

**METODA MORFOMETRIJE
IN RAČUNALNIŠKE OBDELAVE VRTAČ**

(S 3 SLIKAMI)

**A METHOD OF DOLINE MORPHOMETRY AND COMPUTER
PROCESSING**

(WITH 3 FIGURES)

FRANCE ŠUŠTERŠIČ

**SPREJETO NA SEJI
RAZREDA ZA NARAVOSLOVNE VEDE
SLOVENSKE AKADEMIJE ZNANOSTI IN UMETNOSTI
DNE 31. OKTOBRA 1985**

Vsebina

Izveček — Abstract	81 (3)
UVOD	81 (3)
ZAMISEL METODE	83 (5)
MERILNI POSTOPEK	84 (6)
PRERAČUNAVANJE TERENSKIH PODATKOV	85 (7)
IZVREDNOTENJE MERSKIH PODATKOV	87 (9)
IZLOČANJE PERIODIČNIH MOTENJ	89 (11)
CELOSTNA SLIKA VRTAČE	90 (12)
SPLOŠNE UGOTOVITVE	93 (15)
LITERATURA	95 (17)
A METHOD OF DOLINE MORPHOMETRY AND COMPUTER PROCESSING (Summary)	97 (19)

Naslov — Address

Franc ŠUŠTERŠIČ, dipl. ing. geol., raziskovalni sodelavec
Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU
Titov trg 2
66230 Postojna
Jugoslavija

Izvleček

UDK 519.6:551.448
551.448.519.6

Sušteršič France: Metoda morfometrije in računalniške obdelave vrtač.

Prikazana je metoda za kvantitativno proučevanje vrtač. Obsega vse stopnje od terenskega merjenja, prek matematičnih osnov numerične obdelave do računalniške obdelave podatkov. S pomočjo meritev 72 merskih točk v vrtači dobimo 5×6 podatkovno matriko, ki vsebuje informacijo o velikosti in obliki vrtače. Izdelani so računalniški programi, ki omogočajo uporabo tudi raziskovalcu brez posebnega matematičnega predznanja.

Abstract

UDC 519.6:551.448
551.448.519.6

Sušteršič France: A method of doline morphometry and computer processing.

A method of quantitative doline processing is presented. It encompasses the terrain surveying, mathematical derivation of proper formulas, and computer processing the data. Having processed 72 measuring points data of a doline, one obtains a 5×6 data matrix, containing information about the doline dimensions and shape. The computer programs were done to make the method accessible to the users without wide mathematical knowledge.

UVOD

Vrtače so ne samo najbolj opazne, temveč najbolj značilne prave kraške globeli, če sprejmemo danes najbolj razširjeno mnenje, da jih tako ali drugače oblikuje krajevno zbrana padavinska voda. Njihova osnovna centrična oblika jih uvršča med temeljne gradnike modela čistega krasa (F. Sušteršič, 1982). Tako ni čudno, da so bile že zgodaj deležne posebne pozornosti; meritve vrtač, ki jih je izvajal J. Cvijić (1895), pa spadajo med prve poskuse meritev geomorfirnih pojavov sploh.

Zato nekoliko preseneča, da meritve vrtač, ki so jih bolj ali manj po Cvijićevih metodah od danes izvajali različni raziskovalci, pravzaprav niso dale večjega vpogleda v nastajanje in oblikovanje vrtač (P. Lavalleye, 1968, P. W. Williams, 1972, J. N. Jennings, 1975, G. Mozösi et al., 1978, M. Day, 1983, A. E. Ogden, 1984, A. E. Soto, et al., 1984, J. W. Troester, et al., 1984). Značilno je, da sta se Williams in Jennings, ki sta se tej metodologiji najbolj posvetila, v nadaljnjem delu preusmerila drugam, čeprav v bistvu negativnih rezultatov svojih raziskav ne poudarjata.

Podobno lahko ugotovimo, da pri podrobnem raziskovanju vrtač na trasi avtoceste Vrhnika—Postojna—Fernetiči, kar je izvršil Inštitut za raziskovanje krasa SAZU (P. Habič, 1969, 1970, 1972, 1974, 1978) morfometrija, kot jo pojmujejo prej navedeni avtorji ni igrala večje vloge in da so pomembnejši zaključki izhajali iz drugačnih podatkov.

Končno ni odveč, če ugotovimo, da se v svoji obsežni monografiji v vrtačah H. Cramer (1941) Cvijićevim parametrom izogiba, čeprav je njegovo delo v veliki meri zasnovano statistično.

Moramo se torej vprašati, kako da je eden v krasoslovju in celo v geomorfologiji prvih kvantitativnih pristopov ostal tako rekoč jalov. Razumljiv je pomislek, da merjenje vrtač in potem izvrednotenje podatkov ni bilo zastavljeno tako, da bi lahko dalo pričakovane rezultate.

Predpostavko, da izraža oblika (gr. *morphe*) trenutne ravnotežne razmere in preteklost nekega geomorfnege sistema, večina, četudi različno mislečih raziskovalcev, sprejema za pravilno. Vsekakor ni razloga, da bi na tem mestu o njej podvomili. Če si z izrazom »-metrija« predstavljamo merjenje (gr. *metron* = *mera*), bi morali pri korektno izpeljani morfometriji dobiti kvantitativne podatke o neki obliki, v našem primeru o obliki vrtače.

Iz Cvijičevega besedila (l. c) je jasno razvidno, da gornjega ni imel v mislih. Oblike vrtač je vizualno opredelil kot skledaste, lijakaste in oknaste. S stotinami terenskih meritev daljših oz. prečnih premerov ter globin je določil njihov velikostni red. Razmerje med globino in premerom mu je omogočilo približno oceno, v katero skupino vrtača spada. Prav nič pa tako ni povedal o njeni obliki, saj posameznih oblik ni predhodno kvantitativno definiral. Enako je izpeljal poprečni naklon pobočij, tako da je izračunal arcustangens razmerja med globino in polmerom vrtače.

Do danes večina merilcev vrtač bolj ali manj ponavlja isti postopek, oz. izpeljuje še nekatere dodatne parametre (P. W. Williams, o. c., 155, K. Paterson, 1980, 111). Pozabljajo pa, da je Cvijič vrtače tako le umerjal, obliko in vse ostalo, kar izhaja iz nje, pa določal »na oko«. Njegovemu postopku merjenja torej nevede pripisujejo morfometrično vsebino, ki je ni nameraval, niti ni mogel imeti.

To pravzaprav ni presenetljivo. Golo terensko merjenje je z opremo, s katero običajno razpolagamo, zamuden posel. Podrobnejše in natančnejše ter tako ciljem morfometrije bližje merjenje vrtač je tako rekoč onemogočeno. Pozabiti tudi ne smemo, da do pojava računalnikov kako obsežnejše preračunavanje ne bi bilo smotno. Cvijičevi nasledniki so merili bolj ali manj nereprezentativne ekstreme, ne da bi se vprašali, ali tako sploh moremo dobiti želeno informacijo (I. S. Evans, 1972, D. M. Mark, 1975). Ker so ekstremne vrednosti običajno tudi statistično nestabilne, je lahko razumeti, da dosti več kot Cvijič tudi njegovi nasledniki niso mogli ugotoviti.

Žal so pri svojem delu uporabili oz. vpeljali neustrezen termin, kar je zameglilo možnost resničnega razvoja. Slejkoprej bi bilo v našem primeru namesto »morfometrija« ustrežnejše pisati »fenomenometrija«, če si kot pojav (gr. *phainomenon*) predstavljamo vrtačo. Parametrov, ki določajo obliko (kar je le ena izmed geometrijskih lastnosti tega pojava) pa nismo niti definirali!

Pri sistematičnem proučevanju krasa se pogosto srečamo z vprašnjem učinkovitejšega merjenja vrtač, ki bi bilo po eni strani še dovolj gospodarno, po drugi pa bi z njim zbrali tiste parametre, ki dejansko izražajo obliko (= *morphe*). Ker je bistvo vsakega takšnega merjenja v določanju prostorskih koordinat posameznih informativno pomembnih točk, se problematika osredotoči na dve vprašanji, in sicer na izbor merskih točk ter na izbor matematičnega modela, ki ga priredimo merskim točkam in z njim nadomestimo analogni informacijo.

Ker razpolagamo z okrog 500 geodetskimi meritvami vrtač in načrti v merilu 1:1000 (P. Habič, 1969, 74), sem najprej pretehtal njihovo morfometrično informativnost. Žal, so ti podatki z morfometričnega stališča neuporabni. Bolj kot sorazmerno majhno merilo načrtov, moti sam način terenskega merjenja, namreč standardna tahimetrija.. Po tej metodi izmerimo primerno

število točk vzdolž t. i. terenskih linij. Vmesne vrednosti kasneje interpoliramo ročno ali linearno. Zamisel terenskih linij izhaja iz drobnega fluvialnega reliefa in tako nasilno pojačuje krasu manj pomembne linearne podrobnosti, bistvene, ki so centrične, pa opušča. Dobljeni podatki so popolnoma uporabni za umerjanje vrtač, kot izhodišče morfometriji pa odpovedo. Za to potrebuje močan način merjenja, ki naj čim bolj ustreza zahtevam morfometrije.

Vnaprejšnje nepoznavanje podrobne geometrije vrtač nam narekuje, da merimo koordinate točk po slučajni ali pravilni mreži. Ker nam druga pot omogoča matematično bistveno lažje in gospodarnejše prijeme (T. E. H. W h i t t e n, M. E. V. K o e l l i g, 1973), sem se odločil vzorčevati po zvezdasti mreži s središčem v najgloblji točki vrtače.

Pri izboru matematičnega modela je teoretično neskončno mnogo poti. Dejansko pa smo vezani na zelo pičel izbor funkcij, ki se že same po sebi dovolj približajo obliki vrtače. Oblika sinusoide je že doslej najbolj razširjena, čeprav le deskriptivno utemeljen model prereza vrtače. Zato je razumljivo, da pride trigonometrični polinom in z njim tudi ostale Fourierjeve tehnike v najožji izbor pri modeliranju vrtač. Kot pa je pokazala nadaljnja raziskava, je to med preprostimi matematičnimi orodji sploh najbolj prikladno.

Pri dodelovanju metode sem se lahko oprl na C. L. S t a b l e r j e v o (1968) delo, v katerem je obdelal možnosti uporabe Fourierjevih tehnik pri klasifikaciji tektonskih gub. Ker je podobnost med tektonskimi gubami in morfologijo vrtač v prerezu očitna, je precej temeljnih vprašanj, ki se enako nanašajo tudi na vrtače, rešil že Stabler in mi je bilo potrebno le nadaljevati v tej smeri.

Julija 1983 sva z M. Trobičem poskusno izmerila dvajset vrtač v Lanskem vrhu severno od Planinskega polja in vzporedno razvila tudi tehnologijo merjenja. V nadaljnjih mesecih sem razvil in preizkusil matematične postopke za obravnavo merskih podatkov. Za rutinsko obdelavo sem izdelal programski paket v jeziku BASIC, s pomočjo katerega lahko raziskujemo vrtače na mikroračunalniku Sinclair ZX Spectrum.

V začetni fazi raziskovanja sem se dejansko lahko posvetil le formalnemu razvoju tehnologije. Kljub temu pa sem se že ob samem preizkušanju posameznih postopkov lahko dokopal do spoznanj, ki so bistveno razširila dosedanje znanje o vrtačah. Menim, da vrtač s pomočjo Fourierjevih tehnik ne le gospodarno izmerimo — in potem predstavimo petdeset in večkrat natančneje kot doslej — temveč da to odpira tudi nove poti razumevanja vrtač.

ZAMISEL METODE

Izhajamo iz splošne ugotovitve, da so vrtače po zunanem izgledu in (domnevno) nastanku centrične globeli. V najglobljo točko, ki jo imejmo za središče, postavimo koordinatno izhodišče. Z njega nato žarkasto posnamemo primerno sodo število polrezov, vzdolž katerih merimo višine posameznih točk nad najnižjo točko. Zaradi nadaljnjega preračunavanja je smotrno, da postavimo polreze v enakih kotnih razdaljah.

V izračunu neizmerjene predele polrezov med posameznimi merskimi točsami nadomestimo s trigonometričnim polinomom, katerega koeficiente izra-

čunamo iz merskih podatkov. Kvadrante posameznih amplitud običajno prikazemo kot linije na periodogramu, kjer nam dajejo linijski spekter.

Pri sintezi lahko opustimo posamezne valovnice. To učinkuje kot pasovno cedilo in loči zeleno informacijo od motnje, ki ostane v izpuščenem pasu. Pomembno je le, da vemo, v katerem spektralnem pasu se motnja nahaja. Tako izračunan trigonometrični polinom da prečiščeno sliko polreza, ki se merskim podatkom prilega po kriteriju najmanjših kvadratov, polje podatkov pa se koristno zmanjša.

MERILNI POSTOPEK

Merilni postopek podajam podrobno razčlenjen v posamezne korake, tako da ga je čim lažje ponoviti. Koraki so opremljeni s številkami, ki služijo podrobnemu komentarju v nadaljevanju.

1. Določimo najglobljo točko vrtače, jo označimo s količkom in postavimo teodolit.

2. Določimo smer prvega polreza in aretiramo inštrument.

3. Določimo mesto oboda v smeri prvega polreza in tam zabijemo količek.

4. Napnemo merilno vrstico z označeno metražo tako, da visi med manjšo rogovilico (spodaj) in večjo rogovilico (zgoraj), ob enem pa natanko nad obema količkoma (Sl. 1/a).

5. Na merilni vrstici odčitamo razdaljo med obema količkoma in določimo višino vrstice nad njima.

6. Dobljeno razdaljo delimo s predvidenim številom meritev in izračunamo njihove posamezne metraže.

7. Postavimo lato h količku na obodu, naravnamo teodolit na primeren naklonski kot, ga fiksiramo in odčitamo.

8. Čitamo lato pri srednji niti na križu.

9. Postavljamo lato na mesta, izračunana v šestem koraku in čitamo pri srednji niti na križu.

10. Ko smo odčitali vse podatke v izbrani smeri, inštrument sprostimo in ga premaknemo v novo smer.

11. Vrnemo se h koraku 3. in ponovimo postopek v novi smeri.

12. Ko so izmerjeni vsi polrezi, tahimetrično posnamemo še vse ostale zanimive točke, npr. mesta geoloških meritev, vzorčevanja itd.

Opisani postopek je enostaven in dovolj hiter. V praksi so pomembne še nekatere neizogibne podrobnosti, ki pa sicer ne spadajo v samo merjenje:

1. Najglobljo točko vrtače praviloma težko določimo, je pa tudi sicer precej nestabilna. Tu se moramo pač ravnati po zdravi pameti. Na srečo pa za matematično izvrednotenje podatkov niti ni tako bistveno, ali smo dobro zadeli.

2. Za računski postopek je prva smer seveda čisto poljubna. Koristno pa je, da si z njo že vnaprej zagotovimo kako pomembno informacijo. Na poligonu v Lanskem vrhu sem jo določil kot zaokroženo poprečno vrednost smeri

vpada skladov na območju meritev. Tako sta prvi in četrti polrez vedno pravokotna na slemenitev.

3. Težko je določiti tudi mesto oboda in dostikrat pomaga premislek več kot toga navodila. Kot splošno pravilo lahko postavimo edino pogoj, da po-bočja od oboda proti središču konvergirajo, izven vrtače pa so bolj ali manj prema. Na srečo lahko pri nadaljnjem obravnavanju ugotovimo vsaj to, ali smo mesto oboda določiti pravilno in ev. naknadno popravimo meritve.

4. Merilna vrstica naj bo napeta toliko, kot pri umerjanju. Če je razdalja med rogovicama tolikšna, da bi povsaj že motil določanje položaja late, jo v sredini previdno podpremo. Ker gre pri določanju položaja late le za razmerja, si lahko privoščimo tudi opaznejši povsaj. V tem primeru bo razdalja med količkoma precenjena. Kontroliramo tako, da pri prvem čitanju lato odčitamo še pri zgornji in spodnji niti. Razdaljo tedaj izračunamo s formulami, običajnimi pri tahimetriji.

5. Pri napenjanju merilne vrvice bi le težko dosegli, da bi bila ničla nad enim izmed količkov. Če označimo odčitek nad spodnjim količkom z l_1 , odčitek nad zgornjim pa z l_2 , je poševna razdalja med njima (L) kar $L = l_2 - l_1$.

6. Prva meritev bo pri dolžini vrvice l_1 . Naslednja bo toliko bližje središču vrtače, za kolikor korakov smo se pač odločili. Če je teh korakov N , bo druga meritev pri $l_2 = l_1 - L/N$ tretja pa pri $l_3 = l_1 - 2L/N$ itd. Na poligonu v Lanskem vrhu sem izbral število korakov $N = 12$.

7. Pomembno je, da je naklonski kot daljnogleda (α) ves čas isti. To moramo upoštevati pri čiščenju vrtače.

8. Kot pri običajni tahimetriji, čitamo lato z milimetrsko natančnostjo.

9. Če naletimo na izračunanem mestu na kak štor, lato po plastnici umaknemo nekoliko v stran. Tega pa ne storimo v primeru škrapelj, skal samic itd. Vse to šteje v izmerjeno obliko vrtače in takšno motnjo odstranimo računsko. Zato je negotovost manjša, kot če bi »resnično površje vrtače« določali subjektivno.

10. Po želji in potrebi lahko čitamo lato še na drugih mestih v polrezu. Ne smemo pa pozabiti razdalje na merilni vrstici!

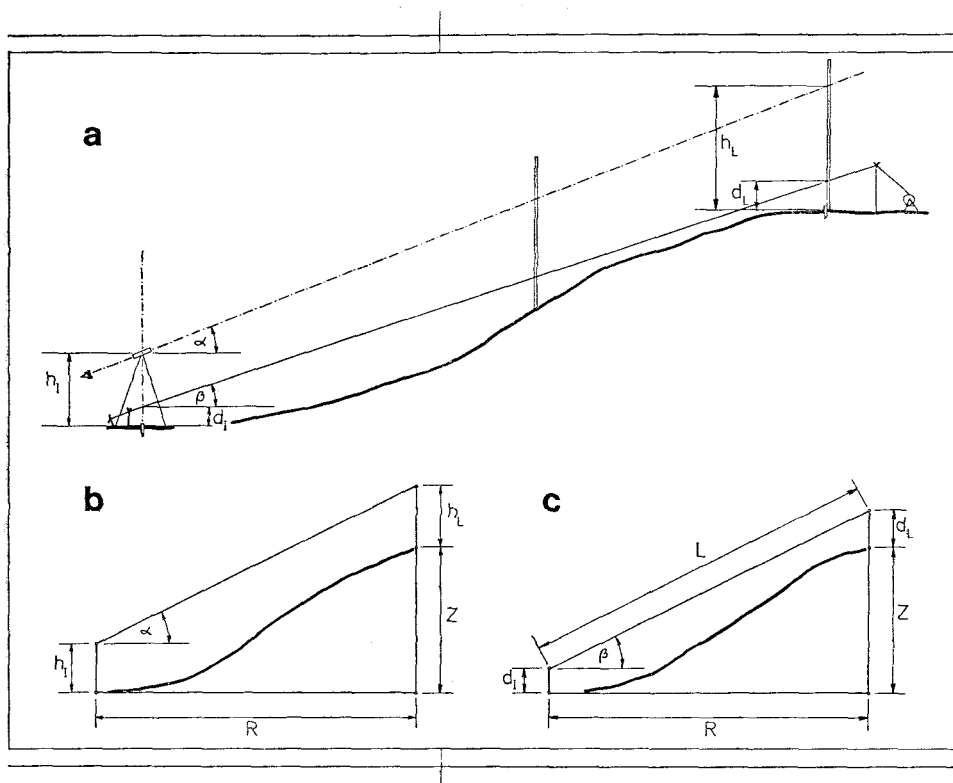
11. Na poskusnem poligonu v Lanskem vrhu sem meril v šestih smereh, oddaljenih za 60° .

12. Po potrebi lahko izmerimo še poljubno število dodatnih polrezov. Ne smemo pa zato opustiti osnovnih, ki morajo imeti enake kotne razdalje.

Po opisanem postopku merjenje posameznega polreza ne traja kaj več kot deset minut. Težave pa se pojavijo, če je vrtača preveč zaraščena. Mnogokrat traja čiščenje dosti dlje, kot merjenje samo.

PRERAČUNAVANJE TERENSKIH PODATKOV

Ne glede na to, kako bomo postopali pozneje, moramo terenske podatke spraviti v obliko, ki je primernejša rutinski uporabi. Kot smo merili posamezne polreze, jih tudi obravnavamo posamič. Zanima nas dolžina posameznega polreza, njegov višinski razpon in seveda relativne višine posameznih merskih točk.



Sl. 1 Način merjenja polreza in preračunavanje terenskih podatkov
 Fig. 1. The semiprofile surveying procedure and processing the terrain measuring data

S slike (1 b) razberemo odnose med naslednjimi količinami:

- R — dolžina polreza
- Z — višinski razpon polreza
- h_I — višina inštrumenta
- h_L — odčitek na lati (srednja nit)
- α — naklonski kot posamezne vizure

Povezuje jih enačba:

$$h_I + R \operatorname{tg} \alpha = Z + h_L \quad (1)$$

Žal sta v njej dve neznanki, namreč R in Z . Zato moramo iskati še nadaljnjih zvez. Iz slike 1/c, kjer nastopajo še količine:

- β — naklonski kot merilne vrvice
- d_I — višina merilne vrvice nad spodnjim količkom
- d_L — višina merilne vrvice nad zgornjim količkom
- L — poševna razdalja vzdolž merilne vrvice

razberemo še:

$$Z + d_L = L \sin\beta + d_1 \quad (2)$$

in

$$R = L \cos\beta \quad (3)$$

Enačbe (1), (2) in (3) združimo in preuredimo. Namesto $\operatorname{tg}\alpha$ pišemo kar T , namesto izraza $(h_1 - h_L - d_1 + d_L)/L$ pa pišimo B !

Sledi:

$$\sin\beta - T \cos\beta = B \quad (4)$$

Pri trigonometrični enačbi (4) upoštevamo samo pozitivno rešitev in dobimo:

$$\cos\beta = \frac{TB + \sqrt{T^2 - B^2 + 1}}{T^2 + 1} \quad (5)$$

Dolžino polreza (R) dobimo naravnost iz enačbe (3).

Združimo in preuredimo enačbi (1) in (2) ter upoštevamo enačbo (5), pa dobimo višinski razpon:

$$Z = R \operatorname{tg}\alpha + h_1 - h_L \quad (6)$$

Enačba (1) je popolnoma splošna in zato velja za poljubno točko v polrezu:

$$z_1 = r_1 \operatorname{tg}\alpha + h_1 - h_L \quad (7)$$

Če smo posamezne zaporedne meritve označili s celimi števili, začenši od 1 na obodu vrtače, je:

$$r_1 = R(N + 1 - i) / N \quad (8)$$

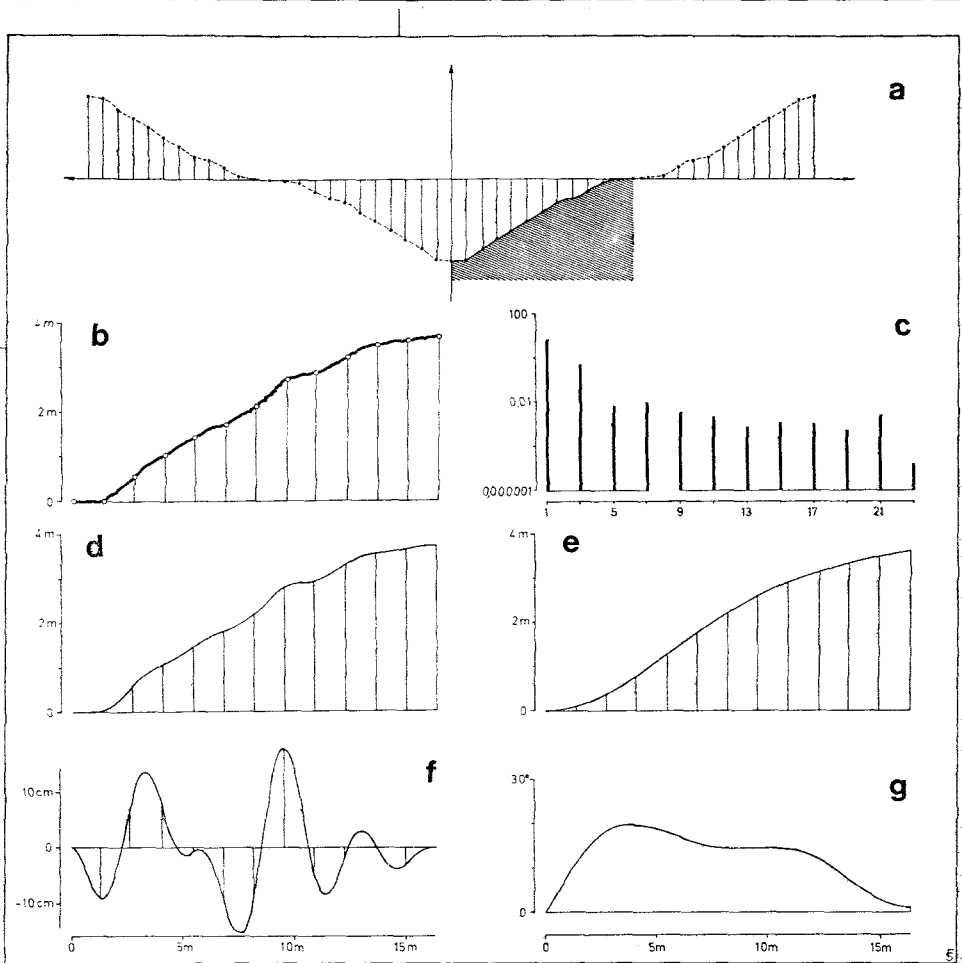
Z N smo že prej označili število meritev v polrezu.

IZVREDNOTENJE MERSKIH PODATKOV

Po izvršenem preračunavanju terenskih podatkov smo informacijo o posameznem polrezu spravili v obliko:

- azimut polreza
- dolžina polreza
- relativne višine točk vzdolž polreza.

Da je središčni prerez kolikortoliko pravilne vrtače v grobem podoben posameznemu ciklu valovnice, je očitno na prvi pogled. Žal pa je ena temeljnih ugotovitev mojih meritev prav to, da so si še najmanj korelirani diametralno nasprotni polrezi. Zato je nujno, da obravnavamo polreze posamič. Pri tem bomo morali manjkajoči del valovnice nadomestiti z zrcaljenjem, sicer bi trigonometrična interpolacija izgubila svoj smisel.



- Sl. 2. Obdelava polreza 3 (azimut 35°) vrtače št. 70
- a — Dvakratno zrcaljenje polreza
 - b — Prvotna oblika polreza in njegovo vzorčevanje
 - c — Fourierjev spekter polreza
 - d — Rekonstrukcija polreza s pomočjo celotnega spektra
 - e — Rekonstrukcija polreza s pomočjo dolgovalovnega paketa
 - f — Rekonstrukcija kratkovalovnega paketa
 - g — Naklon zbitrenih pobočij polreza (v stopinjah)

- Fig. 2. The semiprofile Nr. 3 (dir. 35°), doline Nr. 70 processing
- a — Twofold semiprofile reflecting
 - b — The natural semiprofile shape and the way of sampling
 - c — The semiprofile Fourier spectrum
 - d — The semiprofile reconstruction using the whole spectrum
 - e — The semiprofile reconstruction using the long wave pack
 - f — The short wave pack reconstruction
 - g — The band pass filtered semiprofile slope inclination (in degrees)

Pri zrcaljenju moramo upoštevati dve osnovni zahtevi. V najgloblji točki, torej pri dnu, mora tudi zrcaljena krivulja ohraniti vrednost odvoda (naklona) enako nič, na obodu pa mora tudi zrcaljena krivulja ohraniti prvotno vrednost odvoda. Zahtevam je zadoščeno, če z zaporednim lihim in sodim zrcaljenjem dosežemo simetrijo IV vrste (J. N. Bronštejn, K. A. Semendjajev, 1980, 644), kot je prikazano na sliki 2/a.

Za nadaljnje preračunavanje moramo podatke prilagoditi uporabljenemu tipu simetrije. To dosežemo tako, da višinam posameznih točk nad dnom (z_i) odštejemo višino točke na obodu ($z_L = z_1 = Z$). Oddaljenost od središča označimo namesto z r_i z x_n , kjer je $n = N + 1 - i$. Tedaj velja:

Točka	Koordinate:	
	Prvotne razmere:	Novo razmere:
dno	$r = 0, z = 0$	$x_0 = 0, y_0 = -Z$
pobočje	$r = r_i, z = z_i$	$x_n = Rn/N, y_n = z_i - Z$
obod	$r = R, z = Z$	$x_N = R, y_N = 0$

Koeficiente trigonometričnega polinoma tedaj izračunamo po enačbi:

$$a_{(2k+1)} = \frac{y_0}{N} + \frac{2}{N} \sum_{n=1}^{N-1} y_n \cos \left[\frac{\pi n}{2N} (2k+1) \right] \quad (9)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

kar je v diskretni obliki zapisana splošnejša enačba, ki jo za simetrijo IV vrste podajata Bronštejn in Semendjajev (o.c.). Zaradi tipa simetrije nastopajo samo kosinusovi koeficienti lihich harmonskih števil.

Da izračunamo položaj poljubne točke na polrezu, uporabimo običajno formulo za Fourierjevo sintezo:

$$y(x) = \sum_{k=0}^{N-1} a_{2k+1} \cos \left[(2k+1) \frac{\pi x}{2N} \right] \quad (10)$$

Za abscisne vrednosti, kjer je $x = n$, dobimo seveda nazaj prvotne ordinatne vrednosti (y_n). Neodmerjene vrednosti vmes pa nadomestimo z matematično konstrukcijo. Presečišča s plastnicami izračunamo s kakim iterativnim postopkom, npr. bisekcijo.

IZLOČANJE PERIODIČNIH MOTENJ

Spomnimo se še enkrat, da nam pomenijo koeficienti a_{2k+1} amplitude valovnic s harmonskimi števili $r = 2k + 1$. Posamične valovne dolžine izračunamo iz enačbe:

$$\lambda_{2k+1} = 4N / (2k+1)R \quad (11)$$

Ker smo v polreзу izmerili dvanajst točk in iz teh izračunali dvanajst koeficientov, je nekaj valovnic daljših od polreza, nekaj pa zagotovo krajših. Harmonškemu številu 23 ($= 2 \times 11 + 1$) pripada npr. val dolžine $\lambda_{23} = 0,1737 NR$, oz. 5.75 cikla na polrez.

Sedaj se lahko odločimo, kaj bomo imeli za motnjo in kaj za prvotno obliko vrtače. Najobičajnejša motnja, ki jo opazimo že pri prvi terenski meritvi, so razne škraplje oz. izdanki žive skale. Prav ti se nam kot nekakšni valovi vrinjajo na pobočja vrtače in nam včasih celo otežujejo določiti mesto oboda. Ker smo obliko polreza razstavili na posamezne valovnice, se moramo samo odločiti, katere bomo opustili. Glede na to, da so vrtače centrične, je smiselno opustiti vse tiste, ki imajo dva ali več ciklov na polrez.

Iz enačbe (11) lahko izračunamo, da pride pri harmonškem številu $r = 2k + 1 = 7$ na polrez 1,75 cikla, pri harmonškem številu $r = 9$ pa 2,25 cikla. Tako nam prve štiri valovnice s harmonskimi števili 1, 3, 5 in 7 (dolgovalovni paket) sestavljajo osnovno obliko polreza, preostale, s harmonskimi števili od 9 do 23, pa kratkovalovni paket v katerem so zbrane motnje, če jih obravnavamo v čisto geometrijskem smislu. Za zbistreno informacijo o posameznem polreзу potrebujemo tedaj samo prve štiri Fourierjeve koeficiente in dolžino polreza. Ker smo na terenu morali odmeriti 15 količin, je prihranek okrog 65 %.

V enačbi (10) tedaj upoštevamo samo dolgovalovni paket in rekonstruiramo osnovno obliko polreza (brez motenj). Če pa želimo proučevati le-te, sintetiziramo njihovo obliko iz kratkovalovnega paketa. Na sliki 2 je prikazan ves postopek od vzorčevanja polreza, preko periodograma do sinteze dolgovalovnega oz. kratkovalovnega paketa.

Če enačbo (10) odvajamo na x , dobimo tangens naklonskega kota površja v poljubni točki polreza, vendar v njegovi smeri. To pomeni, da je na ta način dobljeni naklon enak gradientu le v primeru, če je vrtača popolnoma centrična.

Lahko uporabimo le dolgovalovni paket in dobimo prvo informacijo o zbistreni obliki polreza. Računamo po enačbi:

$$tg\varphi = y'(x) = \frac{-\pi}{2N} \sum_{k=0}^3 a_{2k+1} (2k+1) \sin \left[(2k+1) \frac{\pi x}{2N} \right] \quad (12)$$

S kotom φ smo označili zbistreni naklon pobočja vrtače v poljubni točki polreza, gledano od središča proti obodu.

CELOSTNA SLIKA VRTAČE

Posamezen polrez torej lahko podamo z vektorjem, katerega elementi so prvi štirje Fourierjevi koeficienti in njegova dolžina. Če smo v vrtači izmerili npr. šest polrezov, je cela vrtača opisana z matriko, ki jo sestavlja ustreznih šest vektorjev. Fourierjeve koeficiente dolgovalovnega paketa spravimo v polje dimenzij 4×6 . Dodamo zgoraj še vektor-vrstico, v katerem zberemo

dolžine posameznih polrezov. Za vrtačo, označeno na poligonu s št. 70, dobimo:

19,28	15,60	16,34	16,57	18,34	18,05
-4,96	-3,84	-2,79	-4,40	-5,55	-6,46
-0,09	-0,95	-0,73	-0,54	-0,91	-0,53
0,15	-0,07	-0,08	-0,06	0,68	0,37
-0,32	-0,10	-0,11	0,12	0,04	-0,09

Količine so podane v metrih. Vsak stolpec vsebuje podatke enega polreza. Če seštejemo spodnje štiri elemente posameznega stolpca, dobimo negativno vrednost višinskega razpona v tem polrezu.

V gornji vrstici je zbrana informacija o obsegu, v spodnjem minorju pa o obliki vrtače. Prostorske koordinate najgloblje točke in smer prvega polreza moramo seveda zabeležiti posebej, da je potem naša informacija res popolna.

Nad vektorji-stolpci, ki nam v gornji matriki predstavljajo posamezne polreze, lahko sedaj izvajamo različne operacije numerične taksonomije, oz. prepoznavanja vzorcev. Podobno, kot je C. L. Stabler (o. c., 347) preprosto klasificiral gube na osnovi odnosov med prvo in tretjo valovnico, lahko tudi mi razvrstimo polreze vrtač v skupine, ki jih določa sorodna geometrija. Glede na svojstveno obliko polrezov, pa sistem ni dvodimenzionalen, kot je v slučaju gub, temveč štiridimenzionalen. Zato bo grafična slika pač nekoliko bolj zapletena. Cvijičevi modeli (o. c.) imajo v tem sistemu točno določeno mesto.

Iz dolžine polrezov in višinskega razpona, ki ju za vsak polrez vsebuje gornja matrika, lahko s pomočjo osnovnih enačb Fourierjeve sinteze izračunamo tudi ves potek oboda vrtače. Ker so te enačbe v prav vseh učbenikih, jih na tem mestu izpuščam. Na sliki 3 sta prikazana tloris in stranski ris oboda malo prej obravnavane vrtače.

Doslej smo se ukvarjali le s točkami vrtače, ki jih zajemajo neposredne meritve oz. krivuljna interpolacija merskih podatkov. S podobnimi razmišljanji, ki pa so nekoliko bolj zapletena, lahko izračunamo poljubno točko v vrtači.

Neposredno lahko izračunamo obliko izmerjenega polreza. Ta naj bo v splošni obliki podana s parom enačb:

$$R = R(\psi) \quad 0 \leq \psi < 2\pi \quad \text{in} \quad (13)$$

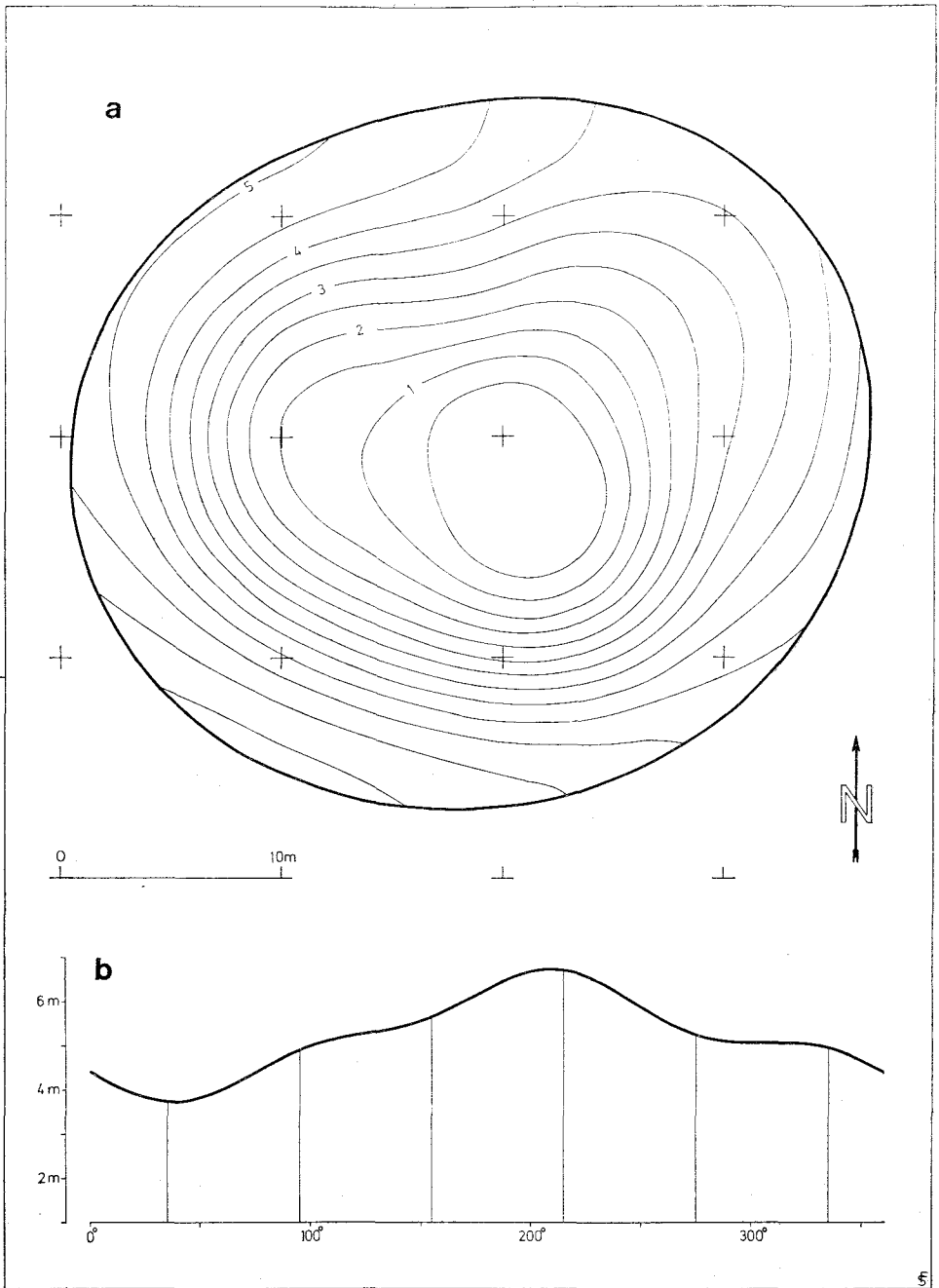
$$Z = Z(r) \quad 0 < r = R(\psi) \quad (14)$$

Podobno nam obliko oboda določa par enačb:

$$R = R(\psi) \quad 0 \leq \psi < 2\pi \quad \text{in} \quad (13)$$

$$H = H(\psi) \quad 0 \leq \psi < 2\pi \quad (15)$$

Imenujmo prvo prostorsko krivuljo (en. (13, 14) polreznica drugo (en. 13, 15) pa obodnica. Želimo dobiti koeficiente polreznice s poljubnim azimutom. Te bi lahko izračunali, če bi poznali višine vsaj nekaterih točk vzdolž tega polreza, saj njegovo dolžino in višinski razpon lahko dobimo neposredno iz obodnice.



Če se želimo vnaprej ukvarjati z zbistreno obliko vrtače (kar je skoraj vedno slučaj) nam zadostujejo le štiri take točke. Definirajmo sedaj štiri oblikovnice, ki potekajo skozi štiri pravilno razporejene točke vseh (poznanih in nepoznanih) polrezov. Njihove aplikatne vrednosti v znanih polrezih izračunamo iz zbistrenih spektrov posameznih polrezov, medtem ko so njihove razdalje od središča kar

$$r_n = \frac{R(\psi)}{4} n \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (16)$$

Očitno je četrta oblikovnica identična z obodnico. Sedaj imamo podatke, da izračunamo Fourierjeve koeficiente enačb posameznih oblikovnic, ki jih opisujeta enačbi

$$r_n = R_n(\psi) \quad \text{in} \quad (17)$$

$$h_n = H_n(\psi) \quad (18)$$

Z njihovo pomočjo izračunamo aplikate štirih točk (pravzaprav treh, ker po eno dobimo že iz obodnice), odtod pa po enačbi (9) iskane Fourierjeve koeficiente.

Sinteza po enačbi (10) nam da višino nad dnom poljubne točke v poljubnem polrezu.

Z bisekcijo lahko ob uporabi enačbe (10) izračunamo točke na izbranih plastnicah vzdolž vsakega polreza, kar nam omogoči, da izrišemo sliko vrtače s plastnicami tako natančno, kot želimo, oz. kot nam dovoljuje informacija, zbrana v gornji matriki (sl. 3/a).

SPLOŠNE UGOTOVITVE

Predstavljena metoda se je izkazala kot terensko dovolj gospodarna in učinkovita, tako da bistveno prekaša vse doslej znane mi postopke merjenja vrtač. Pri obdelavi podatkov se je pokazalo, da dvanajst merskih točk vzdolž posameznega polreza povsem zadostuje. Pač pa je šest polrezov na vrtačo, kolikor smo jih merili doslej, komaj dovolj. Priporočljivo bi bilo njihovo število povečati vsaj na osem.

Cvjičeve parametre lahko izračunamo neposredno iz dobljenih podatkov. Zastavlja pa se vprašanje, ali sploh imajo kakšen večji smisel. Iz slike 3, kjer je prikazana najpravilnejša izmed izmerjenih vrtač, je razvidno, kako malo osnovano bi bilo nadaljnje sklicevanje na daljši oz. krajši premer in globino. Vrtače so pač premalo pravilne, da bi tako o njih mogli povedati kaj bistve-

- Sl. 3. Vrtača št. 70
a — Tloris z izračunanimi plastnicami
b — Stranski ris oboda kot funkcija azimuta polmera

- Fig. 3. Doline Nr. 70
a — The computed ground plane contour lines
b — The computed lip elevations above the bottom point, as the function of the radius direction.

nega. Prav tako je jasno, da je iskanje povprečnega naklona strel v prazno. Nakloni se vzdolž polreza oz. plastnice, kot smo lahko ugotovili iz celote podatkov, precej zakonito spreminjajo (Sl. 2/g). V nadaljnjem bo potrebno ugotoviti te zakonitosti, jih matematično izraziti in opisati s primernimi parametri. Le-ti bodo ustrezneje nadomestili sedanji »poprečni naklon«.

Pri obdelavi doslej znanih podatkov so se pokazale nekatere doslej manj opažene ali manj znane zakonitosti, ki bi se jim kazalo v bodoče bolj posvetiti. Že s slike lahko opazimo, da je predstavljena vrtača vsaj dvožrelna, če ni različno učinkovitih središč odnašajo celo več. Prav tako bi sama pobočja morda laže kot s stožcem opisali s piramido z zaobljenimi robovi. Ploskve te piramide se jasno prilegajo znanim strukturnim smerem in pri nadaljnjem proučevanju bomo verjetno laže določili vsebino povezave med tektoniko in oblikovanjem vrtač.

S slike 2/f lahko razberemo, da je v kratkovalovnem paketu dobro izraženo onduliranje z valovno dolžino okrog 3 m. To se presenetljivo sklada z V. Nemčev o (1970, 65) planetarno dimenzijo reda 22, ki meri 3.041 m. Ker se to ponavlja v različnih vrtačah in različnih polrezih ni odveč vprašanje, ali skladanje ni kaj več kot slučajno. O tem bodo morale več povedati nadaljnje raziskave.

H koncu ne smem zamolčati manj ugodnih plati uporabljene metodologije. Živoskalna pobočja in osrednji sediment smo upoštevali kot enakovredna medija, čeprav lahko pričakujemo, da informativno nista enakovredna. Ugotovljena oblika vrtače je torej zgolj formalna in izraža trenutno stanje. Dokler nam tehnična sredstva v mejah gospodarnosti ne omogočajo drugačnih posegov, bomo raziskovali pač površinsko morfologijo vrtač. Kasneje pa bo potrebno obravnavati živoskalno kotanjo zase in ilovnato polnilo zase.

Ogrodje našim meritvam dajeta najgloblja točka vrtače in obod. Nakazal sem že, da ju je večkrat težko določiti. Po bistrenju podatkov se lahko celo izkaže, da smo ju določili napačno. Na srečo to matematične obdelave ne moti — v najslabšem primeru nekoliko podaljša preračunavanje. Jasno pa kaže, na kako šibkih nogah stojijo raziskave, ki precenjujejo informativnost Cvijičevih parametrov.

Opisani postopek merjenja in numerične obdelave vrtač priporočam vsakomur, ki bi si želel ukvarjati s podrobnejšim proučevanjem vrtač. Zato so računalniški programi resnim interesentom vedno na razpolago.

LITERATURA

- Beck, B. F., 1984 (ur.): Sinkholes: their geology, engineering & environmental impact, Proceedings of a conference sponsored by the Florida Sinkhole Research Institute, 15—17 Oct., 1984, Orlando, A. A. Balkema, 1—429, Rotterdam, Boston.
- Bronštejn, J. N., Semendjajev, K. A., 1963: Matematični priručnik, Založba Življenje in tehnika, 1—699, Ljubljana.
- Chorley, R., J., 1972: Spatial analysis in geomorphology. Harper & Row, 1—394, New York, Evanston, San Francisco, London.
- Cramer, H., 1941: Die Systematik der Karstdolinen. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie, und Paläontologie, Beilage-Band, Abt. B. 85, 293—382.
- Cvijić, J., 1895: Karst, geografska monografija. 1—135, Beograd.
- Davis, J. C., 1971: Statistics and data analysis in geology. Willey, 1—550, New York.
- Day, M., 1983: Doline morphology and development in Barbados. Annals of the Association of American Geographers, 73 (2), 206—219.
- Evans, I. E., 1972: General morphometry, derivations of altitude and descriptive statistics. V: R. J. Chorley (ur.), Spatial analysis ..., 17—89.
- Habič, P., 1969: Preiskave vrtač v trasi avtoceste Vrhnika—Postojna. Elaborat v arhivu IZRK ZRC SAZU Postojna, 1—31. (V prilogi geodetska izmera vseh vrtač v trasi).
- Habič, P., 1970: Poročilo o kraških pojavih na območju projektiranih variant avtoceste Senožeče—Divača—Sežana. Elaborat v arhivu IZRK ZRC SAZU Postojna, 1—4.
- Habič, P., 1972: Kras med Senožečami in Sežano. Elaborat v arhivu IZRK ZRC SAZU Postojna, 1—31.
- Habič, P., 1974: AC Senožeče—Divača—Sežana, poročilo o vrtačah. Elaborat v arhivu IZRK ZRC SAZU Postojna, 1—20. (V prilogi geodetska izmera vseh vrtač v trasi).
- Habič, P., 1978: Razporeditev kraških globeli v dinarskem krasu. Geografski vestnik 50, 17—29.
- Jennings, J. N., 1975: Doline morphometry as a morphogenetic tool; a New Zealand example. New Zealand Geographer, 31 (1), 6—28.
- Lavalle, P., 1968: Karst depression morphology in South central Kentucky. Geografiska Annaler, 50 A, 2, 94—108.
- Mark, A. M., 1975: Geomorphometric parametres: a review and evaluation. Geografiska Annaler, 57 A, 3—4, 165—177.
- Mezősi, G., Bárány, I., Tóth, I., 1978: Karstmorphometrische Untersuchungen im Gebirge Aggtelek. Acta universitatis Szegediensis, Acta Geographica, 18, 131—140.
- Nemec, V., 1970: The law of regular structural patterns: its application with specials regard to mathematical geology. V: D. F. Merriam (ur.), Geostatistics, Plenum press, 63—78, New York, London.
- Ogden, A., 1984: Methods for describing and predicting the occurrence of sinkholes. V: Beck, B. F., (ur.): Sinkholes ..., 177—182.
- Paterson, K., 1980: Closed depressions in limestone areas: some teaching approaches for the physical geographer. Geography, No. 287, Vol. 65, Part 2, 107—118.
- Soto, A. E., Morales, W., 1984: Collapse sinkholes in the blanket sands of the Puerto Rico karst belt. V: Beck, B. F., (ur.): Sinkholes ..., 143—146.
- Stabler, C. L., 1968: Simplified Fourier analysis of fold shapes. Tectonophysics, 6 (4), 343—350.
- Sušteršič, F., 1982: Nekaj misli o oblikovanosti kraškega površja. Geografski vestnik 4., 19—28.
- Troester, J. W., White, E. L., White, W. B., 1984: A comparison of sinkhole depth frequency distributions in temperate and tropic karst regions. V: Beck, B. F., (ur.): Sinkholes ..., 65—73.

- Whitten, T. E. H., Koellig, M. E. V., 1973: Spline-surface interpolation, spatial filtering and trend surfaces for geological mapped variables. *Mathematical geology*, 5, 2, 111—126.
- Williams, P. W., 1972: The analysis of spatial characteristics of karst terrains. V: R. J. Chorley (ur.), *Spatial analysis...*, 133—163.

A METHOD OF DOLINE MORPHOMETRY AND COMPUTER PROCESSING

(Summary)

The dolines are among the first metrically processed geomorphic phenomena (J. Cvijić, 1895) and one may wonder, why our insight into their real shape and formative processes has remained up till now quite limited. Several researchers tried to study them more or less in the way Cvijić had outlined, but their work hasn't fulfilled all their expectations. So one may state that something must be wrong with the methodology, i. e. morphometry used.

Cvijić used his parametres to scale the dolines, rather than to describe their shape. Provided that the shape is a record of doline history, one can miss completely if having measured Cvijić's parametres, as they contain no shape information. If intending to measure the latest, that is the true point of morphometry, measurements of other parametres must be developed.

In the 1983 the Institute for karst research (Postojna) investigated different ways to achieve this aim, encompassing the surveying economy, mathematical simplicity and computing ease. The method, based on C. L. Stabler's (1968) folded shapes measurements has been adopted and 20 dolines North of Planinsko polje were surveyed and processed.

The surveying method is based on tachymetry. The theodolite is fixed in the centre (the lowest point) of the doline. Six semiprofiles are stabilized in a sixfold regular star pattern. Twelve equidistant elevations are measured along each semiprofile, the most distant on the very doline perimeter. It is advised to choose the semiprofiles orientation in such a way that at least two of them follow some local geological direction.

A combined even-odd symmetry operation is then used to achieve the IV type symmetry (Fig. 2/a) and the data are processed by cosine Fourier transform. Twelve odd cosine coefficients are obtained. Assuming that the distortion of a semiprofile is produced by the undulations of shorter wavelengths than half semiprofile length, the spectrum can be divided into two bands. The long wave pack includes the first four harmonics and a Fourier synthesis of them yields the undistorted semiprofile shape. On the other hand, the short wave pack contains the periodic distortions as the bedrock outcrops, karrenfields, etc. appearing on the doline slopes.

The doline lip shape is obtained by the canonical trigonometric interpolation among the semiprofile horizontal and vertical spans. Having combined both procedures in the way, used in the twodimensional Fourier transform, the whole doline shape is reconstructed. The derivation procedure gives the information of the doline slopes direction and inclination.

A single semiprofile processing can be performed in the way exposed by a programmable calculator, like TI 58, while the whole doline can be processed by a microcomputer like Sinclair ZX Spectrum. A more powerful computer brings about the velocity and the elegance of the procedure.

The terrain information about the doline is given by the 72 measuring points coordinates. After the band filtering the information is condensed in a 6×5 matrix, each column representing a semiprofile. The lower four lines contain the first four harmonics, while the first line contains the horizontal semiprofile spans.

All the Cvijić's parametres can be readily calculated from these data. So, the information about the doline shape is collected in the lower 6×4 minor matrix, while its dimensions are contained in the first line. The first semiprofile direction must be given separately.

If the doline is not forested, it can be surveyed in an hour and a half time. The computer processing time depends on the machine used, but generally seen it is not time consuming.

The method has a weak point too. It is that the bedrock slopes and the sediment fill of the dolines are treated as morphologically equally important media, though the later is uncomparably less stable, being exposed to presedimentation.

Nevertheless, the method appears to be economical and effective enough to study and classify the actual doline shape. The Institute is continuing the measurements in other regions of the classical Karst. It is recommended to other researchers to adopt it to obtain comparable data.