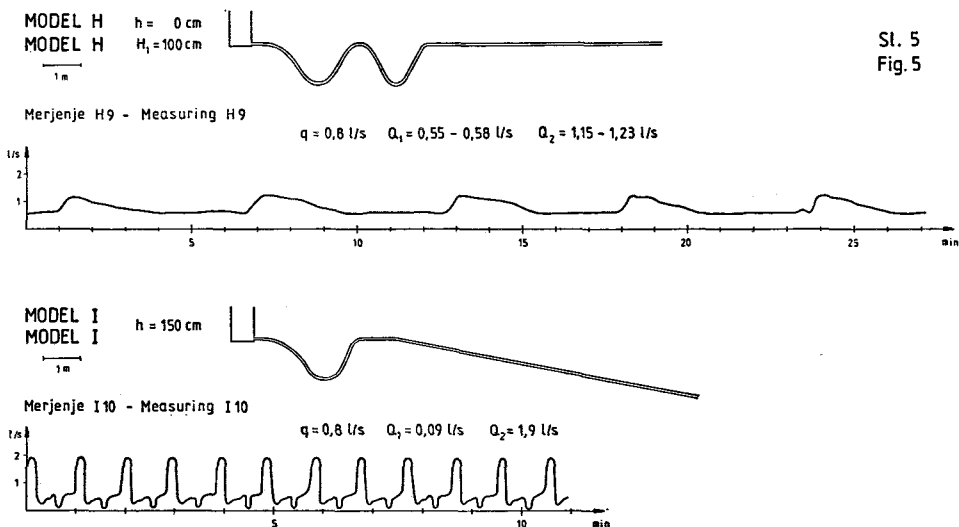
v zračni zapori. V vstopnem kraku zapore je voda okrog 10 cm višja kot v izlivu. Po vsrkanju se kot pri vseh do sedaj obravnavanih meritvah nič zraka ne vrne v zbiralnik. Že v začetku minimuma nosi preko zapore okrog 1 mm velike mehurčke. Pri iztoku 0,23 l/s se zrak v vstopnem kraku spusti do kolena zapore.  $K_1$  znaša okrog 0,3 l/s. Ob tako nizkem dotoku so delovali samo modeli s sesalno zaporo.  $K_2$  je približno 1,7 l/s. Pri  $q = 0,23$  l/s sistem ne dela. Višina vode v sodu je 10 cm. Ko dotok doseže 1,75 l/s, cev prične stalno srkati zrak. Pri  $q = 2,5$  l/s se prične gladina vode v zbiralniku dvigati.

V območju delovanja se voda pri dotoku 0,3 l/s v zbiralniku dvigne nekoliko manj kot pri 0,8 l/s, nasplošno pa se z naraščanjem dotoka  $h_v$  in  $T$  manjšata. Pri  $q = 0,3$  l/s dobimo:  $h_n = 0$  cm,  $h_v = 42,5$  cm,  $T$  je okrog 785 s. Tik pred začetkom izbruha zrak v vstopnem kraku doseže dno zapore. Ob maksimalnem kritičnem dotoku so mere naslednje:  $h_n = 1,5$  cm,  $h_v = 10-10,5$  cm,  $T$  je okrog 76 s. Količina vsrkanega zraka z naraščanjem dotoka pada.

**Merjenje H 9 (sl. 5):**  $h_n = 25,5-28,5$  cm,  $h_v = 39-47,5$  cm,  $V = 26,8-54,9$  l,  $P = 340$  s,  $T = 310-360$  s. Takoj za izstopom iz soda se oblikuje okrog 100 cm dolg podolgovat mehur zraka, ki se prilega ob zgornjo steno cevi. Manjši okroglasti mehurji se zadržujejo v vstopnih krakih obeh negativnih kolen. Poleg teh nastaneta v sredini padajočega kraka prvega in na začetku vstopnega kraka drugega negativnega kolena ob sredotežnih stenah okrog 25 cm dolga mehurja z ravno bazo in s proti toku ošiljenim vrhom. Maksimalna količina zraka ni vedno enaka. Ko voda v zbiralniku prične padati, izrine ves zrak iz cevi, tako da je okrog 30 s v njej samo voda. Medtem gladina v sodu toliko pade, da mehurčki dosežejo ustje cevi in voda prične ponovno vnašati zrak v sistem. Nivo vode v zbiralniku se še naprej niža. Količina zraka v cevi se veča in počasi nastopi prekret. Gladina vode v sodu se prične dvigati. Velik mehur zraka za ustjem cevi se med dvigovanjem vode še veča in se šele pred začetkom upadanja prične manjšati. Ko zdrsne preko prvega negativnega kolena, se različno dolgo zadržuje v vstopnem kraku drugega negativnega kolena in sorazmerno počasi drsi proti dnu sifona. Včasih se pomakne nekoliko nazaj. Takrat se nivo vode v zbiralniku bolj dvigne. Gladina v sodu enakomerno narašča in pada. Nekaj zraka se vrača nazaj v zbiralnik.

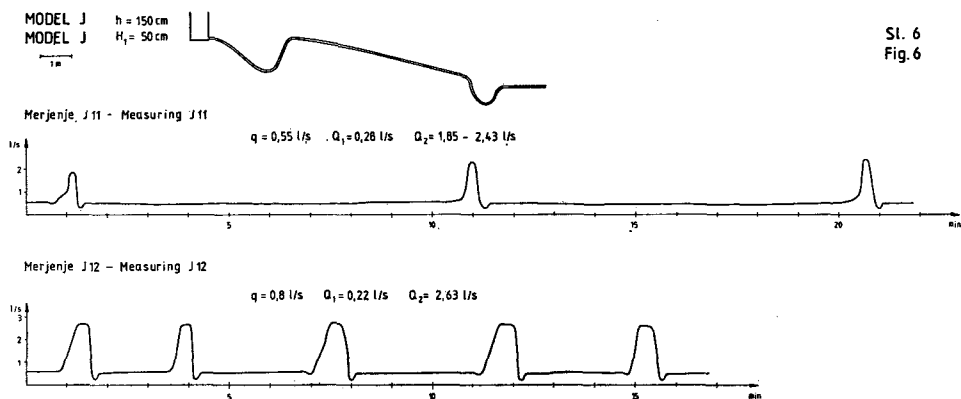
Pri vodoravni cevi zaganjanja nismo uspeli vzpostaviti. Zrak je enakomerno odnašalo. Če smo penjenje povečali, se je gladina vode v sodu ustalila na nekoliko višjem nivoju. Po drugi strani nismo uspeli doseči trajnega višinskega zaganjanja, če smo pri modelu H iztok znižali samo za 20 cm.

**Merjenje I 10 (sl. 5):**  $h_n = 1$  cm,  $h_v = 6,5$  cm,  $V = 14$  l,  $P = 57$  s,  $T = 53-60$  s. Po vsrkanju zraka se polni lumen konča takoj za ustjem cevi in voda teče v vstopnem kraku negativnega kolena po spodnji steni do globine 75 cm. Tu se začne polna svetlina vode, ki se konča ob prehodu izstopnega kraka kolena v krajši ravni del cevi. Mehurji zraka v padcu se dvignejo v njegov zgornji del, tako da voda teče do globine okrog 65 cm samo po spodnji steni cevi. Preostalo cev v celem preseku izpolnjuje voda, ki se od izvira nazaj zamenjuje z zrakom. Ob vsrkanju zraka nastopi prvi minimum. Drugi izrazitejši minimum dobimo, ko iz padajočega dela cevi odteče polna svetlina vode. Po vsrkanju se precej zraka vrne nazaj v sod. Večino preostale količine doleti ista usoda, ko iz padca



odteče polni lumen vode. Polna svetlina vode v začetku ravnega dela cevi se pomakne naprej in prekine drugi minimum. Polni lumen vode nadaljuje potovanje proti izviru in ko ga doseže, dobimo maksimalni iztok.

Merjenje J 11 (sl. 6):  $h_n = 1$  cm,  $h_v = 12,5 - 15,5$  cm,  $V = 29,3 - 37$  l,  $T$  je 580 in 590 s (zaradi dolgotrajnega poteka smo merili samo dve periodi). Po vsrkanju se podobno kot pri vseh meritvah z modelom J del zraka vrne v zbiralnik. V začetku minimuma voda v zgornjem delu vstopnega kraka kolena, v večjem delu padca in v iztočnem delu teče samo po dnu cevi. Polna svetlina vode v vstopnem kraku negativnega kolena se nahaja 70 cm in v padajočem delu cevi 100 cm globoko, tako da je 55 cm višja kot v izlivnem delu zapore. Takoj po vsrkanju zraka nosi preko zapore 1 mm velike mehurčke. Njihov premer kmalu naraste na 2—3 mm. V vstopnem kraku zapore se oblikuje večji mehur z ravno



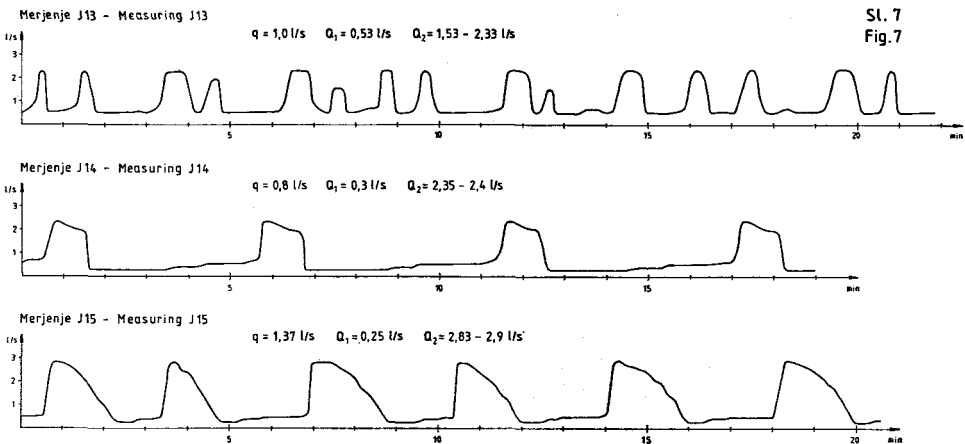
bazo in koničastim vrhom ter več manjših okroglastih mehurjev. Kasneje se koničasti mehur prične manjšati. Polna svetlina vode v padajočem delu cevi se pomika navzdol. Ravni izvorni del se polni z vodo v vsem preseku. Preko zapore meče 0,5—1 cm velike mehurčke. Polni lumen vode se prične od prehoda negativnega kolena v padajoči del cevi pomikati navzdol in pride do zagona. Voda odstrani ves zrak iz cevi šele proti koncu izbruha.

Merjenje J 12 (sl. 6):  $h_n = 1,5$  cm,  $h_v = 13—24$  cm,  $V = 29,3—57,4$  l,  $P = 204$  s,  $T = 150—250$  s. V primerjavi z merjenjem J 11 vodni rov vsrka manj zraka. Polna svetlina vode v vstopnem kraku negativnega kolena obstane v globini 65 cm. V padajočem delu cevi imamo večje zračne mehurje. Odsek v vrhu padajočega dela, kjer voda teče samo po dnu, je kratek. Ob izbruhu prej odstrani zrak iz cevi kot pri merjenju J 11.

Merjenje J 13 (sl. 7):  $h_n = 1,5$  cm,  $h_v = 4,5—19,5$  cm,  $V = 11,5—49,8$  l,  $P = 87$  s,  $T = 60—120$  s. Ob vsrkanju zraka enako kot pri merjenjih J 11 in J 12 prinese v izvir večje mehurčke. Obdobje, ko po vsrkanju nosi preko zapore 1 mm velike mehurčke, je v primerjavi s predhodnima merjenjima zelo kratko. Včasih voda ne preneha nositi v izvir večjih mehurčkov in po kratkem minimumu dobimo manjši zagon. Ostali pojavi so podobni kot pri merjenju J 12.

Merjenje J 14 (sl. 7):  $h_n = 1,5$  cm,  $h_v = 34—38$  cm,  $V = 82,9—93,1$  l,  $P = 330$  s,  $T = 300—350$  s. Po maksimumu se v padajočem kraku negativnega kolena polna svetlina vode ustavi 90 cm in v padcu 80 cm globoko. V izstopnem kraku kolena sega do prehoda v padajoči del cevi, tako da se pretok vode v minimumu ne prekine. V iztočnem delu teče voda po dnu cevi. Nadaljnji potek je podoben kot pri merjenju J 11. V izlivu ves maksimum izhajajo mehurčki, ker voda stalno nosi zrak v cev.

Merjenje J 15 (sl. 7):  $h_n = 14,5—15,5$  cm,  $h_v = 36—53,5$  cm,  $V = 52,3—99,5$  l,  $P = 209$  s,  $T = 170—240$  s. Penjenje vode je tako močno, da prej prekine maksimum, kot bi prišlo do vsrkanja zraka. Voda stalno nosi mehurčke v cev. Po zagonu zrak v vstopnem kraku sega do kolena (100 cm globoko). V padajo-



čem delu cevi se polni presek vode oblikuje v globini 75 cm. Ostalo je podobno kot pri merjenjih J 11 in J 14. V izviru stalno izhaja zrak. Pri iztoku 0,25—0,4 l/s voda nosi v izliv okrog 1 mm in v ostalem delu periode približno 1 cm velike mehurčke.

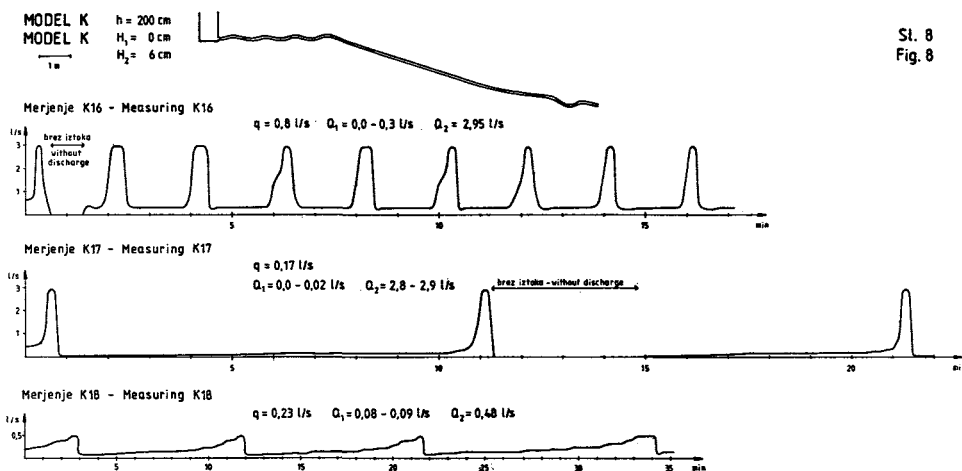
**Merjenje K 16** (sl. 8):  $h_n = 0,5$  cm,  $h_v = 14,5—22,5$  cm,  $V = 35,7—56,1$  l,  $P = 119$  s,  $T = 110—130$  s. Če zanemarimo periodo, ko je bil iztok prekinjen, znašajo vrednosti  $Q_1$  od 0,25 do 0,3 l/s. Po maksimumu imamo v vseh štirih kolenih zrak. Gladina v vstopnih krakih je višja kot v izstopnih, tako da se voda preliva preko kolen. Od vrha četrtega kolena do zračne zapore teče voda samo po dnu cevi. V vstopnem kraku zapore je nivo vode 16 cm višji kot v izstopnem. Vodne gladine precej nihajo. Takoj po izbruhu meče preko zapore 5 mm velike zračne mehurčke. Nivo vode v vstopnem kraku se pomika navzdol, dokler se preko najnižjega dela zapore ne vzpostavi zračni most. O njem govorimo takrat, ko tudi v dnu zapore ni več vode v polnem preseku cevi in je ventilni učinek porušen. Istočasno s prekinjenim delovanjem zračne zapore prične potovati od prvega pozitivnega kolena polni lumen vode. Izvir doseže v približno 20 s. Včasih polna svetlina vode zastaja in iztok v začetnem delu maksimuma počasneje narašča (glej 4. in 6. izbruh). Z merjenjem nam ni uspelo zajeti drugače nič kaj redkega pojava, ko se polni lumen oblikuje samo v zgornjem delu cevi in so maksimalni iztoki okrog 40 % manjši od običajnih. Pač pa smo med prvim in drugim zagonom zabeležili redek pojav, ko po izbruhu v zapori nastane zračni most in približno 50 s nimamo iztoka.

**Merjenje K 17** (sl. 8):  $h_n = 0$  cm,  $h_v = 19,5—20$  cm,  $V = 49,8—51$  l,  $P = 638$  s,  $T = 610—670$  s. Zaradi dolgega trajanja period smo prikazali samo del merjenja. Po drugem maksimumu je v zapori ostalo premalo vode, da bi bil vzpostavljen sestalni učinek in voda okrog 210 s ni iztekala. Če to periodo zanemarimo, so minimalni iztoki znašali 0,005—0,02 l/s. Pojavi v cevi so podobni kot pri merjenju K 16. Opazovanje je lažje, ker vodne gladine ne nihajo. Šele pri iztoku 0,035 l/s oziroma 120—270 s po izbruhu voda prične nositi okrog 1 mm velike mehurčke preko zapore.

Maksimalni kritični dotok znaša približno 1,55 l/s. V področju med 1,7 in 2,5 l/s cev stalno srka zrak. Pri dotoku 2,7 l/s se voda v sodu ustali na višini 8 cm. Če smo napravo spremenili v model C (sl. 2), je minimalni kritični dotok znašal 0,6 l/s. Pri modelu K brez sestalne zapore se je minimalni kritični dotok znižal na 0,4 l/s. Kombinacija modela C in sestalne zapore je delovala do dotoka 0,3 l/s. Pri modelu K pa pade  $K_1$  na 0,17 l/s (glej merjenje K 16).

**Merjenje K 18** (sl. 8):  $h_n = 0$  cm,  $h_v = 12,5—14,5$  cm,  $V = 31,9—37$  l,  $P = 619$  s,  $T = 540—765$  s. Če smo dotok počasi višali z vrednosti 0,1 l/s, ki ni mogla povzročiti višinskega zaganjanja, smo pri  $q = 0,23$  l/s dobili sesalno zaganjanje. Verjetno bi ga dobili tudi pri nekoliko nižjih dotokih, vendar bi bilo trajanje period predolgo za opazovanje in merjenje. Pri dotoku 0,3 l/s je sesalno zaganjanje običajno prešlo v višinsko, enkrat pa se je v zapori vzpostavil zračni most in se je višinsko zaganjanje pojavilo šele pri dotoku 1 l/s. Od dotoka 0,3 do 0,92 l/s mehanizem ni deloval. Vzporedno ko smo večali dotok, se je polni lumen vode podaljševal v padajoči del cevi. Ves zrak iz kolena je odneslo pri dotoku 0,82 l/s.





Med delovanjem voda v sodu počasi narašča in upada. Nad 5 mm velike mehurčke prične nositi preko zapore pri iztoku 0,14 l/s. Zanimivo je, da se pri iztoku 0,2 l/s gladina vode v vstopnem kraku zapore, ki se je do takrat nižala, prične višati. Kasneje začne ponovno padati in pri maksimalnem iztoku doseže koleno zapore.

## RAZPRAVA

Poskusi z modeli zaganjalk so pokazali, da lahko ločimo štiri osnovne oblike zaganjanja:

Višinsko zaganjanje nastane zaradi višinske razlike med začetkom in koncem dejavnega vodnega rova. Ko se med maksimumom gladina vode v zbiralniku dovolj zniža, odtekajoča voda vsrka zrak v vodni rov. Upor nankrat naraste in iztok se zmanjša ali prekine. Vodna gladina v zbiralniku se prične dvigati. Statični pritisk narašča. Voda odnaša vedno več zraka iz aktivnega vodnega rova. Ko se vzpostavi sprožilni pretok, voda prične v velikih količinah odnašati zrak in sledi izbruh. Ob ugodnih pogojih se pojav periodično ponavlja. Sem prištevamo padajoče rove brez kolen (modela E, F), izvedbo vodnega rova z negativnim kolonom (model I) in vse zaprte sisteme (modeli B, D, G, J, K). Odprta natega (model C) je posebna oblika višinskega zaganjanja z že dolgo znanim načinom delovanja, pri katerem je sprožilni dejavnik vzpostavitev zadosti dolgega polnega lumna vode v padajočem kraku pozitivnega kolena. Razvlečena natega (model A) je oblika odprte natega s počasnim vzpostavljanjem polnega lumna vode v začetnem delu izbruha in počasnim odtekanjem vode iz rova po vsrkanju zraka. V to skupino lahko uvrstimo tudi Manginov mehanizem (Mangin, 1969).

Sesalno zaganjanje omogoča sesalna zapora (merjenje K 18, sl. 8). Dobimo ga v ozkem območju nad  $K_1$ . Zaradi plitkega sifona sesalne zapore tudi

manjši pretoki mečejo mehurčke iz zaprtega sistema. Upor zraka toliko pade, da iztok preseže dotok. Statični pritisk vode v zbiralniku ima manjšo in srk sesalne zapore večjo vlogo kot pri višinskem zaganjanju. Delovanje sesalne zapore najlažje razumemo, če predpostavimo, da so upor zraka ter statični in dinamični pritisk vode nespremenljivi. Izhajanje zraka povzroča dvigovanje vode v vstopnem kraku zapore in podpritisk v sistemu se večja. Značilno za sesalno zaganjanje je počasno naraščanje iztoka. Med maksimumom se v padajočem delu rova ne vzpostavi polna svetlina vode. Po vsrkanju zraka iztok podobno kot pri višinskem zaganjanju hitro pade.

Nihalno zaganjanje srečamo pri zaprtih nategah. Opazovali smo ga pri modelu D (sl. 3). Nihanje polnih svetlin vode povzroča spreminjanje iztoka. Samostojno nastopa v določenem območju dotokov, ki so manjši od minimalnega kritičnega dotoka. Med minimumom se lahko kombinira z višinskim zaganjanjem. Zrak nastopa v vlogi prenašalca pritiskov. Energija vode ima podoben učinek kot uteži pri stenski uri in preprečuje, da bi nihanje zamrlo. Z daljšanjem aktivnega rova se povečuje trajanje periode.

Pasivno zaganjanje je samostojno (merjenje H 9, sl. 5) ali se kombinira z višinskim zaganjanjem (merjenji J 14 in J 15, sl. 7). Če ga kombiniramo z višinskim zaganjanjem, podaljša maksimume in obdobja nizkih iztokov za izbruhom. Povzroča ga slap ali dovolj izrazita brzica v zbiralniku. Razpenjena voda vnaša zrak v vodni rov. Med upadanjem vode v zbiralniku vedno več mehurčkov doseže ustje rova in količina zraka v sistemu se večja. Upor narašča. Pretok se manjša. Ko iztok postane manjši od dotoka, se prične gladina v zbiralniku dvigati. Vedno manj mehurčkov doseže vhod v rov. Končno se dovajanje zraka prekine. Statični pritisk vode se večja. Pretok narašča in voda odnaša vedno več zraka iz dejavnega rova. Nazadnje odnese vsega. Ko iztok postane večji od dotoka, prične voda v zbiralniku upadati. Ob ugodnih pogojih se pojav periodično ponavlja. Teoretično bi posebno obliko pasivnega zaganjanja lahko povzročilo sproščanje zraka ob hitrem padanju zračnega pritiska ali kakršnokoli dotekanje s plini pomešane vode.

Poleg osnovnih oblik zaganjanja moramo vsaj teoretično dopustiti sekundarno zaganjanje, ki ga omogoča povezava zbiralnika ali dejavnega dela vodnega rova s sekundarnim izvirom.

Če manjšamo dotok, dosežemo pri vseh oblikah zaganjanja stopnjo, ko delovanje ni več mogoče. Spodnjo mejo zaganjanja smo imenovali minimalni kritični dotok. Ker je območje delovanja najbolj jasno razmejeno pri višinskem zaganjanju, se bomo pri nadaljnjem izvajanju omejili nanj. Dotoke, ki so manjši od  $K_1$ , zaganjalka prepušča, ne da bi se vodna gladina v zbiralniku toliko dvignila, da bi v dejavnem vodnem rovu dosegli sprožilni pretok. O sprožilnem pretoku govorimo takrat, ko voda prične množično odnašati zrak. Upor hitro pada in praviloma sledi izbruh. Sprožilni pretok je odvisen od preseka vodnega rova in od višine kolen. Preko plitkih negativnih kolen vodni tok lažje poriva zrak kot preko globokih. Poskusi so pokazali, da je pri zaprtih sistemih  $K_1$  večji, če dotok višamo, kot če ga nižamo. Pojav najlažje prikažemo s sesalno zaporo. Značilno zanjo je, da tudi majhni pretoki porivajo zračne mehurčke preko nizkega negativnega kolena. Če nizko vodno stanje traja dalj časa, so izgube zraka velike. Ko se prične dotok večati, srk zapore in manjša količina

zraka omogočata nemoteno odvajanje tako velikih pretokov, ki bi pri nižanju dotoka povzročali zaganjanje. Pri tem se moramo zavedati, da vsako ponižanje rova, v katerem se vodna gladina dotika stropa, lahko deluje kot sesalna zapora.

Poskusi kažejo, da je pravilno zaganjanje bolj izjema kot pravilo. Razlike v vsrkani količini zraka, njegovem morebitnem vračanju v zbiralnik, njegovem odvajanju v izvir, premikanju večjih zračnih mas, vzpostavitvi sesalnega delovanja natege ali zračne zapore, višini vode v zbiralniku ob začetku vsrkavanja zraka in poteku odtokanja vode po vsrkanju zraka povzročajo različno velike časovne in količinske nepravilnosti zaganjanja. Posebej opozarjamo na znatno manjše maksimalne iztoke, ki jih dobimo takrat, ko se polni lumen vode vzpostavi samo v zgornjem delu padca dejavnega rova in ne v vsej njegovi dolžini.

Če zanemarimo kratke padce iztoka takoj za izbruhom, ki bi jih daljši vodni rov med sistemom in izvirov zabrisal, smo pri merjenjih J 11, J 12 in J 13 (sl. 6, 7) kljub spreminjanju dotoka dobili enake minimalne iztoke. Rezultat se ujema z nekaterimi terenskimi opazovanji (P o d o b n i k, 1968). Kaže, da je po izbruhu podpritisek v rovu, ki ga vzdržuje zračna zapora, kljub različnim količinam zraka približno enak. Obratno pa  $h_v$  in  $Q_2$  kažeta odvisnost od količine zraka v dejavnem rovu. Manjše zračne mase voda lažje porine po padajočih delih aktivnega rova. Ker pri merjenju J 13 količina vsrkanega zraka ni tako velika kot pri J 12, sta  $h_v$  in  $Q_2$  v povprečju manjša. Pričakovali bi, da bosta  $h_v$  in  $Q_2$  največja pri J 11, vendar imamo pri tem merjenju velike izgube zraka zaradi dolgega trajanja minimumov. Merjenje J 13 kaže, da je bil pri izrazitih kolenih sprožilni pretok uporabljene cevi okrog 0,7 l/s, ker iztok 0,65 l/s ni vedno vodil v izbruh.

Če se dotok približuje maksimalnemu kritičnemu dotoku, ki označuje zgornjo mejo zaganjanja, postaja delovanje vedno bolj nepravilno (glej merjenji C 4 in J 13). Količine vsrkanega zraka niso enake. Druga spremenljivka je masa zraka, ki jo ob vsrkanju odnese v izvir. Približujemo se stopnji, ko po  $K_2$  nastopi stalno srkanje zraka. Območje stalnega srkanja zraka je sorazmerno široko. Če dotok še naprej večamo, prej ali slej pridemo do stopnje, ko se gladina vode v zbiralniku prične dvigati in srkanje zraka počasi preneha. Nivo vode se ustali na višini, ki povzroča enako velik odtok, kot je dotok v zbiralnik. Za raziskave je pomembno, da je  $Q_2$  znatno večji od  $K_2$ . Pri merjenjih G 8 in K 17 znašata  $K_2$  okrog 55 % vrednosti maksimalnih iztokov.

Merjenja so pokazala, da voda med minimumom ne preneha teči pri razvlečni nategi (model A), sistemih brez kolen (modela E, F), sistemu z negativnim kolenom (model I), vseh zaprtih sistemih (modeli B, D, G, J, K), pasivnem zaganjanju (model H), sesalnem zaganjanju (merjenje K 18) in celo odprtih nategah, če se dotok približuje vrednosti  $K_2$  (merjenje C 4). Če povzamemo, iztok pri večini poskusov ni bil prekinjen, kar se ujema s terenskimi opazovanji.

Neprekinjen iztok verjetno največkrat omogoči zračna zapora, ki zapre sistem proti izvirov in po izbruhu zadržuje v njem podpritisek. Srk lahko povzroča iztekanje vode iz zbiralnika tudi takrat, ko je gladina vode v njem nižja od najvišjega dela aktivnega rova. Popolnoma različen je učinek zapore v drugem delu minimuma, ko ovira odstranjevanje zraka iz mehanizma in se mora gladina v zbiralniku bolj dvigniti kot pri odprtih sistemih (primerjaj merjenje F 7

in G 8). Zaradi večjih  $h_v$  in  $Q_1$  se povečajo  $Q_2$ , čas trajanja maksimuma in čas trajanja minimuma.

Model K nam je pomagal odgovoriti na vrsto vprašanj, ki so se porajala med večletnim eksperimentiranjem, terenskimi opazovanji in študijem literature. Z večimi nizkimi pozitivnimi koleni smo vodi olajšali odnašanje zraka, ne da bi preveč zmanjšali njegov upor. Voda v sodu je zadosti narasla, da je prej prišlo do izbruha, kot bi njen statični pritisk zaradi naraščajočega odtoka postal premajhen. Dodali smo sesalno zaporo, ki je bistveno prispevala, da smo z nizkimi dotoki dosegli sprožilni pretok (merjenje K 17, sl. 8). S kombinacijo nizkih kolen in sesalne zapore smo  $K_1$  znižali z 0,6 na 0,17 l/s.  $K_1$  je 17-krat manjši od maksimalnega iztoka med delovanjem.  $Q_2$  je od 140 do 580-krat večji od  $Q_1$ . Model K nam daje več možnosti za razlago delovanja Lintverna ob zelo nizkem dotoku kot klasična natega (H a b i č, 1970). Obetaven za nadaljnja raziskovanja je model G (sl. 4), pri katerem je  $K_1$  brez sesalne zapore znašal 0,3 l/s.

Če smo pri modelu K dotok počasi višali, smo dobili sesalno zaganjanje ob povprečnem pretoku, ki bi pri nižanju dotoka povzročal popolnoma drugačno višinsko zaganjanje. S počasnim večanjem dotoka nad območje sesalnega zaganjanja nam je uspelo doseči, da sistem ni deloval. Tudi dotok 0,8 l/s, s katerim smo izvedli večino merjenj, je brez zaganjanja tekel skozi mehanizem. Vzporedno z večanjem dotoka se je daljšal polni lumen v padajočem delu aktivnega rova in s povečevanjem srka omogočal sprotno odtekanje vode.

Cikluse dveh vrhov smo dobili pri odprti nategi v delu merjenja C 3 (sl. 2). Merjenje J 13 (sl. 7) nakazuje, da v področjih velikih dotokov lahko nastanejo ciklusi tudi pri zaprtih sistemih, kar se sklada z merjenji Zaganjalke (P o d o b n i k, 1968).

Odvisnosti  $K_1$  od  $Q_1$  med delovanjem nam ni uspelo spraviti na skupni imenovalc. Poskusi so pokazali, da odnos med dotokom in minimalnim iztokom ni pri vseh sistemih enak. Za razliko od modela J (merjenja J 11, J 12, J 13; sl. 6, 7) smo pri modelu K (merjenji K 16, K 17; sl. 8) zabeležili opaznejše spremembe minimalnih iztokov pri spreminjanju dotoka.

S poskusi smo odkrili možni vzrok za zatajitev zaganjanja. Tudi za različne načine delovanja ene in iste zaganjalke, ki jih ne moremo pojasniti s spreminjanjem dotoka pri odprti nategi, smo dobili nekaj odgovorov (P o d o b n i k, 1968). Z ugotovitvijo, da ob istem dotoku lahko dobimo različne oblike zaganjanja, pa smo prehiteli naravo, ki bi nam prej ali slej zastavila tudi to vprašanje.

### Posvetilo in zahvala

Študijo posvečam mami in očetu, ki sta kljub surovim zahtevam življenja vedno našla razumevanje za moje nepridobitvene dejavnosti.

Zahvaljujem se prof. Janki Frančeškin, prof. Olgi Šušmelj in dipl. ing. Andreju Campolunghiju za prevode. Hvala Rajku Gorjanu za izdelavo tehničnih pripomočkov, Andreju Albrehtu za risanje slik ter sinovoma Primožu in Petru za pomoč pri merjenju.

## LITERATURA

- Aljačič, M., 1984: Človeška ribica v dolenskem krasu in njegovem obrobju. Naše jame, 26, 39—45.
- Bridge, J., 1923: Ebb and Flow Springs in the Ozarks. School of Mines and Metallurgy. University of Missouri. Bull. nov., 17—26.
- Habič, P., 1970: Intermitentni kraški izvir Lintvern pri Vrhniki. Acta carsologica 5, 189—203.
- Imbeaux, E., 1930: Essai d'hydrogéologie. Paris: Dunod, 146—8.
- Mangin, A., 1969: Etude hydraulique du mécanisme d'intermittence de Fontestorbes (Belesta — Ariège). Ann. Spéléol. 24, 253—99.
- Mangin, A., 1975: Constitution et fonctionnement des aquifères karstiques. Ann. Spéléol., 30, 88—92.
- Marković, Dj. J., 1963: Homoljska potajnica. Glasnik srpskog geografskog društva, 43, 117—26.
- Podobnik, R., 1968: Zaganjalka. Idrijski razgledi, 13, 64—7.
- Valvasor, V. J., 1984: Slava vojvodine Kranjske. Ljubljana: Mladinska knjiga, 94—6, 106—8.
- Verdeil, P., 1962: Les phénomènes d'intermittence dans les réseaux karstiques. Actes du deuxième congrès international de spéléologie. Instituto Italiano di Speleologia, Castellana — Grotte, 62—78.

**THE EXPERIMENT RESULTS WITH EBB AND FLOW  
SPRING MODELS**

Summary

The intermittent springs are rare and interesting karst springs exhibiting periodic variations in volume of flow. Most of the experts explain their function by siphon.

In 1689 J. V. Valvasor (1984), describing spring Lintvern near Vrhnika, for the first time explained the function of intermittent spring by siphon. The siphon theory prevailed for three centuries although all the observed phenomena could not be explained by it. The authors were disturbed by the outflow during the minimum discharge which was the case at most of intermittent springs. Temporal and quantity irregularities were explained by combination of several siphons (Darcy cit. E. Imbeaux, 1930; D. Marković, 1963), by air pumping through the walls of nook shaped channel (J. Bridge, 1923) or by air system (R. Podobnik, 1968). Podobnik has noticed different forms of emergence during the inflow changes, the appearance of cycles at greater inflows and stop of working.

In order to widen the knowledge on the ebb and flow springs and to answer to some of the questions we studied their function by the help of models for several years. The measurements were achieved in a steep gulch. The water was directed into concrete trough which once served for small power plant. Six differently thick tubes were attached to it used as siphons for the water inflow into the catchment basin. On the upper part opened metal barrel with inner diameter of 57 cm and 86 cm high was used as reservoir. An two opposite sides in the barrel two meters for water height control were fixed. The water surface in the reservoir has 25,52 dm<sup>2</sup>. To the edge of the bottom the metal joining piece with useful diameter of 37 mm was installed. For different realization of water channel we used 12,3 m long plastic

tube with inner diameter of 43 mm and 6 mm thick walls. Relatively thick walls at convenient great radii of curving have prevented the tube bending to acute angles, which would diminish the permeability and disturb the experiment. At used altitude differences ( $h$  was never higher from 2 m) we did not perceive, that subpressions would squeeze the tube noticeably. In spite of thickness the walls were transparent enough to observe the moving and point of air retention. Deliberately we have chosen the tube of greater diameter to approach the natural conditions the most.

At outlet the length of jet was measured each 5, 10 or 15 seconds regarding the frequency of discharge ( $Q$ ) changes. By the help of vessels of measure and stop-watch at least three times too and the average was calculated. 15 % mistake is possible. the average was calculated. The received results were graphically presented and eventual aberrations were corrected. At inflow tubes the discharge ( $q$ ) was measured at least three times too and the average was calculated. 15 % mistake is possible.

#### List of conventional signs

H	level difference between the beginning and the end of tube gradient ( $h$ on figures)
$H_1$	level difference between the end of tube and the lowest part of tube
$H_2$	level difference between the beginning and the highest part of tube
K	released inflow
$K_1$	minimum critical inflow
$K_2$	maximum critical inflow
l	litres
min	minutes
P	average duration of periods
q	inflow, average rate of flow respectively
$Q_1$	minimum discharge
$Q_2$	maximum discharge
s	seconds
T	duration of individual periods
V	volume of water accumulated in the reservoir between the levels $h_n$ and $h_v$ (during one period)
$h_n$	the minimum depth of water in the reservoir, measured from the top of the tube hole
$h_v$	the maximum depth of water in the reservoir, measured from the top of the tube hole

**Model A** (Fig. 1) represents the extended siphon distinguished by small level difference and relatively long falling leg of siphon. On the model A we have measured A 1.

**Model B** (Fig. 1) is closed extended siphon. We got it so that on the model A air block was installed before the outlet presenting negative nook, siphon in true meaning of word respectively. On it the measurements B 2 were done.

**Model C** (Fig. 2) is opened siphon. Opened system differs from the closed one by not having the air block. On the model C the measurements C 3 and C 4 were done.

**Model D** (Fig. 3) presents the closed siphon. It was received by adding the air block to model C. The lowest part of the air block is 35 cm lower than the positive following nook, 5 cm lower than the tube end respectively.

**Model E** (Fig. 3). Models E and F are without positive or negative nooks. Without doubt they present the most simple form of intermittent spring. In spite of simplicity or just because of it such mechanism was not found in the literature and hence this is the original realization. With Model E the measurements E 6 were done.

**Model F** (Fig. 4) differs from the model E because of greater level difference between the beginning and the end of the tube. The measurements F 7 were done with it.

**Model G** (Fig. 4) was achieved by adding to model F the air block. The measurement G 8 were done with it.

**Model H** (Fig. 5) has no difference between the beginning and the end of the tube. It can work only if the inflow into reservoir is such that the water around the entrance to the tube is bubbling.

**Model I** (Fig. 5) has the negative nook just behind the reservoir. It belongs to opened systems. The measurements I 10 were done with it.

**Model J** (Fig. 6) was transformed from the model I. It is composed by two negative nooks just behind the reservoir and air block before the straight outflow part. The measurements J 11, J 12 and J 13 differs by inflow ( $q$ ) only. While measuring J 14 and J 15 the effect of bubbling water was added to the emergence because of water fall (height emergence). It was caused by the cascade in the reservoir (passive emergence).

**Model K** (Fig. 8) is a special closed siphon. Instead of one high positive nook there are four low nooks high ( $H_0$ ) (in the direction of flow) 5, 6, 6 in 4 cm. They are followed by constant falling piece of tube passing without interruption to pumping block. Pumping block is shallow form of air block. On the model K it is 5 cm lower only from following positive nook. The lowest part of the pumping block and the outlet of the tube have the same height. At model K the measurement K 16, K 17 and K 18 were done.

On the base of the model experiments the author divides the intermittent springs into four basic forms:

**Height emergence** is caused because of level difference between the beginning and the end of the active passage ( $H$ ). When during the maximum the water table in the reservoir is lowered enough ( $h_1$ ) the outflowing water causes aero wash in the water channel. Resistance increases instantaneously and the outflow ( $Q$ ) is smaller or cut off. The water level in the reservoir starts to raise. The static pressure ( $h$ ) increases. Water transports more air from the active channel. When released discharge ( $K$ ) is restored the water starts to transport the air in great quantities and outburst follows. Falling channels without nook (models E and F), water channels with negative nook (model I), and all the closed systems (models B, D, G, J, K) belong to it. Opened siphon (model C) is a special form of height emergence known for a long time already where the release factor is re-establishment of enough long lumen of water in the falling leg of the positive nook. Extended siphon (model A) is a form of opened siphon with slow restoration of full water lumen in the initial part of the outburst and slow water outflow from the channel after the aero wash.

**Pumping emergence** is rendered possible by the pumping block (measurements K 18, Fig. 8). We got it in narrow area above the  $K_1$ . Because of shallow siphon of pumping block smaller discharges ( $Q$ ) throw bubbles from the closed system. The air pressure diminishes so much that the outflow ( $Q$ ) surpasses the inflow ( $q$ ). Static water pressure in the reservoir plays smaller and aero wash greater role than at height emergence. Characteristic for the pumping emergence is slow outflow ( $Q$ ) increase. After aero wash the outflow ( $Q$ ), similar as at height emergence, decreases quickly.

**Swinging emergence** is met at closed siphons. The author observed it at the model D (Fig. 3). The oscillation of full lumens of water causes the outflow ( $Q$ ) change. Independently it occurs in particular inflow ( $q$ ) areas, which are smaller than minimal critical inflow ( $K_1$ ). During minimum it can be combined with height emergence. The air plays the role of pressure transporter. At each swinging the water flows off the

positive nook and from air block to the spring. While measuring D 5 (Fig. 3) the swinging was stopped when the outflow ( $Q$ ) increased to 0,45 l/s. Period was 6 s. By prolongation of active channel the period duration is longer.

**Passive emergence** is independent (measurements H 9, Fig. 5) or combined with height emergence (measurements J 14, J 15; Fig. 7). It is caused either by cascade or enough expressive rapid in the reservoir. Bubbling water introduces the air into water channel. During the water decrease in the reservoir there are always more bubbles reaching the channel mouth and the air quantity in the system is increasing. The resistance increases. The discharge ( $Q$ ) decreases. When the outflow ( $Q$ ) becomes smaller than the inflow ( $q$ ) the level ( $h$ ) in the reservoir raises. Less bubbles reach the entrance of the channel. Finally the air introducing is stopped. Static pressure of water increases. Discharge ( $Q$ ) increases and water transports more and more air from the active channel. When the outflow ( $Q$ ) becomes greater than inflow ( $q$ ) the water in the reservoir decreases. The author thinks that the special way of passive emergence could be caused by air set free at quick falling of air pressure or by any inflow of water mixed by gases.

Beside special forms of emergence the author allows the existence of secondary emergence rendering possible the connection of reservoir or active channel part with secondary spring.

The inferior degree was called minimal critical inflow ( $K_1$ ). The experiments have shown that at closed systems the minimal critical inflow is greater if the discharge ( $q$ ) is increased than if it is decreased.

With experiments the author stated that temporal and quantity regular emergences are more exception than rule. The irregularities occur because of changeable air properties, because of difference in restoration of pumping effect of full lumen of water in falling parts of the channel and different water outflow after the aero wash. He paid special attention to considerable smaller maximal outflows ( $Q_2$ ), occurring when the whole lumen is established in the upper part of the active channel and not in its entire length.

In the inflow ( $q$ ) approaches to maximal critical inflow ( $K_2$ ) marking upper limit of activity, the height emergence becomes more and more irregular (measurements C 4, Fig. 2; J 13, Fig. 7). At inflow ( $q$ ) increase above  $K_2$  the area of permanent air pumping and then the area of water level increase in the reservoir was obtained. For the researches it is important that  $Q_2$  is considerably greater than  $K_2$ .

At most of the experiments the outflow ( $Q$ ) existed during the minimum too corresponding to field observation.

The author discovered the important role of air block and its special form pumping block. The air block is negative nook, siphon in a true meaning the word respectively. The water in it acts as an air valve. After outburst it retains subpressure in the system. The sip can cause the outflow of the water from the reservoir even then when the water level in it is lower from the highest part of the active channel. In the second part of minimum the air block prevent the air moving from the mechanism and the water level in the reservoir has to be raised more than in opened systems.

At model K (Fig. 8) with the help of pumping block and formation of several low positive nooks the author succeeded to lower the minimal critical inflow ( $K_1$ ) from 0,6 l/s to 0,17 l/s (measurements K 17, Fig. 8). If at the model K the inflow increases slowly it obtains the pumping emergence (measurements K 18, Fig. 8) at average discharge ( $Q$ ) which would cause completely different, altitude emergences at inflow ( $q$ ) decrease (similar to measurement K 17, Fig. 8). With slow inflow ( $q$ ) increase above the area of pumping emergence he succeeded to attain that in the area of inflow ( $q$ ) 0,3—0,92 l/s the system did not work. In the pumping block the



air bridge was established. Simultaneously parallelly to inflow ( $q$ ) increase the full lumen in the falling part of the active channel was lengthened and rendered possible with sipping increase the proportionate water outflow.

The experiments have shown that the rate between the inflow ( $q$ ) and minimal outflow ( $Q_1$ ) is not equal at all the systems. In distinction from model J (measurements J 11, J 12, J 13; Fig. 6, 7) were at the model K (measurements K 16, K 17; Fig. 8) noticed essential changes of minimal outflow ( $Q_1$ ) during inflow ( $q$ ) changing.

The cycles of two peaks were received at the opened siphon in a part of measurement C 3 (Fig. 2). The author thinks that the measurements J 13 (Fig. 7) infer that in the area of great inflow ( $q$ ) recurring in cycles can appear at closed systems too.