

## NEKATERI METRIČNI PROBLEMI UDORNIC

France Šušteršič\*

O oblikah in podobnih lastnostih kraških poglobitev, ki jih običajno imenujemo udornice, je bilo že dosti napisanega. Manj pa so proučena njihova svojstva, ki jih ugotovimo s terenskim merjenjem. Pri pregledovanju teh metričnih lastnosti najdemo razlago za marsikak navidezen paradoks, ki ga zgolj na kvalitativen način ne moremo razložiti.

## Nastanek udornic

Po definiciji v Slovenski kraški terminologiji (Gams, 1973), je udornica »depresijska oblika z očitno udornim nastankom nad votlino«. Osnovni pogoj, da se začne v globini rušiti kraška votlina je, da so dimenzije votline večje od najmanjšega homogenega bloka matične kamnine (t. j. bloka, omejenega z lezikami, počmi in drugimi diskontinuitetnimi ploskvami), ki ga bomo v nadaljnjem imenovali kar osnovni blok kamnine. Če je votlina manjša od kamna, ki naj bi vanjo padel, je jasno, da podora ne more biti. Pri tem izvzamemo redke primere, ko šele napetosti v stropu povzročijo drobljenje sicer homogene kamnine in podor.

Običajno ne vprašujemo o izvoru te votline. Njihova oblika, lega in nekateri tamkajšnji jamski vhodi so pač vsilili mnenje, da so udornice nastale z rušenjem jamskih prostorov, ki so jih izvotlile ponornice. Ker pa vse kaže, da nastajajo, vsaj pri nas, brezna tudi od spodaj navzgor (Maucci, 1951/52, Horvat, 1953), so torej vsa naravno odprta brezna po tej definiciji prav tako udornice. Tudi kriterij, ki pripisuje udornicam veliko prostornino (Kunaver, 1957), ne daje jasne opredelitve. Če odmislimo velika mehiška brezna — velikane, t. j. sòntane,<sup>1</sup> kakršnih pri nas ni (glej: Courbon, 1972) in ki s svojo prostornino prekašajo celo naše največje udornice, nam ostane še vedno nekaj domačih korozijskih tvorb, katerih prostornina vzdrži vsako primerjavo s prostorninami jamskih dvoran. (Glej tabelo 1.)

\* Služatelj geologije (in geografije), Odsek za geologijo, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, 61000 Ljubljana, YU, Aškerčeva 12, glej izvleček na koncu zvezka.

Tabela 1 — Table 1

| Ime brezna — Name          | Kraj — Place      | Vertikala <sup>2</sup> | Volumen <sup>3</sup>          |
|----------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------------|
| Gigantsko brezno           | Triglavsko brezno | 185 m                  | $9,18 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ |
| Vela Kumbašeja             | Kanfanar          | 155 m                  | $7,72 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ |
| Brezno pri Oglenicah       | Javornik          | 190 m                  | $5,57 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ |
| Brezno na Vodica (not.)    | Banjšćice         | 180 m                  | $2,85 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ |
| Brezno pri Zg. Lenč. cesti | Snežnik           | 160 m                  | $2,26 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ |
| Lauf                       | Trnovski gozd     | 152 m                  | $1,44 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ |
| Brezno na Leupah           | Banjšćice         | 250 m                  | $0,97 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ |
| Lipiško brezno             | Sežana            | 210 m                  | $0,81 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ |

Navedena brezna se po prostorini<sup>4</sup> le malo razlikujejo od velikih jamskih dvoran v zaledju izvirov Ljubljaničice (Sušteršič, 1973). Zaradi navpične izoblikovanosti je njihov volumen pač manj opazen. Pri rušenju pa to nima večjega pomena in lahko pričakujemo, da je vsaj nekaj udornic nastalo s podiranjem takšnih, vase zaključenih prostorov. Verjetno velja to predvsem za konte, ki so sicer v marsičem podobne udornicam (Sušteršič, o. c.). Od pravkar navedenih brezen jih najdemo kar šest na ozemlju, kjer nastopajo tudi konte. Poleg teh pa je tamkaj še več le malo manjših prepadov.

S tem pomembnim vprašanjem se v tem sestavku ne bomo več ukvarjali. Obravnavali bomo kraške poglobitve, katerih poreklo iz vodoravnih jam ni posebno dvomljivo.<sup>5</sup> Kljub temu pa zgoraj opisanega tipa udornic ne smemo zanemariti.

Drugo vprašanje je, kdaj seže podor do površja in potem tam zacija udornica. Vemo namreč, da kup raztresenih opek zavzame večjo prostornino, kot če bi to opeko zložili. V jami to pomeni, da ko se podere 1 m debela plast stropa, nasutina ne bo debela samo 1 m, temveč nekaj več. To lahko izrazimo z enačbo:

$$v = v_0 + d - kd = v_0 + d(1 - k) = v_0 - d(k - 1) \quad (1)$$

kjer pomeni:  $v_0$  prvotno višino stropa

$v$  višino stropa v trenutku opazovanja

$d$  debelino stropa, ki se je odkrušila do trenutka opazovanja

$k$  koeficient razrahljanosti, ki znaša od 1,2 do 1,5.

V zgornji enačbi ima seveda ( $v_0$ ) stalno vrednost, izraz  $[d(k - 1)]$  pa se povečuje dokler končno ne doseže ( $v_0$ ). Tedaj votline zmanjka in rušenje se ustavi. Kje se to zgodi, je odvisno od višine jamskega stropa. Za vso jamo lahko te točke izračunamo s pomočjo prereзов in na ta način pridemo do *maksimalne črte rušenja* (Sušteršič, 1968). Položaj le-te se med rušenjem ne menja (sl. 1B); ko jo podor doseže, se podiranje ustavi.

Pogoj za nastanek udornice je torej izpolnjen, če je ob koncu odnašanja iz inicialne dvorane zadoščeno neenačbi:

$$D < \frac{v_0}{k - 1} \quad (2)$$

kjer pomeni:  $v_0$  in  $k$  isto kot prej  
 $D$  pa debelino stropa.

V tem primeru poteka *maksimalna črta rušenja* nad površjem in lahko nastane udornica, katere globino v trenutku nastanka kaže enačba:

$$g = v_0 - (k - 1)(h_0 - v_0) \quad (3)$$

kjer pomeni:  $v_0$  in  $k$  isto kot prej

$g$  globino udornice

$h_0$  razdaljo med prvotnim dnom jame in zemeljsko površino ( $h_0 = v_0 + D$ ).

Enačbo (3) izpeljemo iz enačbe (1).

Vidimo torej, da je kota dna udornice v trenutku nastanka neposredno odvisna le od višine prvotnega jamskega stropa in od debeline skalovja nad rovom. Sam nivo prvotne jame pa ni važen in je zato sklepanje o globlinah jamskih etaž glede na kote dna udornic (Habič, 1963) brez osnove. Smiselno bi bilo edino v primeru ko bi mogli predpostaviti, da je voda mehanično odnašala material iz inicialnih dvoran do trenutka, ko so bili stropi povsod enako debeli. Ko pa bi se začeli podirati, pa bi odnašanje ponehalo.

### Obod, plašč in žrelo udornic

Natančnejšemu opazovalcu jamskih dvoran in udornic postane kmalu razvidno, da so udornice v splošnem bolj okrogle od jamskih dvoran, kar še zlasti velja za tiste, ki so bolj podrte. Jamske dvorane izdelava voda pač tako, da v matični kamnini izdolbe mesta z najmanjšim odporom. Zato so jamske dvorane precej nepravilnih oblik. Ko pa se strop in deloma tudi stene dvorane krušijo, celotni prostor polagoma potuje navzgor, podobno kot zračni mehurček skozi med. Krušenju so podvrženi predvsem vbočeni predeli sten. Zato dobiva pri potovanju navzgor dvorana vse bolj okroglo obliko, ki končno od prave krožnice odstopa le za velikostni red osnovnih blokov kamnine. To lahko prikažemo tabelarično:

Tabela 2 — Table 2

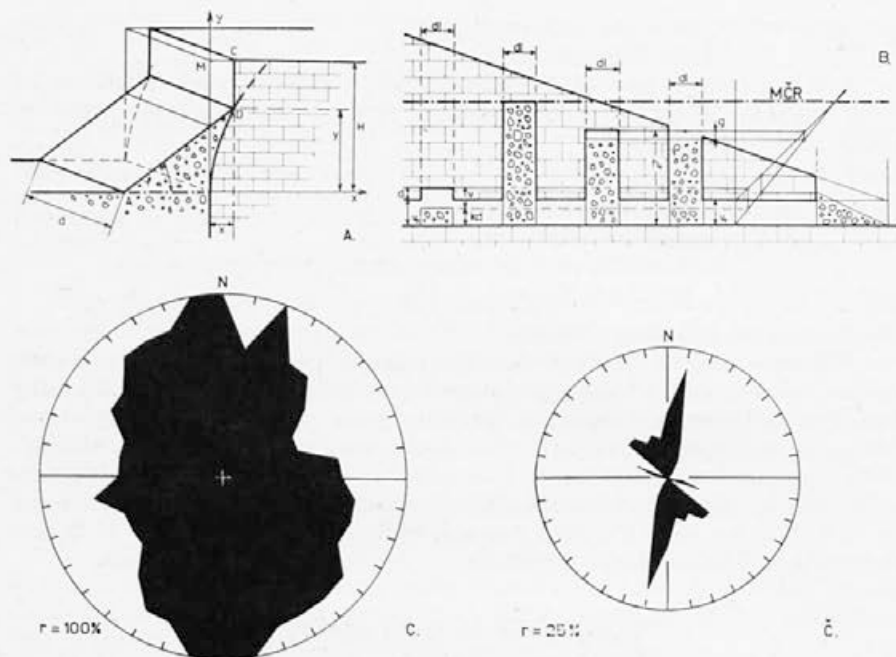
| Ime jame oz. dvorane<br>Name of the cave or big room | Približen<br>dvig dna ( $\Delta h$ ) | Zaokroženost ( $\varrho$ ) |
|--|--------------------------------------|----------------------------|
| Ziglovica  | 10 m                                 | 0.296                      |
| Velika Strašca                                       | 88 m                                 | 0.474                      |
| Jama za Bukovim vrhom                                | 150 m                                | 0.701                      |
| Brezno pri Medvedovi konti                           | ?                                    | 0.764                      |

Med *zaokroženostjo*<sup>6</sup> in prevaljeno potjo obstaja funkcijska zveza. Privzamemo osnovno enačbo:

$$y = 1 - e^{-x},$$

ki jo priredimo za naš primer:

$$\varrho = 1 - e^{-\Delta h}, \quad (4)$$



Sl. 1 A Izvajanje mejne krivulje med meliščem in steno.  
 B Izvajanje in efekti *maksimalne črte rušenja*.  
 C Frekvence sten obravnanih udornic.  
 Č Frekvence slednic razpok v Gorjupovem laz.

Fig. 1 A Derivation of the limiting curve between the scree and the wall.  
 B Derivation and effects of the maximum line of collapsing.  
 C Frequencies of walls of treated collapse dolinas.  
 Č Frequencies of tectonic cracks in the Gorjupov laz (near Vrhnika).

kjer pomeni:  $\varrho$  zaokroženost jamskega prostora  
 $\Delta h$  poprečna pot jamskega dna proti površju  
 $e = 2,718$  (osnova naravnih logaritmov).

Krivulja se asimptotično približuje vrednosti ( $\varrho = 1$ ). Ker smo v naravi omejeni z velikostnim redom osnovnega bloka kamnin, se resnična vrednost funkcije približuje vrednosti izraza:

$$a = \frac{\sqrt[3]{V}}{\sqrt[3]{V} - \frac{1}{2} \sqrt[3]{v}}$$

kjer pomeni:  $V$  prostornino jamske dvorane  
 $v$  prostornino osnovnega bloka kamnine.

Pri tem smo zanemarili dejstvo, da se prostornina votline, ko se širi navzgor, zmanjšuje v smislu enačbe (1). Dinamika zaokroževanja je odvisna od velikostnega reda osnovnih blokov kamnine in drugih lo-

kalnih lastnosti. Te vplive vnesemo v enačbo tako, da neodvisno spremenljivko ( $\Delta h$ ) pomnožimo s funkcijo:  $b = F(a)$ , ki jo moramo dobiti z merjenjem na terenu.

Končno tudi vemo, da zaokroženost nobene dvorane v začetku ni enaka nič, temveč, da ima določeno prvotno vrednost ( $q_0$ ). Njena funkcija ( $c$ ) premakne graf [ $q = F(\Delta h)$ ] toliko v levo, da je za ( $x = \Delta h = 0$ ), vrednost ( $y = q = q_0$ ). Končna enačba soodvisnosti prevaljene poti in zaokroženosti dvorane je:

$$q = a - e^{-b(\Delta h + c)} \quad (5)$$

Dobili smo enačbo iz familije krivulj, kjer dobimo posamezne članice z variranjem konstant in pomožnih funkcij, ki naj jih da terensko merjenje.

Očitno je, da ima vsaka jamska dvorana v začetku svoj ( $q_0$ ), ki ga ne moremo določiti. Zato bo šel razvoj vzdolž krivulje, katere potek moremo določiti le približno, če  $q_0$  izberemo glede na razmere v okoliških jamah.

Odvod funkcije (5) je:

$$\frac{dq}{d\Delta h} = be^{-b(\Delta h + c)} = \frac{1}{be^{b(\Delta h + c)}}$$

in je torej ulomek, katerega vrednost se hitro približuje ničli. Razlike v zaokroženosti dvoran so že pri nekoliko večjem dvigu tako majhne, da dobesedno izginejo ob velikostnem redu osnovnih blokov kamnine, torej pričakovani merski napaki. Zato ne moremo dovolj natančno določiti poteka te krivulje za primere v naravi, s tem pa tudi ne moremo na ta način določati globine prvotnih jamskih etaž.

Končno jamska dvorana zazija s prvim žrelom na površju in vanjo začne vdirati zunanji zrak. Krioklastični pojavi močno pospešijo krunjenje. Stene, ki so morale doslej nositi strop in prenašati močne vodovodne obremenitve, se brž razbremenene. Temu pa masa, ki se je pri prejšnjih, mnogo počasnejših procesih, sprti prilagajala spremembam v obremenitvi, ne more več slediti. Nastanejo značilne robne počvi, ki kot venci obrobljajo udornice in segajo ponekod precej globoko. Najznačilnejše so menda v Veliki Smrečnici pri Planini ter v Bukovniku pri Divači, kjer je nastala v robni počvi pravcata jama (Kat. A št.: 3259). Seveda pa je malo verjetno, da bi tako nastajale nove frakture; zazijajo le tektonske špranje, ki so že prej potekale pravokotno na pritiske. Teh pa pri živahni tektoniki v naših krajih nikjer ne manjka.

Pri dosedanjem izvajanju smo predpostavljali, da se skoraj izključno rušijo strop in izpostavljeni deli sten. Kot malo pomembne smo izključili vse druge dejavnike rahljanja (Sweeting, 1972), razen korozije. Votlina v živi skali, ki bi jo dobili, če bi v trenutku, ko se zruši zadnji preostanek oboka, odstranili melišča, bi imela v spodnjem delu obliko prizme, na vrhu pa obliko bolj ali manj pravilnega valja. Ker nas zanima predvsem gornji del, imenujmo to fazo prehoda jamske dvorane v udornico *cilindrično rušenje*. V Renaultovem (1967/68) smislu lahko ves proces spreminjanja prvotne jamske dvorane v globini v udornico na površini, definiramo kot *kumulativno rušenje*.

Navpične stene so v labilnem ravnotežju in izpostavljene vsem mogočim vplivom. Zato se rušijo naprej, podrtine pa se kot melišča kopičijo ob vznožju. Ta polagoma naraščajo in sčitijo pred razpadom čedalje večje dele ostenja ter končno dosežejo njihov vrh. Podiranje se zaključí. Mejna ploskev med zaščiteno živo skalo in melišči dobi v poljubnem prerezu obliko krivulje, ki jo lahko izračunamo.

Predpostavimo homogeno navpično steno z vodoravnim zaledjem in podnožjem, katere čelo je matematična ravnina (sl.: 1 A). Položimo v njeno podnožje koordinatno izhodišče. Točka (D) s koordinatama (x, y) je poljubna točka mejne krivulje. Zaradi predpostavljene ravnosti čela širina izseka ni važna in jo izpustimo. Ploščina ( $\Delta OD$ ) mora biti enaka ploščini (ODCM), pomnoženi s (k). To izrazimo z enačbo:

$$k \left[ Hx - \int_0^x (y) dx \right] = \frac{y^2}{2} \operatorname{ctg} \varphi - \int_0^x (y) dx \quad (6)$$

kjer pomeni: k koeficient razrahljivosti  
H prvotno višino stene  
x, y poljubne koordinate mejne krivulje  
 $\varphi$  kot notranjega trenja v melišču.

Enačbo odvajamo po (x):

$$kH - ky = yy' \operatorname{ctg} \varphi - y.$$

Rešimo na (x):

$$x = - \operatorname{ctg} \varphi \left[ \frac{y}{1-k} + \frac{kH}{(1-k)^2} \ln \left| y - \frac{kH}{1-k} \right| \right] - C.$$

Vstavimo robni pogoj, da gre krivulja skozi koordinatno izhodišče, nakar sledi:

$$x = \operatorname{ctg} \varphi \left[ \frac{y}{k-1} - \frac{kH}{(k-1)^2} \left( \ln \frac{k(y+H) - y}{kH} \right) \right] \quad (7)$$

Dobili smo splošno enačbo, ki velja le v idealnem primeru. V naravi seveda nikoli ne dosežemo predpostavljenih pogojev. Še najpomembnejši vpliv ima zaokroženost čela stene. V zgornji enačbi smo namreč predvideli rušenje povsem ravne stene, kjer ima melišče na razpolago poljubno velik prostor. Dejansko pa se ves proces odigrava na prostoru v obliki kolačeve rezine. Ta se oži proti sredini, njegova dolžina pa je omejena približno s polmerom udornice, saj se material sipa tudi z nasprotné strani.

Zaključek je, da navedeni vplivi napravijo mejno krivuljo precej strmejšo, kot smo jo izračunali za idealne pogoje. Rezultat podora sten je, da se dolina razširi, a se obenem zmanjša njena globina. S to mislijo si lahko razložimo, zakaj dihalniki v Vranji jami in Unški koleševki ne leže pod stenami, temveč sredi melišč. Celotni proces, ki spreminja

valjasto obrobje udornice v logaritmčno vrtenino, imenujmo *logaritmčno rušenje*, površino preostalega živoskalnega obrobja pa *plašč udornice*.

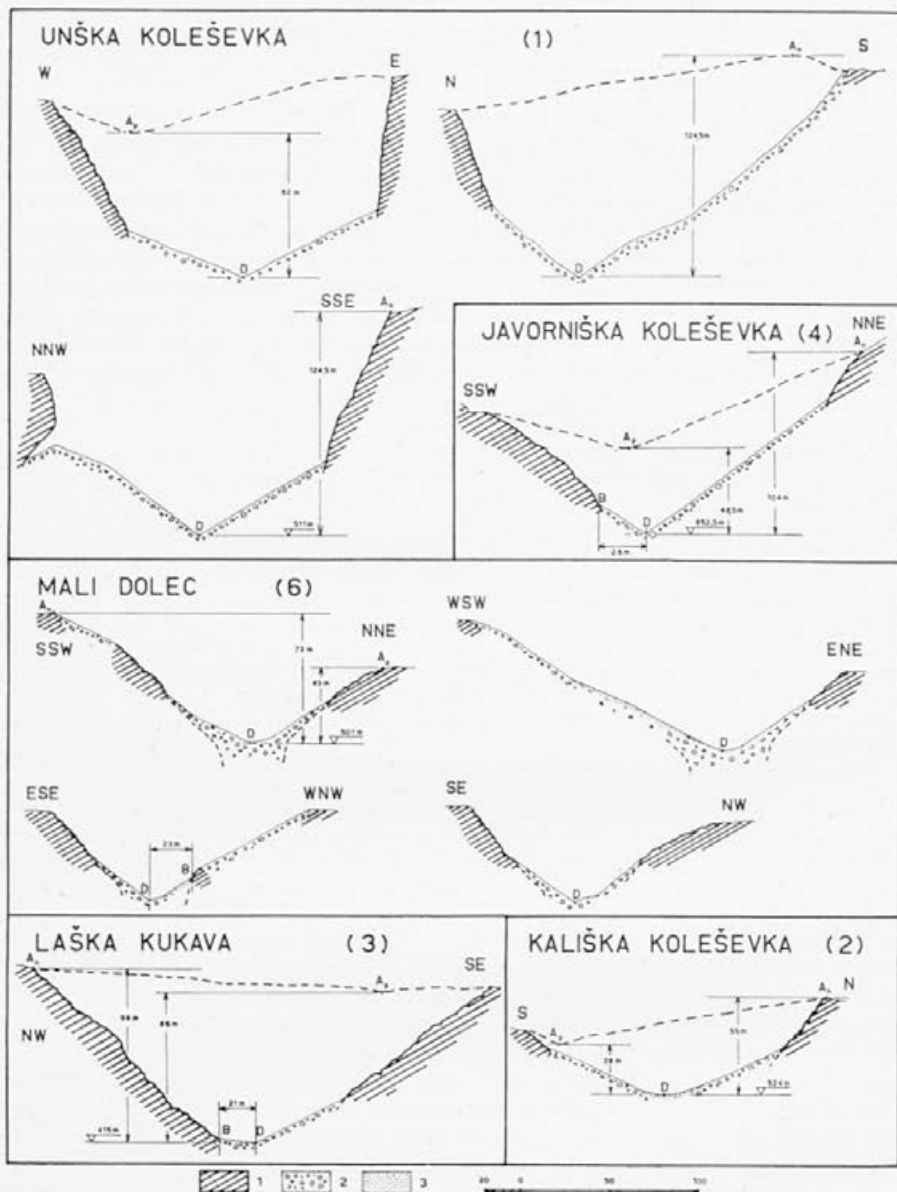
Prizadet je bil seveda le tisti predel plašča, ki ga po končanem cilindričnem rušenju ni ščitil podorni material. Preostali plašč pa seveda ohrani prvotno valjasto oziroma prizmatično obliko. Vodoravni prerez tega predela imenujmo *žrelo*. Zanimivo bi bilo vedeti, kakšno je žrelo v primeri z obsegom celotne udornice. Pravo velikost bi dobili šele z odkopavanjem ali vrtanjem, kar pa žal ni mogoče. Zato predpostavimo, da vodoravna razdalja med najglobljo točko udornice in najbližjim izdankom žive skale ni manjša od poprečnega premera žrela, saj je malo verjetno, da bi bilo melišče najtanjše prav na robu žrela. To količino imenujmo *računski polmer žrela* ( $r_0$ ). Primerjajmo le te s *srednjimi polmeri udornic* ( $r$ ) in med seboj!

Tabela 5 — Table 5

| Parameter <sup>7</sup><br>Ime udornice<br>Name of the dolina | $r_0$ | $\Delta r_0$ | $\Delta r_0 \%$ | $r$   | $\Delta r$ | $\Delta r \%$ |
|--|-------|--------------|-----------------|-------|------------|---------------|
| Unška koleševka  | 34 m  | + 11 m       | + 48 %          | 100 m | + 17 m     | + 20 %        |
| Kališka koleševka  | 41 m  | + 18 m       | + 78 %          | 101 m | + 18 m     | + 21 %        |
| Laska kukava   | 21 m  | — 2 m        | — 9 %           | 170 m | + 86 m     | + 107 %       |
| Javorniška koleševka   | 26 m  | + 3 m        | + 15 %          | 108 m | + 25 m     | + 30 %        |
| Mala Smrečnica   | 17 m  | — 6 m        | — 26 %          | 65 m  | — 20 m     | — 24 %        |
| Mali Dolec   | 23 m  | 0 m          | 0 %             | 84 m  | + 1 m      | + 1 %         |
| Smrečnica pri<br>Vranji jami                                 | 20 m  | — 3 m        | — 14 %          | 50 m  | — 33 m     | — 40 %        |
| Dolec  | 19 m  | — 4 m        | — 17 %          | 38 m  | — 45 m     | — 54 %        |
| Dolček   | 7 m   | — 17 m       | — 69 %          | 36 m  | — 47 m     | — 57 %        |
| Poprečje — Average   | 25 m  |              | 32 %            | 85 m  |            | 40 %          |

Poprečno žrelo meri počez 46 m, odstopanje od te vrednosti pa znaša v poprečju 32 %. Če izločimo tri primerke, ki očitno izpadejo kot izjeme, lahko poprečje izrazimo takole:  $32 \times 9 = 14 \times 6 + 65 \times 3$ . Šest žrel torej le minimalno odstopa od poprečja, tri vrednosti pa so tako različne, da jih bomo morali obravnavati posebej.

Na podoben način lahko obravnavamo še srednje polmere udornic. Poprečna udornica ima okrog 166 m premera,<sup>8</sup> odstopanja od te vrednosti pa dosežejo v poprečju 40 %, kar je precej več, kot pri žrelih. Tudi če izločimo ekstremna odstopanja kot izjeme in poprečje razbijemo:  $40 \times 9 = 28 \times 8 + 1 \times 107$ , rezultata bistveno ne popravimo. Obodi se v razliki od žrel med seboj mnogo bolj razlikujejo in obenem močno presegajo vrednosti, ki bi jih smeli imeti, če bi bile udornice podvržene samo cilindričnemu in logaritmčnemu rušenju. Ta odstopanja so tako velika, da moramo predvideti še en, doslej neopažen činitelj, ki material ne le premešča, temveč tudi odvaja. Preden se posvetimo temu vprašanju, moramo proučiti še druge metrične lastnosti udornic.



Sl. 2 Značilni prerezi nekaterih udornic.

- 1 Živoskalna pobočja
- 2 Melišča
- 3 Preperelina

Fig. 2 Typical sections of some treated collapse dolinas.

- 1 Bedrock
- 2 Screes
- 3 Dissolved material



## Profili in prostornine udornic

Že prvi pogled na sliko (2) nam pove, da imajo vse udornice obliko plitve skledе, pa četudi se nam zde še tako prepadne. Le najizrazitejše spominjajo v svojih najbolj prepadnih prerezih bolj na kotel. Vidimo tudi, da skalnata pobočja niso mnogo strmejša od melišč; prerezi imajo pretežno obliko verižnic. Ker je ta funkcija nekoliko prezamotana za rutinsko računanje prostornin, si lahko brez večjih odstopanj pomagamo s parabolo. Če še privzamemo, da se tlorisi kar dobro prilegajo elipsam, lahko predpostavimo udornicam kot dober približek eliptični paraboloid. Račun prostornine je potem preprost:

$$V \approx abg \frac{\pi}{8} \quad (8)$$

kjer pomeni: a veliki računski premer tlorisa  
b mali računski premer tlorisa  
g računska globina udornice.

Jasno je potem, da znaša računska ploščina ploskve, ki jo omejuje obod (tlorisa):

$$P \approx ab \frac{\pi}{4} \quad (9)$$

Računske vrednosti niso eksaktne vrednosti dejanskega stanja. Ker naj služijo predvsem rutinskemu postopku, jih dobimo na enostaven način. Po drugi strani pa so dovolj točni približki, da jih lahko uporabljamo pri nadaljnjem razglabljanju.

Na osnovi tabele (5) in enačb (6) in (1) poskusimo sedaj izračunati prostornino prvotne udornice in potem inicialne jamske dvorane! Očitno so računski polmeri žrela zelo blizu dejanskim vrednostim, saj spadajo dvorane, ki imajo manj kot 50 m premera, že k manjšim svoje vrste. Enačba (6) pa nam pove, da so sedanje višine baze sten (B) zelo blizu, ali pa kvečjemu nižje od prvotnih (koordinati  $x = 0$  in  $y = 0$  na sl. 1 A). Predpostavimo, da je po končanem cilindričnem rušenju prvotna udornica res valjaste oblike. Sledi enačba:

$$V_0 \leq \pi r_0^2 g k_s \quad (10)$$

kjer pomeni:  $V_0$  prostornina prvotne udornice  
 $k_s$  koeficient sten  
g računska globina udornice.

Višinska razlika med dnom inicialne dvorane in površjem je  $h_0$ . Iz enačbe (1) potem brez težav izpeljemo, da je:

$$V_i \leq \frac{V_0}{k} + h_0 \pi r_0^2 \frac{k-1}{k} \quad (11)$$

kjer pomeni:  $V_i$  prostornina inicialne dvorane.

Obe enačbi sta približni, saj smo izhajali iz približno določene baze sten. Tudi ni nikjer rečeno, da je središče žrela v najnižji točki udornice ter da je okroglo. Glede na to pomenijo dobljene vrednosti največje možne količine, kar bomo morali v nadaljnjem upoštevati.

Kot primer obravnavajmo sedaj udornico Mali Dolcec, katere linearni parametri ustrezajo poprečju obravnavanih udornic. Njena prostornina meri  $0,62 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . Po enačbi (10) je merila prvotna udornica  $0,0941 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , inicialna dvorana pa  $12,54 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ , če je bilo prvotno jamsko dno na koti 400 m. Se enkrat se spomnimo, da so te številke zgornja meja resničnih in da so v resnici lahko precej manjše. Naj bo kakorkoli, Dolceva inicialna dvorana se prav dobro sklada s poprečjem (Sušteršič, 1975). Prvotna udornica je zavzemala le 15 % prostornine sedanje doline, kar je v skladu s poprečnim razmerjem prostornin udornic in jamskih dvoran (Sušteršič, o. c.).

Lahko torej zaključimo, da ni potrebno, da bi bila inicialna dvorana posebno velika. Nujno je samo, da je izpolnjen pogoj neenačbe (2) in da je rahljanje stropa dovolj učinkovito.

Drugače je s sedanjo prostornino udornice. Razbrati je mogoče, da je velik del materiala izginil šele po končanem cilindričnem rušenju. Gospodarič (1975) meni na primeru Planinske koleševke, da ponornica sproti odnaša material po jamskem kanalu in ga pozneje tam akumulira. Parametri Malega Dolca pa kažejo, da prav v času cilindričnega in logaritmičnega rušenja takega transporta v Dolcu ni bilo.

V smislu gornjih izvajanj moramo ponovno premotriti račune o obliki plašča, saj je očitno, da enačba (7) velja le za primerke, ki niso zapadli naknadnemu večanju. Po prostornini največja, po razvidnosti procesov pa zelo poučna je Laška kukava. Stene ji segajo ponekod tako globoko, da znaša *koeficient sten*  $k_s = 0,978$ . Računski polmer žrela meri samo 21 m pri srednjem polmeru 169 m, kar vse kaže na hudo intenzivnost večanja. Računska prostornina zavzema  $4,17 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ; očitno je bil proces večanja tudi dolgotrajen. Sledovi plazenja v meliščih, ki se najjasneje vidijo na severovzhodnih pobočjih, kažejo, da mora biti srčika odnašanja nekje v žrelu. Isto opažamo tudi v Unški koleševki, Malem Dolcu in še kje. Ti podatki so lahko zadovoljiva osnova za geometrijsko rekonstrukcijo procesa.

Glede na to, da absolutne hitrosti naknadnega večanja ne poznamo, lahko zaenkrat predpostavimo, da v začetku prevlada logaritmično rušenje. Stene izginejo pod melišči in podiranje se ustavi. Melnat material pa še dalje izginja v žrelo in kmalu se na površju pojavijo prvi izdanki žive skale. Melišča ponovno prekrijejo pobočja, plašč pa se v zgornjih delih nekoliko umakne. Igra se ponavlja toliko časa, dokler se vsa mejna krivulja ne poravnava v bolj ali manj ravno črto z naklonom, ki je enak kotu notranjega trenja melišč. Logaritmična vrtenina plašča prehaja v stožec. Zato imenujmo ta proces preoblikovanja plašča *konično rušenje*. V času, ko je le to najbolj aktivno, imajo melišča prav majhno prostornino in predstavljajo le tanko povrhnjico živoskalnih pobočij. Ta ugotovitev je povsem v skladu s terenskimi opazovanji.

Zamislimo si še položaj, da se močno aktivno konično rušenje ne nadoma ustavi. Izdanki žive skale, ki so lahko prav veliki, sedaj preperere in se zrušijo logaritmično. To obliko rušenja, ki verjetno nastopa skoraj vsepovsod, imenujmo *finalno logaritmično rušenje*.

### Mejne ploskve udornic

Mejne ploskve udornic sestavljajo predvsem trije mediji: ostenja, melišča in preperelina ter drugi peliti. Le pri najbolj zastaranih oblikah je pretežni del pobočij enak normalnemu kraškemu površju. Žal pa udornice, ki smo jih doslej opazovali, takih pobočij nimajo in jih bo treba proučiti drugod.

Doslej smo predpostavljali, da prepereva udornica v vseh smereh enako — da je približno centrično simetrična. Že na prvi pogled opazimo, da to še zdaleč ni res. V Kališki koleševki seže ponekod preperelina prav do vrha, drugod so zopet stene tako globoko, da znaša *koeficient sten*  $k_s = 0,704$ . V Laški kukavi je ta koeficient celo  $k_s = 0,978$ , pa vseeno segajo melišča na dobršnem delu do vrha.

Ali odloča samo slučaj, ali pa kaj drugega, nam bo povedal diagram frekvence sten v posameznih smereh. Izdelan je bil za udornice, ki leže v isti tektonski enoti. Kot primer smo uporabili vrhniško-cerkiško grudo (Buser, 1965). Pri tamkajšnjih udornicah opazimo, da so stene na južnih pobočjih zastopane sto odstotno, na severnih pa le za spoznanje manj. Prečna smer je mnogo manj zastopana. Ves diagram (sl. 1 C) ima približno obliko elipse, kar kaže na precejšnjo zakonitost. Opaziti je tudi pomanjkanje sten v severovzhodni smeri, kar lahko razložimo z manjšo stabilnostjo pobočij, ki vpadajo bolj ali manj vzporedno s skladi. Za to grudo je namreč značilen vpad slojev proti jugozahodu in zahodu.

Prav osupljiva je podobnost diagrama frekvence sten z diagramom frekvence slednic navpičnih razpok v Gorjupovem lazcu ob Stari cesti.<sup>9</sup> V bistvu pa takšen rezultat ni nepričakovan. Očitno je podiranje sten najaktivnejše tam, kjer ga poleg ostalih faktorjev pospešujejo še robne poč. Le-te pa se razvijejo predvsem tam, kjer je bila ugodna tektonska predispozicija. Zato se najhitreje podro stene, ki potekajo vzporedno s počmi. Na severni in južni strani pa lahko pričakujemo, da bo robnih poč manj in da bodo slabše razvite, kar ima za posledico, da se stene tam bolje ohranijo. Da je sten na južni strani nekoliko več, kot na severni, moramo pripisati insolaciji. Južne stene so namreč temperaturnemu nihanju okrog ničle izpostavljene le ob nastopu in popuščanju zimskega mraza, severne pa se lahko ogrejejo nad ničlo ob sončnem dnevu tudi sredi najhujše zime in jih led temu primerno bolj razganja.

### Sklepi

Prostornine velikih brezen se dosti ne razlikujejo od prostornin velikih jamskih dvoran. Upravičeno pričakujemo, da je vsaj nekaj udornic nastalo z rušenjem teh votlin brez sodelovanja ponornice. To velja

še zlasti za udornicam podobne konte, ki nastopajo predvsem tam, kjer najdemo tudi naša najprostornejša brezna.

Podor seže do površja le tedaj, če *maksimalna črta rušenja* ne ostane pod površino. Zato pomanjkanje udornic še ne pomeni, da v globini ni jam in podiranja. Nivo jamskih etaž nima neposrednega vpliva na nivo dna udornic.

Med svojim podornim preoblikovanjem teže jamske dvorane k večji zaokroženosti, kar lahko teoretično opišemo z enačbo. Ta pa nima praktične vrednosti, ker so meritve preveč podvržene raznim motnjam.

Ko se podere jamski strop in se dvorana pretvori v udornico, zazijajo zaradi razbremenitve vzdolž oboda robne počti, ki v določenih okoliščinah tvorijo poseben tip jam.

Pri rušenju sten (brez odnašanja melišč) dobi živoskalni plašč udornice obliko logaritmične vrtenine.

Živoskalna žrela udornic so, ne glede na velikost udornice, precej majhna in se med seboj mnogo ne razlikujejo. Zato udornice v splošnem niso nastale iz ekstremno velikih jamskih dvoran.

Od enostavnih tridimenzionalnih ploskev se obliki udornic najbolj prilega eliptični paraboloid in smo ga zato uporabili kot dober približek za računanje prostornin.

Velikost večine udornic in njihova končna oblika kažejo, da njihov melnati material ponikuje v žrelo. Ta proces, ki pa ni vsesplošen, je je pri večanju udornic najbolj učinkovit.

Udornice v splošnem niso centrično simetrične. Hitreje se rušijo stene, katerih tangenta je približno vzporedna slednicam glavnine razpok v matični kamnini. Ostale stene so nekoliko odpornejše; med njimi zaradi prisojne lege hitreje preperevajo severna ostenja.

Glede na značilne oblike živoskalnega plašča lahko proces preoblikovanja udornic razdelimo na: *cilindrično rušenje*, *logaritmično rušenje* in *konično rušenje*. Kot njihove modifikacije nastopajo še *pseudokonično* in *finalno logaritmično rušenje*.

### Dodatek: Osnovni parametri udornic

Med obravnavanjem udornic smo morali uvesti več parametrov, ki so bili le za silo pojasnjeni. Brez predsodkov smo operirali npr. z globinami, prostorninami itd., ne da bi sploh razčistili te pojme.

Osnovne parametre lahko razdelimo v opisne in merske, le te pa spet na absolutne in računске. Z absolutnimi imamo v mislih tiste količine, ki jih v mejah natančnosti merjenja — te večinoma postavlja velikostni red osnovnih blokov kamnine — lahko točno določimo. Računski parametri pa so tisti, ki služijo predvsem rutinski obdelavi večjega števila primerkov. Zato je postopek za njihovo določitev osnovan na približkih, kar nekoliko zmanjšuje točnost rezultatov. Vendar pa so še vedno sprejemljivi, zlasti pri skupnem obravnavanju več primerkov, ker nas zanimajo predvsem relativni količinski odnosi.

## a) Opisni parametri

**O b o d** je tista črta, ki loči zemljišče, ki ni zapadlo podiranju ali plazenju, od votlega prostora udornice.

**S t e n e** so vsa živoskalna pobočja, bodisi navpična ali pa močno naklonjena, kjer so vsi nekoherentni materiali v labilnem ravnotežju. Torej spadajo sem vse viseče police in melnata pobočja, ki so naklonjena za več kot znaša kot notranjega trenja in tudi vse druge preperle vesine, ki jih drži v ravnotežju edino podlaga.

**M e l i š č a** so vsa pobočja in nasipi nekoherentnega skalnatega materiala, nagnjena za kot notranjega trenja ali celo položnejša in jih ne pokriva preperelina.

**P r e p e r e l i n a** zavzema tiste predele, kjer je preperela (ali drugačna pelitska) odeja debelejša od polovice velikostnega reda skalnatih ali melnatih blokov v osnovi.

**P l a š č** je mejna ploskev žive skale, ki bi jo dobili, če bi iz udornice popolnoma odstranili melišča in preperelino.

**Ž r e l o** je vodoravni prerez plašča na mestu, kjer ima ta prerez najmanjšo ploščino.

**I n i c i a l n a d v o r a n a** je jamski prostor, iz katerega je nastala udornica, opazovan v trenutku, ko se je končalo mehansko odnašanje podornega materiala.

**P r v o t n a d v o r a n a** je jamski prostor, iz katerega je nastala udornica, opazovan v trenutku, ko se je strop odprl in se je pričelo kriolistično, to je cilindrično rušenje.

**P r v o t n a u d o r n i c a** je udornica, ki je bila opazovana v trenutku, ko se je končalo cilindrično in se je pričelo logaritmično ali psevdokonično rušenje.<sup>10</sup>

**Ž a r i š č e** je tisto mesto udornice, kamor vidno ponikuje melnati material, sensu stricto pa tisti predel podora, kjer je razkranje meli najmočnejše.

**D v o ž r e l n a u d o r n i c a** je poglobitev, ki ima dve žreli in je nastala z zlitjem dveh prvotnih udornic. Njena zaokroženost mora biti večja od 0,558,<sup>11</sup> sicer je to

**D v o j n a u d o r n i c a.** Podobno lahko definiramo še večkratne in večžrelne udornice. (Dokler ne dokažemo obratnega, žrela še ne smemo istovetiti z žariščem.)

## b) Merski parametri

## ba) Absolutni parametri

**T** **T e ž i š č e t l o r i s a** je težišče vodoravne projekcije oboda, ki mu pripišemo Gauss-Krügerjeve X in Y koordinate ter koto najvišje točke oboda kot Z koordinato.

**D** **D n o** je najnižja točka udornice. Pripišemo ji številčno vrednost njene nadmorske višine.

**A<sub>n</sub>** **N a j v i š j a t o č k a** je najvišje mesto oboda, ki mu pripišemo številčno vrednost nadmorske višine.

- $A_p$  Prelivna točka je najnižje mesto oboda, kjer pozimi lahko izteka mrzli zrak. Pripisemo ji številčno vrednost nadmorske višine.
- $r_v$  Največji polmer je vodoravna razdalja težišča tlorisa in najoddaljenejše točke oboda.
- $r_m$  Najmanjši polmer je vodoravna razdalja težišča tlorisa in najbližje točke oboda.
- $r$  Srednji polmer je polmer kroga s ploščino tlorisa udornice.
- $g_n$  Največja globina je višinska razlika med najvišjo točko in dnóm.  $g_n = A_n - D$ .
- $g_p$  Prelivna globina je višinska razlika med prelivno točko in dnóm.  $g_p = A_p - D$ .
- $B$  Baza sten je mesto, kjer segajo stene najgloblje. Pripisemo ji številčno vrednost nadmorske višine.
- $e$  Numerična ekscentričnost je vodoravna razdalja med dnóm in težiščem tlorisa.
- $\varepsilon$  Ekscentričnost je razmerje med numerično ekscentričnostjo in srednjim polmerom. Ker igra vlogo tudi smer, ji pripisemo še to. Merimo od težišča proti dnu.

$$\varepsilon = \frac{e}{r}, \text{ (npr.: } \varepsilon = 0,158/259\text{)}.$$

- $\varrho$  Zaokroženost je razmerje med ploščino tlorisa in ploščino kroga z največjim polmerom.

$$\varrho = \frac{r^2}{r_v^2}, \text{ ker } (\pi) \text{ pri krajšanju odpade.}$$

- $k_s$  Koefficient sten je razmerje med višinsko razliko najvišje točke in baze sten ter največjo globino.

$$k_s = \frac{A_n - B}{A_n - D}.$$

- $k_v$  Koefficient večanja je razmerje med računskim polmerom žrela in srednjim polmerom.

$$k_v = \frac{r_o}{r}.$$

- $k_p$  Prelivni koefficient je razmerje med prelivno globino in največjo globino.

$$k_p = \frac{g_p}{g_n}.$$

#### bb) Računski parametri

- $a$  Veliki premer je največja vodoravna razdalja med dvema točkama oboda.
- $b$  Mali premer je najdaljša pravokotnica na veliki premer.
- $g$  Računska globina je vrednost naslednjega izraza:

$$g = \frac{1}{4} \left[ (A_1 + A_2 + B_1 + B_2) - 4D \right]$$

kjer pomenita:  $A_1$  in  $A_2$  nadmorski višini krajišč velikega polmera  
 $B_1$  in  $B_2$  nadmorski višini krajišč malega polmera.

- $r_0$  Računski polmer žrela je vodoravna razdalja med dnom in bazo sten.
- $V$  Računska prostornina je količina, ki jo dobimo s pomočjo enačbe (8).
- $V_p$  Prelivna prostornina je podobno izračunana prostornina udornice, ki jo zgoraj omejuje vodoravna ploskev na višini prelivne točke.
- pp Razmerje preperelosti je razmerje površin ostenij, melišč in prepereline, izraženo v odstotkih. Podrobneje glej pri Šušteršiču (1975).

### OPOMBE

<sup>1</sup> Referat o nekaterih problemih, ki jih obravnavam v tem sestavku sem imel junija 1975 na VII. zboru slovenskih jamarjev v Idriji. V plodni diskusiji ki je sledila, sem našel mnogo novih smernic in konstruktivne kritike. Zahvaljujem se vsem diskutantom, predvsem dr. Habiču, dr. Kunaverju in prof. dr. Gamsu, ki mi je bil vedno pripravljen pomagati z nasveti. Zahvalo sem dolžan tudi dr. Gospodariču, ki mi je dal na razpolago nekatere merske podatke, ki bi jih sicer mogel dobiti le s težavnim in dolgotrajnim terenskim delom. Končno pa velja zahvala tudi R. Golobu, direktorju Letalskega šolskega centra v Ljubljani, ki mi je dal na razpolago šolsko letalo, da sem vse obravnavane objekte in okolico lahko pregledal iz ptičje perspektive.

<sup>2</sup> Kot vertikalo štejem poprečno višino podzemskega prostora, ne pa najmanjše navpičnice, ki jo običajno registrirajo jamarji. Zato so navedene številke za spoznanje večje od jamarsko-športnih.

<sup>3</sup> Da bi dobil čim točnejšo prostornino podzemskega prostora, sem posameznim breznom priredil najustreznejšo funkcijo in to integriral. Zato so dobljeni podatki natančnejši od teh, ki sem jih že objavil (Šušteršič, 1975) in neprimerno točnejši od tistih, ki jih navaja Corbel (1971). Prostornine največjih jamskih prostorov na svetu je namreč izračunal iz osnovnih parametrov: največja dolžina (a), največja širina (b), največja višina stropa (h); po formuli:  $V = abh$ , očrtal je torej največji možni kvader. Če priredimo jamski dvorani eliptični valj, je pri istih parametrih prostornina:  $V = \frac{\pi}{4} abh$ . Če pa upoštevamo še obokanost stropa in priredimo jamski dvorani eliptični paraboloid, je prostornina:  $V = \frac{\pi}{8} abh$ . Corbelovi (o. c.) podatki so torej okrog 2,5-krat preveliki. Če sedaj primerjamo prostornine naših jamskih dvoran s Corbelovim seznamom in upoštevamo gornja izvajanja, takoj opazimo, da se jih nekaj uvršča v sam svetovni vrh.

Glede na to, da votli prostor brezen slabo opišemo s katerimkoli od navedenih približkov za dvorane, sem moral uporabiti še natančnejši, a mnogo dolgovzejši postopek. Ta seveda za vsakdanjo uporabo ne pride v poštev, moramo pa se vedno zavedati, da bi bile pri taki metodi tudi prostornine jamskih dvoran za nekaj odstotkov manjše. Šele potem so primerjave številke smiselne.

<sup>4</sup> Zbranih je le nekaj primerov, za katere sem imel na razpolago dovolj merskih podatkov za opisani račun prostornine. S tem pa še ni rečeno, da so navedena brezna tudi naša najprostornejša, čeprav vsekakor sodijo v to skupino. Izpustil sem tudi Golokratno jamo pri Sežani in Jamo na Konjicah nad Povirjem, ki sta kljub prevladujoči vertikalni dimenziji zelo verjetno podornega nastanka (Sušteršič, 1972/75), -in sta torej preoblikovani jamski dvorani. Zaradi nepojasnjenega nastanka izpuščam tudi Imotska jezera, ki seveda po prostornini prekašajo karkoli podobnega na svetu.

<sup>5</sup> Edina izjema je Javorniška koleševka, za katero bi prej veljalo obratno, a je tako podobna pristnim udornicam, da jo obravnavam skupaj z njimi že zaradi primerjave.

<sup>6</sup> Glej definicije parametrov v dodatku, str. 58 in dalje.

<sup>7</sup> Vsi računi so izvedeni na dve decimalni in šele potem popravljeni na velikostni red, ki ga smemo smatrati za dovolj točnega. Zato so v tabeli sem in tja manjša nesoglasja, ki pa seveda celotne slike ne motijo.

<sup>8</sup> Poprečje velja za deset tu obravnavanih udornic, ne pa za vse slovenske udornice, saj nam za ostale še manjka točnih merskih podatkov. Tega se moramo vseskozi zavedati!

Pri terenskem merjenju so poleg že navedenih (Sušteršič, 1975) sodelovali še B. Bombač, J. Jurečič, S. Otorepec, M. Poglajen in L. Velikanje, za kar se jim tu najlepše zahvaljujem. Ponovno se moram zahvaliti tudi Društvu za raziskovanje jam Ljubljana, ki mi je dalo na razpolago potrebno merilno opremo.

<sup>9</sup> Ta lokaliteta je od večine obravnavanih udornic oddaljena okrog 8 km, kar seveda ni najugodnejše za primerjavo. Zal pa dovolj natančni podatki niso bili dosegljivi s kakšnega bližnjega kraja. Ker pa se vse skupaj nahaja v isti tektonski enoti, je primerjava še vedno za silo sprejemljiva.

<sup>10</sup> Ker se lahko cilindrično in logaritmično rušenje kombinirata, je navedena definicija seveda idealna. Dejansko bomo lahko tako opredelili udornico, ki bo pač bolj ali manj blizu te stopnje razvoja.

<sup>11</sup> To je zaokroženost lika, omejenega s krožnicama, kjer leži središče prve na obodu druge in obratno.

### Literatura — Bibliography

Bronštejn, J. N., Semendjajev, K. A., 1963, Matematični priročnik, p. 1—699, Ljubljana.

Buser, S., 1965, Zgradba južnega dela Ljubljanskega barja in njegovega obrobja, Geologija 8, p. 34—57, Ljubljana.

Corbel, J., 1971, Notes sur les plus grandes grottes du monde, Actes IV<sup>e</sup> CIS 6, p. 19—24, Ljubljana.

Courbon, P., 1972, Atlas des grandes gouffres du monde, p. 1—55 s prilogami, Apt en Provence.

Gams I., 1961, Triglavsko brezno, Naše jame 3, p. 1—17, Ljubljana.

Gams, I., uredniški odbor, 1975, Slovenska kraška terminologija, p. 1—76, Ljubljana.

Gospodarič, R., Habe, F., Habič, P., 1967, Preiskave krasa na trasi hitre ceste Vrhnika—Postojna, Inštitut za raziskovanje krasa SAZU, tipkopis v arhivu Cestnega sklada SRS, Ljubljana.

Gospodarič, R., 1975, Razvoj jam med Pivško kotlino in Planinskim poljem v kvartarju, doktorska disertacija, tipkopis v arhivu geol. ods. mont. odd. FNT, Ljubljana.

Habič, P., 1963, Udorne vrtače — koliševke in podzemski tokovi, Treči jugoslavenski speleološki kongres, p. 125—130, Sarajevo.

Habič, P., in sodelavci, 1972, 1975, Osnovna speleološka karta SRS, listi Vrhnika 2b, 2c, 2d, Inštitut za raziskovanje krasa SAZU, Postojna.



- Hrovat, A., 1955, Kraška ilovica in njen vpliv na zgradbe, p. 1—89, Ljubljana.
- Krajnc, A., 1966, Na dnu najglobljega snežniškega brezna, Bitlen JSPDŽ 4, p. 2—3, Ljubljana.
- Kunaver, P., 1957, Kraški svet in njegovi pojavi, p. 1—182, Ljubljana.
- Kunaver, P., 1959/60, Prepad Ziglovice, Proteus 22, p. 44—48, Ljubljana.
- Kunaver, J., 1960, Brezno pri Medvedovi konti, Naše jame 2, p. 50—59, Ljubljana.
- Maucci, W., 1951/52, L'ipotesi dell'«Erosione inversa» come contributo allo studio della speleogenesi, Estrato dal Bollettino della «Società Adriatica di Scienze Naturali» Trieste 46, p. 1—60, Rocce di San Casciano.
- Michler, I., 1955/54, Vrtače in doline, Proteus 16, p. 204—209, Ljubljana.
- Puc, M., 1968, Speleologija Lanskega vrha, tipkopis v arhivu DZRJL, Ljubljana.
- Renault, P., 1967, 1968, Contribution à l'étude des actions mécaniques dans la spéléogénèse, Annales de spéléologie, tome 22 et 25, p. 211—596, Laboratoire souterrain Moulis — Ariège.
- Sweeting, M. M., 1972, Karst Landforms, p. 1—362, London.
- Sušteršič, F., 1970, Raziskave večjih brezen v okolici Sežane in Divače, poročilo JKLM, Naše jame 12, p. 92—96, Ljubljana.
- Sušteršič, F., 1972/73, Med Skocjanom in Labodnico, Proteus 35, p. 212—215, 259, 281—287, 520—522, Ljubljana.
- Sušteršič, F., 1973, K problematiki udornic in sorodnih oblik visoke Notranjske, Geografski vestnik 45, p. 71—86, Ljubljana.
- Vadnal, A., 1971, Funkcije I, p. 1—240, Ljubljana.
- Vidav, I., 1951, Višja matematika II, p. 1—445, Ljubljana.
- 1971, Prvomajska ekskurzija na Banjščice, Glas podzemlja 3, p. 10, Ljubljana.
- Arhiv Društva za raziskovanje jam Ljubljana, Ljubljana.
- Arhiv Jamarske zveze Slovenije, Ljubljana.

## SOME METRIC PROBLEMS ON THE COLLAPSE DOLINAS

France Sušteršič

(Conclusions)

The volumes of the big potholes do not essentially differ from the volumes of the cave big rooms and so we can expect that some collapse dolinas result in falling-in of such hollows, excavated without underground stream activity.

The collapse occurs on the surface only in the case when the *Maximum line of collapsing* surpasses the surface. So the deficiency of the collapse dolinas does not mean, that there are no caves and collapsing in the mass. The level of the cave passages has no direct effect on the level of the bottoms of the collapse dolinas.

During their process of >travelling< upwards the cave rooms tend to become more round in the ground plan. This phenomenon can be illustrated theoretically, but the practical effect is not useful for the further study of collapse dolinas.

When the collapse occurs on the surface and a cave room changes to a collapse dolina, there appear rim-cracks along the perimeter, due to discharge of the sides.

During the falling-in of the walls (without removing material) the cylindrical dolina changes to a logarithmical rotation body.

The gaps of the collapse dolinas are quite small and do not differ when observing many dolinas. Correlation with the dimensions of the whole dolina show no proportions. The treated dolinas do not owe their origin to extremely large cave rooms.

The elliptic paraboloid is a good enough approximation to calculate the volume of the collapse dolina.

The volume of the collapse dolinas and their conical shape show that the sree material disappears in the gap. This process is the most effective in the enlarging a collapse dolina.

Generally the collapse dolinas are not symmetrical. The walls, parallel with the majority of the tectonic discontinuities of the bedrock are less stable. The other walls are more resistant — among them the Northern ones rather are more exposed to dissolution.

Regarding the typical forms of the funnel, we can divide the process of the development of a collapse dolina in the cylindrical falling-in, the logarithmical falling-in and the conical falling-in. Their further modifications are pseudoconical and final logarithmical falling-in.

## Appendix: The Basic Parametres of the Collapse Dolinas

Whilst treating the collapse dolinas we had to introduce several parametres that had very loose definitions. However, for further study we must define parametres, that can be always uniformly defined and that have a functional value.

The basic parametres we can divide in the descriptive and the metric, among the last we know the absolute and the auxiliary ones. The absolute parametres are the quantities that can be, within the limits of the accuracy of surveying, always determined at once. The auxiliary ones are the parametres, that we use in calculations, but their value is approximate only, as we simplified the way to get them. However, they are close enough to the real values, so that they can always be used in the calculations when we compare several dolinas.\*

\* The author is not English and when introducing new conceptions, precisely defined in the appendix, he did not know how to find the adequate English words. So the cursive printed expressions are auxiliary only, and the English themselves must replace them with better terms.

## a) Descriptive parametres

The *rim* is the limiting line between the dolina and the intact ground, where there has been no collapsing and landsliding.

The *walls* are the bedrock slopes, being perpendicular or inclined, where all the noncoherrent material is in labile equilibrium.

The *scree*s are all the slopes of noncoherrent rocky material, inclined to the angle of friction or less, and not covered by dissolved material.

The *dissolved material* covers the sides, where the pelrites are thicker than half size order of the rocky blocks in the base.

The *funnel* is the plain between the intact bedrock and the space we get, if we remove all the scree from the dolina.

The *gap* is the horizontal section of the funnel in the level, where it has the smallest area.

The *initial cave room* is the cave room, from which a collapse dolina originates, measured at the moment when the underground river stopped removing material.

The *primary cave room* is the cave room, from which a collapse dolina originates, measured at the moment, when the first opening appears in the arch and starts the cylindrical falling-in.

The *primary collapse dolina* is a collapse dolina, measured at the moment when the cylindrical falling-in ceases and the logarithmical begins. (In fact that is not accurate, as the logarithmical falling-in can start on one side before the end of the cylindrical one on the other side.)

The *focus* is the place in the bottom of the collapse dolina, where the scree material apparently disappears.

The *two-gap collapse dolina* is a collapse dolina which has apparently two gaps and proceeds from two primary collapse dolinas. Its roundness is bigger than 0,558 (that is the roundness of a figure, composed of two equal circles, where the centre of the first lies on the perimeter of the second and vice versa), unless it is the

*double collapse dolina*. In the same way we can define also *many-gap* and *many-times collapse dolinas*.

## b) Metric parametres

## ba) Absolute parametres

T *the centre* is the (gravity) centre of the horizontal projection of the dolina. It has Gauss-Krüger ortogonal (X, Y) coordinates and the (Z) coordinate of the top of the rim (above the sea level).

D *the bottom* is the deepest point in the dolina. It has its own absolute level.

$A_n$  *the top of the rim* is the highest point on the perimeter. It has its own absolute level.

$A_p$  *the outflow point* is the lowest point on the rim, where the cold air flows from the dolina. It has its own absolute level.

$r_v$  *the biggest radius* is the horizontal distance between the centre and the most distant point of the rim.

$r_m$  *the smallest radius* is the horizontal distance between the centre and the closest point of the rim.

r *the middle radius* is the radius of a circle with the same area as the collapse dolina.

$g_n$  *the biggest depth* is the vertical distance between the top of the rim and the bottom. ( $g_n = A_n - D$ ).

$g_p$  *outflow depth* is the vertical distance between the outflow point and the bottom. ( $g_p = A_p - D$ ).

B *the base of the walls* is the point, where the bedrock walls appear the

closest to the bottom. It has its own absolute level.

e *numerical excentricity* is the horizontal distance between the bottom (D) and the centre (Γ).

ε *excentricity* is the ratio between the numerical excentricity and the middle radius. As the direction plays an important role we add it as well. We

measure from the centre to the bottom. ( $|\varepsilon| = \frac{e}{r}$ ), for instance:

$$\varepsilon = 0,158/259.$$

ρ *roundness* is the ratio between the area of the ground plan and the area of a circle with the biggest radius of the dolina.

$$\rho = \left( \frac{r^2}{r_v^2} \right).$$

k<sub>s</sub> *coefficient of walls* is the ratio between the difference of level of the top of the rim and the of base of the walls, and the biggest depth.

$$k_s = \frac{A_n - B}{A_n - D}.$$

k<sub>v</sub> *coefficient of enlarging* is the ratio between the auxiliary radius of the gap and the middle radius of the dolina.

$$k_v = \frac{r_o}{r}.$$

k<sub>p</sub> *outflow coefficient* is the ratio between the outflow depth and the biggest depth.

$$k_p = \frac{g_p}{g_n}.$$

pp *dissolution ratio* is the ratio between the area of walls, screes and dissolved material, expressed in per cents. Look at the details with Sušteršič (1973).

#### bb) Auxiliary

a *the big auxiliary diameter* is the greatest horizontal distance between two opposite points on the rim.

b *the small diameter* is the longest ortogonal to the big diameter.

g *the auxiliary depth* is the value of the following expression:

$$g = \frac{1}{4} [(A_1 + A_2 + B_1 + B_2) - 4D].$$

where: A<sub>1</sub> and A<sub>2</sub> are the absolute levels of the two ends of the big diameter.

B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub> are the absolute levels of the two ends of the small diameter.

r<sub>o</sub> *the auxiliary radius* of the gap is the horizontal distance between the bottom and the base of the walls.

V *the auxiliary volume* is the quantity, obtained by the equation (8).