

## STUPŇOVITÁ ŠTRUKTÚRA DNA KORYTA VODNÉHO TOKU S VÝRAZNÝM POZDĹŽNÝM SKLONOM (NA PRÍKLADE HORNÉHO TOKU RIEKY TOPL'A)

Milan Frandofer\*, Milan Lehotský\*\*

\* Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Katedra fyzickej geografie a geoekológie,  
Mlynská dolina, 842 15 Bratislava, mfrandofer@gmail.com

\*\* Geografický ústav SAV, Štefánikova 49, 814 73 Bratislava, geogleho@savba.sk

### Step-like channel structure of a high-gradient stream (exemplified by the upper reach of the River Topľa)

A staircase-like longitudinal profile of the Topľa headwater stream channel is analysed and the resultant parameters of step heights, wavelengths, relative steepness and vertical sinuosity are compared with well-established values published in other studies. While the mean step height and wavelength do not show significant differences, the relative steepness factor and vertical sinuosity index are relatively low compared to the theoretical values of a developed and stable step/pool system, performing as the maximum flow dissipator. Recent extreme flood events in the Topľa watershed may be the cause of system disruption. However, a recovery of the system stability was observed in other step-pool channels worldwide indicating that these rhythmic forms reflect a general self-organization phenomenon operating on the earth's surface.

**Key words:** step-like channel, headwater stream, River Topľa, step morphometry, relative steepness factor

### ÚVOD

Riečna sieť Slovenska má vďaka morfoštruktúrnej predispozícii značne zastúpené pramenné zóny – zdrojové zóny sedimentov (Schumm 1977 a Lehotský a Novotný 2004), v ktorých sa generuje odtok a transport sedimentov. Predstavujú ich malé vodné toky nízkeho rádu (0 až 2) v záveroch dolín, ktoré majú spravidla vyšší pozdĺžny sklon ako toky v nižších častiach ich povodí. Terminologicky nie sú tieto typy malých vodných tokov v slovenskej literatúre dostatočne definované. V zahraničnej literatúre sa najčastejšie nazývajú *headwater streams*, alebo generálne *mountain streams*. V minulosti sa u nás takéto typy vodného toku v hydrologicky orientovaných prácach nazývali ako „malé vodné toky“ alebo „bystriny“. Rešpektujúc morfológické špecifiká takýchto typov tokov, ako aj zaužívanú anglickú terminológiu, sú v tomto príspevku definované ako toky s výrazným pozdĺžnym sklonom koryta.

Potreba výskumu malých tokov nižšieho rádu začala byť v našej literatúre zdôrazňovaná najmä v súvislosti s lokálnymi povodňami (Solín a Grešková 1999, Solín 2005 a 2011). Práce Jakubisa (2008 a 2009) zároveň kladú dôraz na hydrologické a najmä hydraulické špecifiká malých vodných tokov. Vo svetovej geomorfológii nebol donedávna veľký záujem o tieto toky, Benda et al. (2005) ho spájajú s absenciou zdrojov, najmä rýb, ale aj so zlou dostupnosťou a s ňou spojenou náročnosťou terénnych prác. Vo svojich prehľadoch Chin a Wohl (2005) a Wohl (2010) dokumentujú v poslednej dekáde vysoký nárast

záujmu geomorfológov o pramenné, resp. horské toky. Dominujú práce o morfológii, morfodynamike a morfogenéze korýt malých horských tokov ako integrálneho komponentu fluvialného geosystému spájajúceho svahový subsystém s korytovonivným subsystémom. Preto Benda et al. (2005) navrhujú tieto toky generálne klasifikovať ako koluviálne. Previazanosť horských pramenných tokov so svahmi zvyšuje ich komplexitu, ktorá limituje aplikáciu existujúcich tradičných konceptov a kvantitatívnych modelov hydrauliky a fluvialnej geomorfológie (Adams a Spotila 2005 a Golden a Springer 2006). Hlavnou výzvou pre geomorfológov je kvantitatívne vyjadrenie procesov v korytách tohto typu tokov, bez ktorého je sťažená predikčná schopnosť evolučných modelov krajiny postavených na vstupných premenných parametroch klímy, litologických a tektonických podmienok (Adams a Spotila 2005).

Morfológia korýt malých horských tokov je veľmi zložitá, zdanlivo až chaotická. Je podmienená nielen nízkym stupňom vytriedenia a celkovou heterogenosťou dnového materiálu, ale aj prítomnosťou zvyškov dreva (mŕtveho dreva – LWD – *large woody debris*). Vplyv zvyškov dreva na morfológiu koryta je obzvlášť významný v malých tokoch, kde majú jednotlivé kusy drevnej hmoty podstatne väčší vplyv vďaka ich veľkosti porovnateľnej s veľkosťou koryta (Hassan et al. 2005).

Aj napriek zložitosti morfológie korýt horských tokov vzniklo niekoľko typov klasifikácií (Grant et al. 1990, Montgomery a Buffington 1997 a Halwas a Church 2002), v ktorých je najväčší prienik pri definícii systému stupeň/priehlbina (anglicky *step/pool*). Problematika systému stupeň/priehlbina bola študovaná v značnom rozsahu na tokoch v pohorí Santa Monica Mts. (Kalifornia, Spojené štáty americké) z hľadiska stability (Chin 1998), genézy (Chin 1999a), morfológie (Chin 1999b), periodicity (Chin 2002) a hydraulického významu (Chin 2003). Vo väčšom rozsahu sa systému stupeň/priehlbina venovali práce Zimmermann a Church (2001), Church a Zimmermann (2007) a Zimmermann et al. (2008). V Európe sa problematike venovala pozornosť najmä vo Švajčiarskych Alpách na tokoch Vogelbach (Milzow et al. 2006) a Erlenbach (Turowski et al. 2009, Molnar et al. 2010). V ostatnom období sa rieši táto problematika aj v Moravskoslezských Beskydách (Galia a Hradecký 2011).

Stupne sú tvorené akumuláciami kameňov a balvanov, ktoré sú uložené priečne na koryto, vytvárajú vzdutie hladiny a iniciujú depozíciu relatívne jemnejších sedimentov nad nimi. Stupne a priehlbiny sa striedajú pozdĺž toku, a tak vďaka kontrastom zrnitostných frakcií vytvárajú periodickú, poschodovitú štruktúru pozdĺžneho profilu koryta (Chin a Wohl 2005). Podľa Zimmermanna a Churcha (2001) môže za sebou nasledovať séria stupňov bez priehlbín vytvárajúca systém stupeň/stupeň. Aj napriek nejednoznačnosti klasifikácií vyplývajúcich z kontrastných prostredí ich definície, jeden zhodný znak pozorovaný na korytách všetkých malých horských tokoch je evidentný – stupňovitá morfológia koryta v pozdĺžnom smere.

Mnoho autorov (napr. Whittaker 1987, Chin 1989 a 1999b, Wohl a Grodek 1994, Wohl et al. 1997 a Chartrand a Whiting 2000) testovalo variácie priemerných dĺžok priehlbín, výšok a vzdialeností stupňov s meniacim sa sklonom, veľkosťou dnového materiálu, veľkosťou príspevkovej plochy povo-

dia alebo šírkou koryta s cieľom determinovať korelácie a následne identifikovať príčinné faktory genézy stupňovitej morfológie. Určovaný bol aj vplyv morfológie na biotu v toku (Macura et al. 2012). Výsledky sú zatiaľ nekonzistentné, čo môže byť zapríčinené jednak rôznymi postupmi merania (Nickolotsky a Pavlowsky 2007) a metódami spracovávaní dát (Zimmermann et al. 2008), ale aj pestrosťou prírodných podmienok, v ktorých boli systémy stupeň/priehlbina skúmané. Z toho vyplýva potreba štandardizácie zberu a hodnotenia dát, no predovšetkým ďalších výsledkov z empirických štúdií v rôznych lokalitách sveta.

Hlavným cieľom príspevku je prezentovať charakteristické vlastnosti stupňovitej morfológie koryt, ďalej analyzovať a štatisticky vyhodnotiť morfometrické parametre koryta toku Tople v pramennej zóne a porovnať výsledky s priemernými hodnotami publikovanými v empiricky ladených prácach zaoberajúcich sa morfológiou systému stupeň/priehlbina a tiež načrtnúť problém vzťahu genézy stupňovitej morfológie koryta s extrémnymi hydrologickými udalosťami.

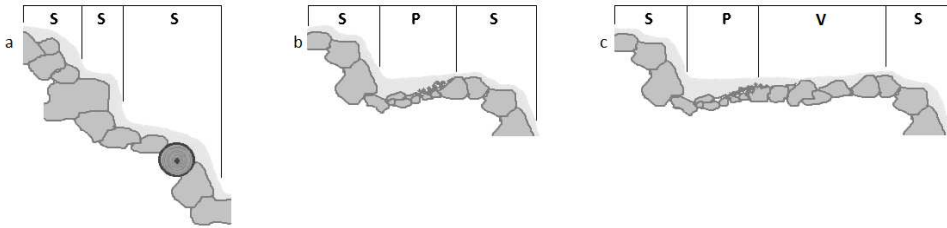
## CHARAKTERISTIKA STUPŇOVITEJ MORFOLÓGIE KORYTA

Morfológia tohto typu koryta je charakteristická stupňovitým pozdĺžnym profilom. Dochádza k striedaniu stupňov zložených z najhrubších sedimentov, v ktorých je prúdenie toku bystrinné ( $Fr > 1$ ), a oblastí s väčšími hĺbkami a s jemnejším dnovým substrátom (výmole). V týchto oblastiach je riečne prúdenie  $Fr < 1$ . Rozdielna transportná schopnosť koryta vedie k usporiadaniu morfológie jeho dnovej štruktúry do podoby systémov, akými sú stupeň/priehlbina, stupeň/stupeň alebo stupeň/priehlbina/prechodová časť (morfologická jednotka koryta medzi stupňom a priehlbínou, anglicky „run“ – obr. 1 a 2). V tomto kontexte je diskutabilná morfológia typu kaskád a jej asociácia so systémom stupeň/priehlbina. Grant et al. (1990) považujú kaskády za jednotku na vyššej úrovni, ktorá sa skladá zo sekvencií stupeň/priehlbina. No Montgomery a Buffington (1997) definujú kaskády jasnejšie. Ide o individuálny typ dna koryta s akumuláciami hrubozrnného materiálu (alebo jednotlivých kusov), ktoré nemajú rozsah cez celú šírku koryta a spôsobujú rozvetvenie prúdnic. Pri stupni dochádza k akumulácii hrubozrnného materiálu naprieč celým korytom a prúdnic je singulárna.

Vlastnosti podmienok, v ktorých sa vyskytujú stupňovité systémy, možno generálne zhrnúť do piatich bodov:

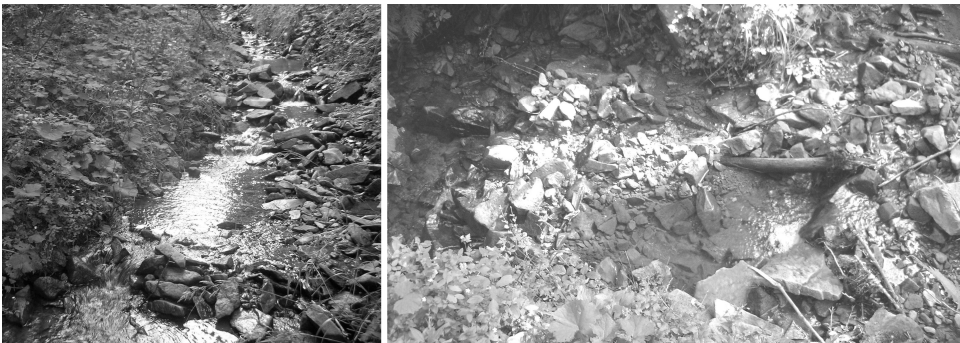
- 1) sklon koryta nad 3 % (Grant et al. 1990 a Montgomery a Buffington 1997),
- 2) heterogenita vo veľkosti dnového materiálu, pričom najväčšie častice sú imobilné, s výnimkou extrémnych podmienok (Grant a Mizuyama 1991),
- 3) výskyt málo frekventovaných a extrémnych povodňových udalostí s priemernou dobou opakovania od 20 do 50 rokov alebo vyššou (Whittaker a Jaeggi 1982, Grant a Mizuyama 1991 a Chin 1998),
- 4) bystrinné prúdenie ( $Fr \geq 1$ ), asociácia s formáciou antiduny (Grant a Mizuyama 1991),

5) nízka miera transportu sedimentov v prostredí s ich obmedzeným prísunom (Grant a Mizuyama 1991 a Grant et al. 1990).



Obr. 1. Príklad systémov dna koryta so stupňovitou morfológiou

a – systém stupeň/stupeň, b – systém stupeň/priehlbina, c – systém stupeň/priehlbina/prechodová časť „run“ (modifikované podľa práce Church a Zimmermann 2007)



Obr. 2. Príklady morfológie koryta typu stupeň/priehlbina v pramennej oblasti rieky Topľa

### Genéza stupňovitej morfológie

Centrálnou myšlienkou všetkých teórií genézy stupňov je tá, že imobilné klasty (väčšinou s veľkosťou zrna kameňov a balvanov) sformujú pevné body, na ktorých klasty s menšou veľkosťou zrna imbrikujú (ukladajú sa a orientujú v súlade so smerom prúdenia vody v koryte; rovina, ktorou prechádzajú osi splaveninovej častice a, b nie je rovnobežná s hladinou, ale je šikmá – častice sú šupinovito uložené) a tým formujú a stabilizujú stupeň.

Takto vzniká iniciálny stupeň (Church a Zimmermann 2007). V otázke genetických faktorov však autori nie sú až tak jednotní. V literatúre možno pozorovať dva smery: 1) starší, spadajúci do obdobia 80. a 90. rokov minulého storočia, podľa ktorého je genéza stupňov riadená hydraulicky, a to analogickým procesom, ktorý generuje formu antiduny v riekach s pieskovým dnom (Whittaker a Jaeggi 1982, Whittaker 1987 a Comiti et al. 2005); 2) mladší, sformovaný začiatkom tohto storočia, ktorý chápe formovanie stupňov ako náhodný jav podmienený aj hydraulicky, ale hlavne prítomnosťou kľúčových kameňov v koryte (Lee a Ferguson 2002, Zimmermann a Church 2001, Curran a Wilcock 2005 a Weichert et al. 2008); za kľúčové kamene sa pritom považujú

individuálne klasty transportované korytom za extrémnych vodných stavov, alebo prisunuté do koryta z brehov či svahov priľahlých ku korytu, ktorých veľkosť častíc odpovedá relatívnej drsnosti  $\Delta > h$  ( $h$  = hĺbka koryta).

Podľa Zimmermanna a Churcha (2001) vyplýva formovanie stupňovitej morfológie z rôznorodých a náhodných efektov, čo indikuje aj veľký rozptyl hodnôt morfometrických parametrov stupňov. Za dominantný efekt považujú náhodné rozmiestnenie takmer imobilných kľúčových kameňov/balvanov. Stupeň podmieňuje hydraulický skok a následný padajúci prúd vymeliť priehlbínu pod ním. Sedimenty sú transportované po prúde, pokiaľ nenarazia na ďalší kľúčový kameň alebo veľký kus zvyšku dreva, kde imbrikujú a vytvoria ďalší stupeň. Poloha stupňov teda závisí od polohy kľúčových kameňov a výška stupňov od ich veľkosti (Zimmermann a Church 2001). Často úlohu kľúčového kameňa nahrádza spriechený kus dreva (MacFarlane a Wohl 2003). V systémoch s nižším sklonom ako plytčina/priehlbina nemajú individuálne veľké klasty sedimentov taký morfogenetický význam ako vo vysokogradientových tokoch (Zimmermann a Church 2001). Nie vo všetkých prostrediach možno považovať najväčšie balvany za imobilné. Turowski et al. (2009) na základe monitoringu v Alpách dokumentovali pomerne častý výskyt fluviálneho transportu najväčších kusov sedimentov počas udalostí s extrémnym prietokom, ktoré sú v týchto podmienkach bežné. Extrémna povodeň značne ovplyvní štruktúru systému stupeň/priehlbina. Turowski et al. (2009) dokumentujú kompletnú prestavbu stupňovitej štruktúry počas takejto udalosti.

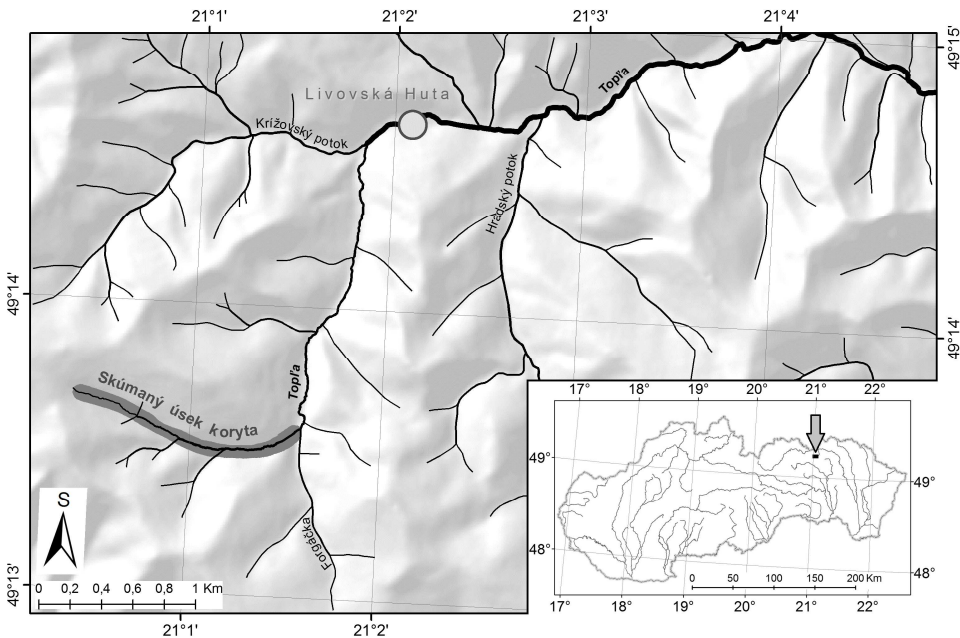
Pôvod materiálu v koryte systému stupeň/priehlbina je prevažne deluviálny (Benda et al. 2005) a väčšina častíc po dosiahnutí dna koryta je pre bežné prietoky v malých tokoch imobilná. Extrémne udalosti sú však schopné dať tento materiál do pohybu. Pri následnom ústupe povodňovej vlny, alebo pri ďalších udalostiach s menšou magnitúdou, dochádza k selektívnej erózii, ktorej selektívnosť sa zintenzívni disproporciou sily prúdu. Na iniciálnych stupňoch sa vyvinie padajúce bystrinné prúdenie ( $Fr > 1$ ) vymieľajúce menej hrubý materiál pod ním, čím sa jednak vyvinie priehlbina, jednak zvýši výška stupňa. K vymieľaniu dochádza buď po dosiahnutí maximálneho rozptylu energie vodného prúdu, keď je priehlbina dostatočne hlboká, alebo pri odkrytí väčších, už imobilných častíc či skalného dna. Vymletý materiál sa spravidla usádza hneď za priehlbínou, resp. na nasledujúcom stupni, kde je prúdenie riečne ( $Fr < 1$ ). Po vyvinutí stupňovitej štruktúry k ďalšiemu významnému transportu hrubozrných sedimentov nedochádza (Abrahams et al. 1995).

Church a Zimmermann (2007) najnovšie vysvetlili spôsob genézy stupňov tzv. hypotézou upchatia: dno koryta sa dokáže vyvinúť do formy antiduny len za podmienok, keď sú všetky sedimenty v koryte schopné pohybu. Je pravdepodobné, že väčšie kamene môžu zastať pod antidunou a potom pri poklese hladiny zachytiť ďalšie sedimenty, čím sa sformuje stupeň. Výsledky laboratórnych experimentov Weicherta et al. (2008) naznačujú, že geometria dna koryta sa vyvinie do takej formy, keď je jej drsnosť dostatočná na zaistenie maximálnej stability dna pre danú veľkosť sedimentov. Stupňovité štruktúry, ktoré boli pozorované pri týchto experimentoch, sa však morfogeneticky nevyvinuli do formy podobnej antidune.

## SKÚMANÝ KORYTOVÝ ÚSEK

Analýzovaný korytový úsek sa nachádza v geomorfologickom celku Čergov, v pramennej zóne rieky Topľa v celkovej dĺžke 1 667,9 m od jej prameňa až po prítok Forgáčka (obr. 3). Rozpätie nadmorských výšok úseku je 1 021-782 m, pričom vážený priemerný sklon koryta je 14 ‰ (8°).

Pohorie Čergov je budované prevažne pieskovecami tektonickej jednotky magurského flyšu (Nemčok 1990), čo sa prejavuje v zníženej sféricite sedimentov podmienenej lavicovitou štruktúrou pieskovecov a následnou nižšou transportabilitou sedimentov, ako aj ich náchylnosťou k imbrikácii. Priemerný ročný úhrn zrážok v najbližšej stanici (Livovská Huta) je 830 mm. Povodie skúmaného úseku je prevažne lesnaté, no značne ovplyvnené ťažbou, čo sa prejavuje zvýšeným prísunom drevnej hmoty do koryta. Okrem tohto nepriameho antropogénneho vplyvu na morfológiu koryta sa v skúmanom úseku vyskytujú aj priame vplyvy, ktoré významne pozmenili pozdĺžny profil. Ide o tri lesné cesty križujúce koryto, príslušné dva priepusty a jeden brod. Prvý priepust sa nachádza vo vzdialenosti 766 m od prameňa a má dĺžku 12,5 m, druhé križovanie je v podobe bagrovaného brodu a tretie je zastúpené priepustom s dĺžkou 10 m vo vzdialenosti 44 m od konca skúmaného úseku.

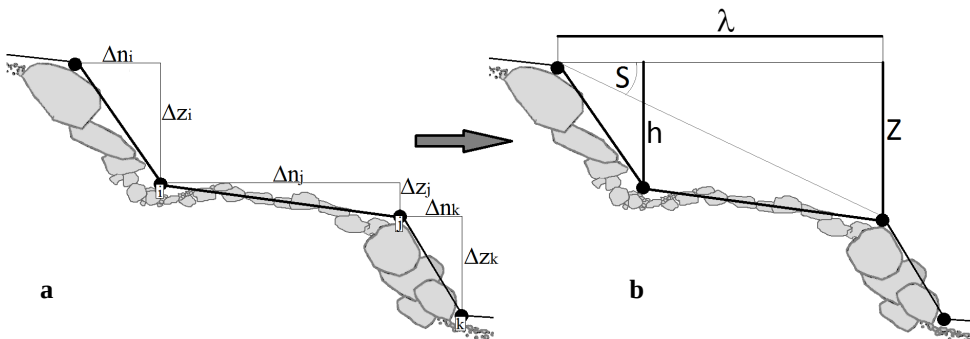


Obr. 3. Poloha skúmaného úseku v pramennej oblasti rieky Topľa

## TERÉNNY ZBER ÚDAJOV

Zimmermann et al. (2008) po zhodnotení rôznych metód získavania dát pre morfometrickú analýzu systému stupeň/priehlbina navrhuje terénne meranie jedného pozdĺžneho profilu, ktorý bude pozostávať z manuálne vybraných re-

prezentatívnych bodov hrán terénu. Na základe tohto odporúčania bola zvolená stratégia výberu bodov na pozdĺžnom profile tak, že vždy bol kladený bod, ktorým prúdica pretínala vrchol a pätu stupňa, a dopĺňajúce body na iných hranách meniacich trend gradientu. Tri najdôležitejšie a najviac študované morfometrické parametre systému stupeň/priehlbina sú výška stupňa –  $h$ , vzdialenosť medzi stupňami –  $\lambda$  a sklon hladiny toku (v hydraulike ako sklon čiary energie koryta) –  $i$  (S v anglicky písanej literatúre). Postup pri zbere údajov a študované morfometrické parametre znázorňuje obr. 4 (Chin 1999b, Chartrand a Whiting 2000 a Zimmermann a Church 2001). Na získanie hodnôt týchto parametrov je potrebný pozdĺžny profil koryta zameraný s relatívne vysokou presnosťou. Chyba merania v ťažko priechodnom teréne predstavovala meraním hadicovou vodováhou maximálne  $\pm 10$  cm. Pre každý bod boli zmerané dve vzdialenosti od predchádzajúceho bodu; horizontálna (pozdĺžna) –  $\Delta n$  a vertikálna –  $\Delta z$  (obr. 4). Pričná variabilita koryta nebola sledovaná, keďže na identifikáciu morfometrických parametrov systému stupeň/priehlbina nie je potrebná. Celkovo bolo takto zameraných v smere po prúde 452 bodov, na základe ktorých bolo identifikovaných 179 stupňov. Nie všetky sekvencie morfologicky podobné stupňom boli aj skutočnými stupňami. Často predstavovali prechod medzi stupňom a strmou plytčinou, čo komplikuje odlíšenie stupňa ako geometrickej formy. Preto Milzow et al. (2006) navrhli na identifikáciu stupňa použiť hraničný sklon 15 %. Použitím tohto filtra bol konečný počet stupňov 142.



Obr. 4. Postup pri zbere údajov v teréne

a – meranie relatívnej pozdĺžnej ( $\Delta n$ ) a vertikálnej ( $\Delta z$ ) vzdialenosti bodov (i, j, k); b – odvodenie parametrov výšky stupňa ( $h$ ), vzdialenosti stupňov ( $\lambda$ ), celkové prevýšenie systému stupeň/priehlbina ( $Z$ ) a sklon systému stupeň/priehlbina ( $i$ )

## ANALÝZA MORFOMETRICKÝCH PARAMETROV STUPŇOV

### Výška stupňa – $h$

Prepadová výška stupňa znižuje veľkosť potenciálnej energie, iniciuje prechod bystrinného prúdenia na riečne konvertujúcu pozdĺžny komponent kinetickej energie spôsobujúci eróziu a transport sedimentov (Ashida et al. 1976). Podiel sumy výšok stupňov k celkovému prevýšeniu (Chin 2003) na skúmanom úseku Tople predstavuje 29 % teoretického rozptylu potenciálnej energie.

Výška stupňa sa väčšinou pohybuje v intervale 0,4 až 0,6 m (obr. 5, časť a), koeficient variácie má hodnotu 45 %.

Chin (1999b) vo svojich dátach vykázala priamu úmeru výšky stupňov s celkovým sklonom koryta. Wohl a Grodek (1994) a Nickolotsky a Pavlowsky (2007) tiež vykázali túto koreláciu, no dáta v prácach Whittaker (1987), Grant et al. (1990) a Wohl et al. (1997) nepreukázali jednoznačné trendy. Podobne aj v dátach z Tople (obr. 6, časť a) nemožno hodnotu  $R^2 = 0,22$  považovať za významnú, no náznak závislosti výšky stupňa od sklonu je identifikovateľný. V malých korytách majú individuálne častice sedimentov oveľa väčší vplyv na morfológiu koryta ako vo väčších tokoch, a to najmä vďaka vysokej hodnote ich relatívnej veľkosti. Prítomnosť veľkých kusov sedimentov je pre sformovanie stupňa kľúčová (Church a Zimmermann 2007). Podľa výsledkov Chin (1999b) závisí výška stupňa na 73 % od veľkosti najväčšej častice, ktorú zahrnuje.

#### *Vzdialenosť stupňov – $\lambda$*

Priemerná vzdialenosť medzi stupňami je 6,5 m, najčastejšie sú však vstupne vzdialené 4,5 m (obr. 5, časť b) s koeficientom variácie 66 %. Vysokú variabilitu vzdialeností stupňov dokumentujú aj Zimmermann a Church (2001).

Vzdialenosť a výška stupňov vykazujú v niektorých prácach vzájomnú koreláciu (napr. Chartrand a Whiting 2000), no niekde nie (Wooldridge a Hickin 2002, Gomi et al. 2003). Podobne aj v dátach z Tople táto závislosť neexistuje (obr. 6, časť b).

Od počiatku výskumu stupňov a priehlbín bola identifikovaná a mnohokrát preverená inverzná exponenciálna závislosť medzi vzdialenosťami stupňov a sklonom (Whittaker 1987, Chin 1989, Grant et al. 1990 a Chartrand a Whiting 2000), no parametre popisujúcej funkcie sú medzi prácami výrazne rozdielne. V dátach z Tople je táto závislosť potvrdená na 28 % (obr. 6, časť c). Zaujímavá na tomto grafe je hodnota sklonu 0,18, nad ktorou sa vzdialenosti stupňov väčšie ako 7 m nevyskytujú.

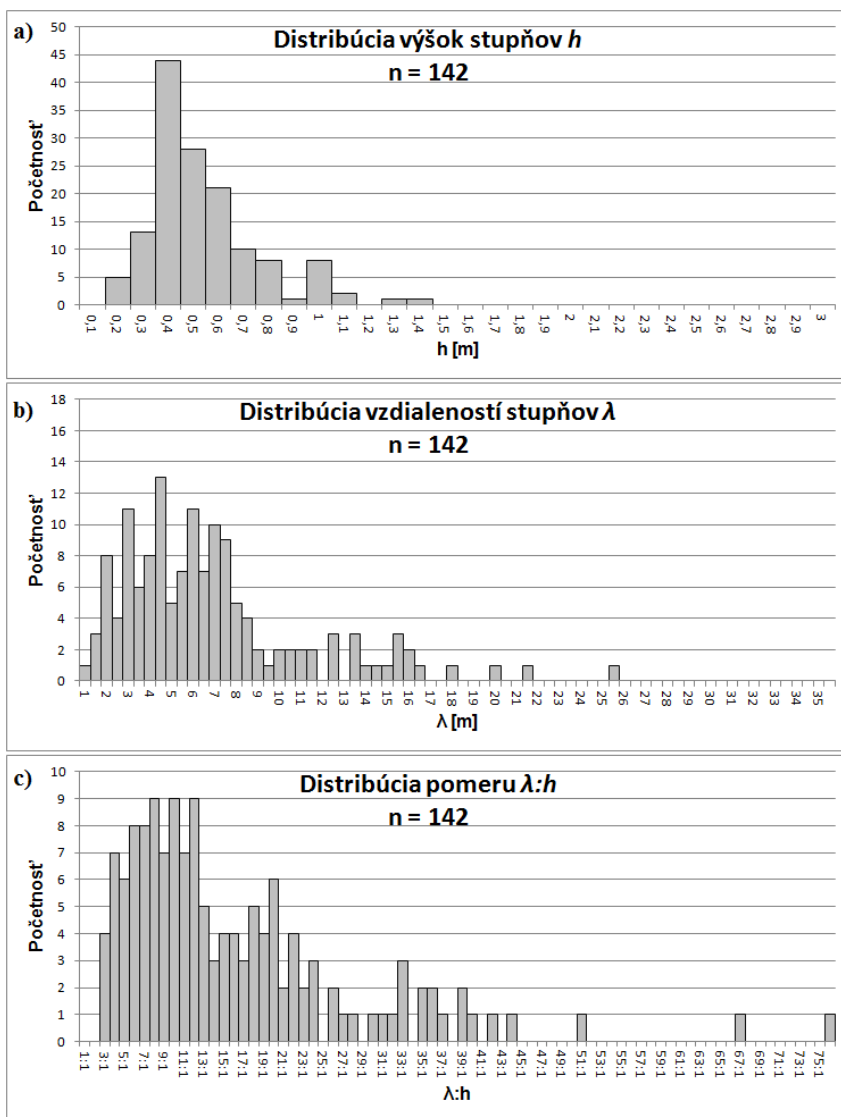
Vzdialenosť stupňov sa v literatúre často vyjadruje v relatívnom pomere k iným parametrami koryta, najčastejšie so šírkou plného koryta a s výškou stupňa. Keďže údaje boli merané len v pozdĺžnom smere, vzdialenosť stupňov bude ďalej analyzovaná v pomere s výškou stupňov.

Chin (1999b) analyzovala pomer vzdialenosti a výšky stupňov v Santa Monica Mts. Jeho priemerná hodnota bola približne 10:1, v horných úsekoch bol pomer 7:1 a v dolných častiach tokov až 17:1. V skúmanom úseku rieky Topľa je priemerný pomer 15:1 a kolíše v intervale 3:1 až 25:1, no najpočetnejší výskyt je v okolí hodnoty pomeru 10:1 (obr. 5, časť c).

#### *Sklon – $i$*

Chartrand a Whiting (2000) uvádzajú, že stupňovité prirodzené korytá boli identifikované pri sklonoch s rozpätím 1,5 až 13,4 %, pričom medián predstavoval 4,4 %. V porovnaní s týmito údajmi je hodnota sklonu v prípade Tople výrazne posunutá na rozpätie 4-40 % a najčastejší sklon je až 14 %.



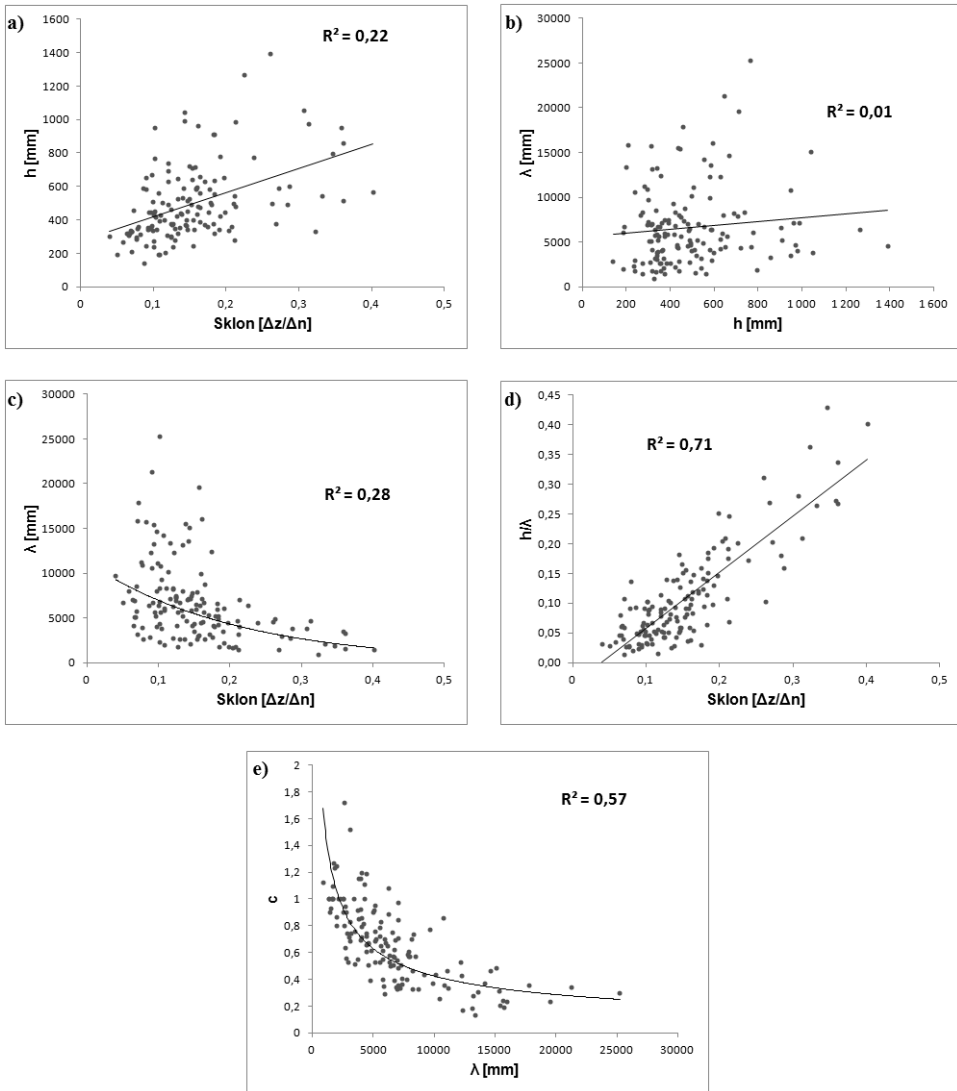


Obr. 5. Histogramy distribúcie: a) výšok stupňov, b) vzdialeností stupňov, c) pomeru vzdialeností ku výške stupňov

### *Relatívna strmlosť – c*

Významným progresom vo výskume stupňovitej morfológie korýt bolo zavedenie bezrozmerného prístupu definovaním strmosti  $h/\lambda$  a jej normalizáciou priemerným sklonom úseku  $i$ , čím vznikol parameter  $(h/\lambda)/i$  (Abrahams et al. 1995). Autori nazvali tento parameter relatívna strmlosť  $c$  (obr. 4).

Nickolotsky a Pavlowsky (2007) vo svojich dátach z rôznych tokov vykázali 95-99 % koreláciu strmosti  $h/\lambda$  a sklonu  $i$ . Na iných skúmaných tokoch nie je závislosť strmosti od sklonu až taká vysoká, Chartrand a Whiting (2000) uvádzajú závislosť len 13 %, Chin (1999b) 53 % a Zimmermann a Church (2001) už 76 %. V prípade Tople je veľkosť tejto závislosti 71 % (obr. 6, časť d).



Obr. 6. Závislosti morfometrických parametrov

a – výšky stupňov so sklonom, b – vzdialenosti s výškami stupňa, c – vzdialenosti stupňov so sklonom, d – pomeru vzdialenosti ku výškam stupňov so sklonom, e – relatívnych strmostí stupňov so vzdialenosťami stupňov

Relatívnu strmosť je možné vyjadriť vzťahom  $c = (h/\lambda)/i = (h/\lambda)/(Z/\lambda) = h/Z$  (obr. 4). Z uvedeného vzťahu vyplýva, že ak  $h < Z$ , čiže  $c < 1$ , reziduálna hĺbka priehlbiny na päte stupňa je príliš malá a/alebo za priehlbinou nasleduje dlhší priamy úsek, ktorý končí vrcholom nasledujúceho stupňa a jeho nadmorská výška je nižšia ako najhlbší bod predchádzajúcej priehlbiny. Spomínaný priamy úsek identifikovali Church a Zimmermann (2007) a nazvali ho „tread“, čo je ekvivalent prechodovej časti medzi stupňom a priehlbinou a dnovou morfológickou jednotkou („run“). Naopak ak  $h > Z$ , a následne  $c > 1$ , päta stupňa je nižšie položená ako vrchol nasledujúceho stupňa. Relatívna strmosť má v skúmanom úseku Tople priemernú hodnotu 0,67 a kolíše od 0,13 do 1,7. Je to podmienené malými reziduálnymi hĺbkami priehlbín, ale najmä výskytom spomínaných výbehov, čo je potvrdené aj vysokým priemerným pomerom vzdialeností a výšok stupňov 15:1. Parameter  $c$  značne reaguje na relatívne veľké vzdialenosti stupňov v prípade Tople (obr. 6, časť e).

#### *Index vertikálnej sínusoidy – VSI*

Stupňovitú morfológiu koryta možno považovať aj za istý typ vlnenia podobného meandrovaniu, no s odlišnými dimenziami a stupňom kľukatosti (Chin 1999b), vyjadriteľný indexom vertikálnej sínusoidy. Hodnota VSI predstavuje podiel sumy dĺžok spojnic medzi všetkými meranými bodmi na pozdĺžnom profile ku sume dĺžok spojnic vrcholov stupňov. Kým Chin a Phillips (2007) udávajú pre vyvinutý systém stupňov/priehlbina VSI až 1,14, v skúmanom úseku Tople má veľmi nízku hodnotu, len 1,02.

## DISKUSIA

### Vzťah s hydraulikou

Zákonitosti vzťahu geometrických vlastností koryta s hydraulikou a transportom sedimentov sú menej poznané v pramenných častiach v porovnaní s väčšími nížinnými aluviálnymi časťami fluvialneho systému (Whiting et al. 1999). Jednou z hlavných príčin je vysoká priestorová variabilita geometrických vlastností koryta, a preto pri výpočte prietoku pomocou známych rovníc (*Chézyho*, *Manningova*) je výsledná hodnota platná len pre daný profil (Radecki-Pawlik 2002).

Úseky so stupňovitou morfológiou koryta kladú prúdeniu toku značný odpor. Výsledkom je, že množstvo energie, ktorá by inak bola dostupná pre eróziu a transport sedimentov, sa vytratí (Abrahams et al. 1995). Odolnosť voči prúdeniu v systémoch so stupňovitou morfológiou je zabezpečená najmä cez turbulentný rozptyl, analogický s hydraulickým skokom. Drsnosť dna nemá na energetickej strate až taký vysoký podiel (Comiti et al. 2005). S nárastom sklonu rastie aj výhradný vplyv stupňovitých štruktúr na rozptyl energie toku. Na základe laboratórnych aj terénnych experimentov demonštrovali Abrahams et al. (1995), že maximálny odpor stupňov voči prúdeniu je vtedy, ak sú stupne vzdialené rovnomerne a zároveň strmosť stupňa  $h/\lambda$  je mierne väčšia ako sklon koryta  $i$ ;  $1 < (h/\lambda)/i < 2$ , čiže  $c$  je priemerne 1,5. Priemerná hodnota parametra  $c$  v prípade Tople je len 0,67. Len 1/6 z celkového počtu stupňov spĺňa podmienku  $c \geq 1$ , dokonca len dva stupne spomedzi všetkých 142 spĺňajú podmien-

ku  $c \geq 1,5$ . Túto situáciu vysvetľuje prítomnosť prechodných foriem (výbehov) medzi priehlbínami a stupňami. Aby bol parameter  $c > 1$ , musí byť nadmorská výška päty stupňa nižšia ako nadmorská výška vrcholu nasledujúceho stupňa. Príčinou môžu byť geologické podmienky – korytové sedimenty sú prevažne lavicové pieskovce s nízkou sfériticou. Ak ide o veľké (kamene a balvany) a zároveň ploché klasty v polohe priehlbín, tak je degradačný proces priehlbín výrazne obmedzený, čo zabraňuje ďalšiemu vývoju systému stupeň/priehlbina. Inou príčinou nízkych hodnôt parametra  $c$  môže byť výrazný sklon koryta v najvyšších polohách skúmaného úseku, kde sa podmienky pre formovanie stupňov vytrácajú. Málo frekventované udalosti, ktoré sú schopné formovať stupne (Whittaker a Jaeggi 1982, Grant a Mizuyama 1991 a Chin 1998), majú pri vysokých sklonoch skôr deštruktívny efekt. Na rieke Topľa sa v posledných rokoch vyskytli extrémne povodňové udalosti a tie môžu byť taktiež príčinou nízkej hodnoty parametra  $c$ . Je pravdepodobné, že každý z uvedených faktorov má svoj podiel na nízkom štádiu vývoja systémov stupeň/priehlbina v skúmanom území. K stanoveniu váhy jednotlivých faktorov možno dospieť prostredníctvom ďalšieho výskumu a monitoringu.

Lenzi (2001) dokumentoval na toku Rio Cordon v Taliansku časové zmeny v  $c$ , od 1,30 pred extrémnou povodňou v roku 1994 do 0,79 hneď po udalosti, s neskorším nárastom späť na 1,33 po bežných povodniach v roku 1998. Málo frekventované udalosti s vysokou intenzitou sú schopné kompletne premodelovať štruktúru systému stupeň/priehlbina. Menej extrémne a bežnejšie udalosti asociované so stavom plného koryta tento proces dokončia, až kým nie je stabilita koryta maximálna (Chin a Phillips 2007), prípadne kým sa nevyskytne ďalšia extrémna povodeň, ktorá systém naruší.

Zber dát na Topli sa uskutočnil v máji 2011, pričom dve extrémne povodne zasiahli jej pramennú zónu v júli 2008 a júni 2010. Možno predpokladať, že podobne ako na Rio Cordon (Lenzi 2001), hodnota parametra  $c$  vzrastie aj na Topli po výskyte menej intenzívnych udalostí schopných modifikovať koryto.

Za korytotvorný prietok je považovaný prietok počas stavu plného koryta, ktorý nie je v horských tokoch taký častý a pravidelný ako v nížinných tokoch (Adams a Spotila 2005). Veľkostne nehomogénny dnový materiál systému stupeň/priehlbina podmieňuje rozdielnú odozvu morfológie koryta v priestore na ten istý prietok. Podobne, efektivita rozptylu energie prostredníctvom pádu vody zo stupňov sa mení v čase vzhľadom na vodný stav (Chin 2003). Modely popisujúce vývoj systému stupeň/priehlbina indikujú, že stupne sú deformované pri prietokoch, keď sa dá do pohybu aj najväčšia častica (Chin 1999b a Weichert et al. 2008). Ak sú stupne v pokoji, vtedy sú nezávislými premennými schopnými regulovať okolitý prúd vody, hydrauliku v koryte a sú rozptyľovačmi energie. No hneď, ako sú uvedené do pohybu, stávajú sa závislými premennými, prispôsobia sa prúdeniu a daným energetickým podmienkam. K tomu dochádza pri stave ponorenia stupňov (Chin 2003). Moment ponorenia nastáva vtedy, keď stupne stratia funkciu rozptyľovačov energie a začnú fungovať jednoducho ako iné elementy zvyšujúce drsnosť dna koryta (Zimmermann a Church 2001). Logicky k tomuto dochádza pri menších, nevyvinutých stupňoch, s nízkou hodnotou parametra relatívnej strmosti  $c$ .

## Správanie

Výsledky Chin (2002) indikujú značnú pravidelnosť v usporiadaní stupňov. Rytmický pozdĺžny profil koryta v systémoch stupeň/priehlbina je analogický s meandrovaním vo vertikálnej dimenzii. Keďže horské toky sú obmedzené svahmi a nemôžu meandrovať, kompenzujú potrebu regulácie energie toku zväčšovaním drsnosti vo vertikálnej dimenzii. Vývoj stupňovitej morfológie horského toku by mal smerovať k zvýšenej odolnosti voči prúdeniu, a teda zvýšenej stabilite dna koryta. Podobne ako pri parametri  $c$ , aj index vertikálnej sínusoidy  $VSI$  má tendenciu klesnúť po extrémnej povodni na minimálne hodnoty a neskôr pri stabilizácii jeho hodnota stúpne. Chin a Phillips (2007) dokumentujú nárast  $VSI$  z 1,00 v roku 1965 (ploché dno) na 1,05 v roku 2003 po vyvinutí systému stupeň/priehlbina až na 1,14.

Podľa Chin (2003) je systém stupeň/priehlbina prispôsobiteľný a schopný reštrukturalizácie. Väčšina stupňov v území, ktoré skúmala, sa takto premodeluje priemerne každých 15 až 50 rokov, iba najväčšie stupne založené na veľkých balvanoch nad 1 m ostávajú stabilné 100 až 200 rokov. Systém stupeň/priehlbina udržiava koryto v stabilite aj pri vysokých sklonoch, kde by inak prebiehala nadmerná erózia a degradácia koryta (Chin a Phillips 2007). Systém stupeň/priehlbina je fluviálne organizovaná morfológia aluviálneho koryta, ktorej stabilita a pravidelnosť vyplýva zo stupňa kladenia maximálneho odporu voči prúdeniu vo vysokogradientových podmienkach (Chin 2002, Chin a Wohl 2005).

Podľa Zimmermanna a Churcha (2001) je usporiadanie a organizovanosť stupňov len chybná interpretácia vizuálneho vnemu niektorých autorov. Títo buď podporujú usporiadanosť teóriou vzniku stupňov ako antidyne (Whittaker a Jaeggi 1982, Grant a Mizuyama 1991, Grant 1997 a Chartrand a Whiting 2000), alebo hypotézou maximálnej odolnosti stupňov voči prúdeniu (Abrahams et al. 1995). Dokumentujú to príkladmi z tokov v oblastiach, kde stupne vykazujú nižšiu organizovanosť a napriek tomu sú stabilné, keďže sú reliktnými minulých glaciálnych procesov alebo procesov zvetrávania a gravitačných porúch. Naopak Chin (2002) považuje prípady reliktov minulých glaciálnych procesov za nefluviálne systémy, no systémy stupňov a priehlbín vyvinuté za súčasného hydrologického režimu sú prispôsobiteľné korytové formy schopné hydraulického organizácie.

Usporiadanosť foriem dna koryta naznačuje existenciu silného interného mechanizmu (Chin a Phillips 2007), ktorý môže byť maskovaný externými vplyvmi a pravidelnosť odráža priestorovú organizáciu v hrubozrnných aluviálnych korytách. Rytmické formy ako stupeň/priehlbina, stupeň/stupeň, plytčina/priehlbina a pod. môžu predstavovať rozmanité prejavy toho istého fenoménu a pri ich genéze platia tie isté princípy spotreby energie toku. Externé faktory, ako vegetácia, prítomnosť skalného dna či oblúky koryta, obmedzujú vývin systému stupeň/priehlbina. Mnohé pravidelné vzory pozorované v tvaroch reliéfu zrejme vznikli nezávisle od externých faktorov ako výsledok procesu samoorganizácie geomorfologických systémov (Chin a Phillips 2007). Podľa Madeja (2001) a Chin a Phillipsa (2007) sú stupne a priehlbiny rytmičné formy, ktoré reflektujú tento generálny fenomén samoorganizácie operujúci na zemskom povrchu. Proces samoorganizácie stupňov je sprevádzaný nárastom odolnosti voči

prúdeniu a znižovaním spádu (zvyšovaním vertikálnej sínusoidy a vytváraním priehlbín s nízkym alebo negatívnym gradientom).

Prečo jedni vidia v systéme stupeň/priehlbina neporiadok a iní poriadok? Chin a Phillips (2007) to vysvetľujú tým, že stabilné/nechaotické/rovnovážne a nestabilné/chaotické/nerovnovážne správanie sú jeho emergentné vlastnosti, ktoré vznikajú a zanikajú pri zmene v priestore, čase a mierke. Vytvorenie sekvencií systému stupeň/priehlbina si vyžaduje iniciálne divergentné, nestabilné správanie (napr. bezprostredne po povodni), ktorého morfológický prejav je nerovnovážny. Podobne, ako pri vzoroch meandrujúcich koryt alebo systémov plytčina/priehlbina, aj malé nepredvídateľné iniciálne externé vplyvy či rušenia môžu zvyšovať nestabilitu, ktorej výsledkom je nová stabilná štruktúra. Systém môže byť počas svojej evolúcie nejaký čas divergentný, chaotický a nestabilný, inokedy zasa konvergentný, stabilný a usporiadaný.

Po extrémnych udalostiach v rokoch 1995 a 2007 značne stúpla miera erózie v celom povodí toku Erlenbach vo švajčiarskych Alpách v dôsledku deštrukcie a nízkej vyvinutosti stupňovitej morfológie (Turowski et al. 2009). Po čase, keď sa stupňovitá morfológia vyvinula, došlo k postupnej stabilizácii koryta a zníženiu miery transportu. Rovnako ako na toku Erlenbach (Turowski et al. 2009), aj v prípade Rio Cordon (Lenzi 2001) či na tokoch v Santa Monica Mts., (Chin a Phillips 2007) bola po extrémnej povodni znížená stabilita koryta, po ktorej nastala postupná stabilizácia. Perióda nestability po výnimočnej udalosti závisí od jej veľkosti a rozsahu. Pramenná časť koryta rieky Topľa má podľa hodnôt parametrov  $c$  a  $VSI$  slabo vyvinutú stupňovitú morfológiu, ktorá bola zrejme deštruovaná nedávnymi extrémnymi udalosťami. Opätovné premeranie morfometrických parametrov jej pozdĺžneho profilu môže vyvrátiť alebo potvrdiť trend stabilizácie dokumentovaný na iných lokalitách a objasniť príčiny nízkeho štádia vývoja systému stupeň/priehlbina v skúmanom území.

## ZÁVER

Stupňovitá morfológia koryt horských tokov je najčastejšie reprezentovaná systémom stupeň/priehlbina. Jej významnou vlastnosťou je schopnosť retencie sedimentov a vody, prostredníctvom znižovania prietoku rozptýlením kinetickej energie na stupňoch. Morfológia stupňovitého koryta bola vyhodnotená na príklade rieky Topľa v jej pramennej časti. Na základe detailných meraní boli štatisticky vyhodnotené základné morfometrické parametre stupňovitej morfológie koryta na vzorke 142 stupňov. Na úseku koryta dlhom 1 668 m s priemerným sklonom 14 % je najčastejšia výška stupňa 0,4 m a vzdialenosť medzi stupňami obvykle kolíše od 2 do 7,5 m. Medián pomeru vzdialenosti a výšky stupňov je 10:1, čo je hodnota sledovaná aj v iných prípadových štúdiách. Výrazne nízke hodnoty odvodených parametrov, konkrétne relatívnej strmosti  $c = 0,67$  a indexu vertikálnej sínusoidy  $VSI = 1,02$ , ako aj vysoká variabilita výšok a vzdialeností stupňov naznačujú nevyvinutosť systému stupeň/priehlbina. Príčinou zníženia stability koryta v skúmanom území sú zrejme nedávne extrémne povodňové udalosti, čo dokumentujú aj empirické štúdie z iných lokalít sveta, ale aj špecifické sedimentologické a morfometrické podmienky.

Sídla na území Slovenska sú často lokalizované buď na nivách vnútrohorských dolín, alebo na vejároch v úpätných polohách. Obe formy sú vytvo-

rené horskými tokmi počas povodňových udalostí, ktoré sú jedným z hlavných prírodných hrozieb v našich šírkach (Frandofer a Lehotský 2011). Porozumieť správaniu sa horských tokov je dôležité nielen pre pochopenie fluviálneho systému ako celku (Chin 2003), ale aj pre manažment opatrení voči prírodným hrozbám.

V horských tokoch je často prevaha stupňovitej morfológie korýt v pozdĺžnom smere, preto je žiaduca aplikácia poznatkov o stupňovitej morfológii korýt z hľadiska ich manažmentu, najmä pokiaľ ide o potrebu regulácie transportu sedimentov, zabezpečenia vody pre spoločnosť a aj ochrany podmienok pre vodné habitaty.

*Príspevok bol vypracovaný v rámci vedeckého projektu č. 2/0106/12 financovaného vedeckou grantovou agentúrou VEGA.*

## LITERATÚRA

- ABRAHAM, A. D., LI, G., ATKINSON, J. F. (1995). Step-pool streams: adjustment to maximum flow resistance. *Water Resources Research*, 31, 2593-2602.
- ADAMS, R. K., SPOTILA, J. A. (2005). The form and function of headwater streams based on field and modeling investigations in the Southern Appalachian Mountains. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 1521-1546.
- ASHIDA, K., TAKAHASHI, T., SAWADA, T. (1976). Sediment yield and transport on a mountainous small watershed. *Disaster Prevention Research Institute Bulletin*, 26 (240), 119-144.
- BENDA, L., HASSAN, M. A., CHURCH, M., MAY, CH. L. (2005). Geomorphology of steep-land headwaters: the transition from hillslopes to channels. *Journal of the American Water Resources Association*, 41, 835-851.
- COMITI, F., ANDREOLI, A., LENZI, M. A. (2005). Morphological effects of local scouring in step-pool streams. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 1567-1581.
- CURRAN, J. C., WILCOCK, P. R. (2005). Characteristic dimensions of the step-pool bed configuration: an experimental study. *Water Resources Research*, 41.
- FRANDOFE, M., LEHOTSKÝ, M. (2011). Channel adjustment of a mixed bedrock-alluvial river in response to recent extreme flood events (the upper Topľa River). *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 11, 2, 59-71.
- GOLDEN, L. A., SPRINGER, G. S. (2006). Channel geometry, median grain size, and stream power in small mountain streams. *Geomorphology*, 78, 64-76.
- GOMI, T., SIDLE, R. C., WOODSMITH, R. D., BRYANT, M. D. (2003). Characteristics of channel steps and reach morphology in headwater streams, southeast Alaska. *Geomorphology*, 51, 225-242.
- GALIA, T., HRADECKÝ, J. (2011). Bedload transport and morphological effects of high-magnitude floods in small headwater streams – Moravskoslezské Beskydy Mts. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 59, 238-250.
- GRANT, G. E. (1997). Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams: a new hypothesis. *Water Resources Research*, 33, 349-358.
- GRANT, G. E., SWANSON, F. J., WOLMAN, M. G. (1990). Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, western Cascades, Oregon. *Geological Society of America Bulletin*, 102, 340-352.
- GRANT, G. E., MIZUYAMA, T. (1991). *Origin of step-pool sequences in high gradient streams: a flume experiment. Proceedings of the Japan-US Workshop on Snow Avalanche, Landslide, Debris Flow Prediction and Control, Tsukuba Sept. 30 – Oct. 2. 1991.* Tsukuba (Science and Technology Agency of Japanese Government), pp. 523-532.

- HALWAS, K. L., CHURCH, M. (2002). Channel units in small, high gradient streams on Vancouver Island, British Columbia. *Geomorphology*, 43, 243-256.
- HASSAN, M. A., CHURCH, M., LISLE, T. E., BRARDINONI, F., BENDA, L., GRANT, G. E. (2005). Sediment transport and channel morphology of small, forested streams. *Journal of the American Water Resources Association*, 41, 853-876.
- CHARTRAND, S. M., WHITING, P. J. (2000). Alluvial architecture in headwater streams with special emphasis on step-pool topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 583-600.
- CHIN, A. (1989). Step-pools in stream channels. *Progress in Physical Geography*, 13, 391-408.
- CHIN, A. (1998). On the stability of step-pool mountain streams. *The Journal of Geology*, 106, 59-69.
- CHIN, A. (1999a). On the origin of step-pool sequences in mountain stream. *Geophysical Research Letters*, 26, 231-234.
- CHIN, A. (1999b). The morphologic structure of step-pools in mountain streams. *Geomorphology*, 27, 191-204.
- CHIN, A. (2002). The periodic nature of step-pool mountain streams. *American Journal of Science*, 302, 144-167.
- CHIN, A. (2003). The geomorphic significance of step-pools in mountain streams. *Geomorphology*, 55, 125-137.
- CHIN, A., PHILLIPS, J. D. (2007). The self-organization of step-pools in mountain streams. *Geomorphology*, 83, 346-358.
- CHIN, A., WOHL, E. E. (2005). Toward a theory for step pools in stream channels. *Progress in Physical Geography*, 29, 275-296.
- CHURCH, M., ZIMMERMANN, A. E. (2007). Form and stability of step-pool channels: Research progress. *Water Resources Research*, 43, 1-21.
- JAKUBIS, M. (2008). Vplyv základných hydrologických charakteristík malých povodí na proces morfogénézy koryt vodných tokov. In Rožnovský, J., Litschmann, T., eds. *Bioklimatologické aspekty hodnotení procesů v krajině, Mikulov 9. – 11.9. 2008*. Praha (Česká bioklimatologická společnost). CD-ROM.
- JAKUBIS, M. (2009). Vplyv vybraných prietokov na geometrické charakteristiky prirodzených prietokových profilov. *Acta Facultatis Forestalis*, 51, 53-64.
- LEE, A. J., FERGUSON, R. I. (2002). Velocity and flow resistance in step-pool streams. *Geomorphology*, 46, 59-71.
- LEHOTSKÝ, M., NOVOTNÝ, J. (2004). Morfológické zóny vodných tokov Slovenska. *Geomorphologia Slovaca*, 4(2), 48-53.
- LENZI, M. A. (2001). Step-pool evolution in the Rio Cordon, northeastern Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 991-1008.
- MacFARLANE, W. A., WOHL, E. E. (2003). Influence of step composition on step geometry and flow resistance in step-pool streams of the Washington Cascades. *Water Resources Research*, 39(2), 3-13.
- MACURA, V., ŠKRINÁR, A., KALÚZ, K., JALČOVÍKOVÁ, M., ŠKROVINOVÁ, M. (2012). Influence of the morphological and hydraulic characteristics of mountain streams on fish habitat suitability curves. *River Research and Applications*, 28, 1161-1178.
- MADEJ, M. A. (2001). Development of channel organization and roughness following sediment pulses in single-thread, gravel bed rivers. *Water Resources Research*, 37, 2259-2272.
- MILZOW, C., MOLNAR, P., MCARDELL, B. W., BURLANDO, P. (2006). Spatial organization in the step-pool structure of a steep mountain stream (Vogelbach, Switzerland). *Water Resources Research*, 42, 418-429.



- MOLNAR, P., DENSMORE, A. L., MCARDELL, B. W., TUROWSKI, J. M., BURLANDO, P. (2010). Analysis of changes in the step-pool morphology and channel profile of a steep mountain stream following a large flood. *Geomorphology*, 124, 85-94.
- MONTGOMERY, D. R., BUFFINGTON, J. M. (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109, 596-611.
- NEMČOK, J. (1990). *Geological map of Pieniny and Čergov Mts., Ľubovnianska vrchovina and Ondavská vrchovina Uplands. Regional Geological Maps of Slovakia 1:50 000*. Bratislava (GÚDŠ).
- NICKOLOTSKY, A., PAVLOWSKY, R. (2007). Morphology of step-pools in a wilderness headwater stream: The importance of standardizing geomorphic measurements. *Geomorphology*, 83, 294-306.
- RADECKI-PAWLIK, A. (2002). Bankfull discharge in mountain streams: theory and practice. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 115-123.
- SCHUMM, S. A. (1977). *The fluvial system*. New York (Wiley).
- SOLÍN, L. (2005). Identification of homogeneous regional classes for flood frequency analysis in the light of regional taxonomy. *Hydrological Sciences Journal*, 50, 1105-1118.
- SOLÍN, L. (2011). Regionálna variabilita povodňovej hrozby malých povodí na Slovensku. *Geografický časopis*, 63, 29-52.
- SOLÍN, L., GREŠKOVÁ, A. (1999). Malé povodia Slovenska – základné priestorové jednotky pre jeho hydrogeografické regionálne členenie. *Geografický časopis*, 51, 77-96.
- TUROWSKI, J. M., YAGER, E. M., BADOUX, A., RICKENMANN, D., MOLNAR, P. (2009). The impact of exceptional events on erosion, bedload transport and channel stability in a step-pool channel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 1661-1673.
- WEICHERT, R. B., BEZZOLA, G. R., MINOR, H. E. (2008). Bed morphology and generation of step-pool channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 1678-1692.
- WHITING, P., J., STAMM, J., F., MOOG, D., B., ORNDORFF, R., L. (1999). Sediment transporting flows in headwater streams. *Geological Society of America Bulletin*, 111, 450-466.
- WHITTAKER, J. G. (1987). Sediment transport in step-pool streams. In Thorne, C. R., Bathurst, J. C., Hey, R. D., eds. *Sediment transport in gravel-bed rivers*. Chichester (Wiley), pp. 545-579.
- WHITTAKER, J. G., JAEGGI, M. N. R. (1982). Origin of step-pool systems in mountain streams. *Journal of the Hydraulics Division*, 108, 758-773.
- WOHL, E. E. (2010). *Mountain rivers revisited*. Washington (American Geophysical Union Press).
- WOHL, E. E., GRODEK, T. (1994). Channel bed-steps along Nahal Yael, Negev Desert, Israel. *Geomorphology*, 9, 117-126.
- WOHL, E. E., MADSEN, S., MACDONALD, L. (1997). Characteristics of log and clast bed-steps in step-pool streams of northwestern Montana, USA. *Geomorphology*, 20, 1-10.
- WOOLDRIDGE, C. L., HICKIN, E. J. (2002). Step-pool and cascade morphology, Mosquito Creek, British Columbia: a test of four analytical techniques. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 39, 493-503.
- ZIMMERMANN, A. E., CHURCH, M. (2001). Channel morphology, gradient profiles and bed stresses during flood in a step-pool channel. *Geomorphology*, 40, 311-327.
- ZIMMERMANN, A. E., CHURCH, M., HASSAN, M. A. (2008). Identification of steps and pools from stream longitudinal profile data. *Geomorphology*, 102, 395-406.

*Milan Frandofer, Milan Lehotský*

## STEP-LIKE CHANNEL STRUCTURE OF A HIGH-GRADIENT STREAM (EXEMPLIFIED BY THE UPPER REACH OF THE RIVER TOPĽA)

Small headwater streams mostly occur in the mountain environments abounding in Slovakia. Mountain streams are an integral component of the channel network connecting the terrestrial landscape to the lowland channels. They regulate the amount and nature of sediment transported to lowland streams. Without a quantitative understanding of headwater channel processes it is difficult to predict how landscapes develop under variable boundary conditions of the climate, lithology and tectonics. Headwater streams have been given less attention than larger rivers primarily because the latter are associated with the well-recognized resources, while headwater streams generally lack obvious resources, in particular fish, and are difficult to access and work in (Benda et al. 2005). Mountain catchments are likely to include a preponderance of step-pool channels. The steps are generally composed of accumulated cobbles and boulders transverse to channels; finer sediments filling the pools separate them. Steps and pools alternate in the streambed to produce a sediment size contrast and a periodic, staircase-like longitudinal profile in the stream channel (Chin and Wohl 2005).

Through vertical fall, steps decrease the amount of potential energy that would be otherwise available for the conversion into a longitudinal component of kinetic energy used for erosion and sediment transport (Ashida et al. 1976).

The step-like channel morphology of the headwater part of the Topľa River was evaluated in this paper. Based on detailed field measurements of a 1,668 m long channel reach with the mean gradient of 14%, basic morphometric parameters of 142 steps were statistically evaluated. The median step height is 0.4 m and the step wavelength varies mostly between 2 and 7.5 m. Like in some other case studies, the step wavelength to the height median ratio is 10:1. The values of other derived parameters, the relative step steepness  $c$  and vertical sinuosity index  $VSI$  were considerably lower in comparison with the results that were proposed to represent a stable step-pool channel. The  $c$  parameter of a stable well-developed step-pool channel should vary between 1 and 2 (Ashida et al. 1976), whilst in the Topľa case  $c = 0.67$ . Similarly, the  $VSI$  of a stable step-pool channel described by Chin and Phillips (2007) was 1.14, but the  $VSI$  of the Topľa channel is slightly above 1 (particularly 1.02). Based on established results of the cited empirical case studies, the results of the Topľa headwater channel reach suggest low channel stability in terms of erosion and sediment transport. Recently, the Topľa River basin encountered extreme summer flood events in 2008 and 2010, which presumably might be the source of disruption, but sediments and high gradient conditions may also limit the channel stability. In the Rio Cordon of Italy, Lenzi (2001) documented changes in  $c$  over time, from 1.30 before the 1994 extraordinary flood to 0.79 immediately afterward, increasing back to 1.33 with ordinary floods through 1998. Chin and Phillips (2007) documented an increase of  $VSI$  from 1.00 in 1965 (for the flat bed) to 1.05 in 2003 as step-pools developed, approaching an index of 1.14 for the idealized profile. Also Turowski (2009) documented such a step-pool channel behaviour under flood disruptions. Each of the events significantly affected the step-pool structure of the Erlenbach stream; the existing step structure was destroyed and steps were rearranged. These and other case studies support the suggestions of Madej (2001) and Chin and Phillips (2007), that step pools are rhythmic forms that reflect a general self-organization phenomenon operating on the earth's surface.

Further bed morphology monitoring of the Topľa headwater channel should reveal the possible development of stable step-pool morphology and contribute to the understanding of the behaviour of headwater streams, which is important both for understanding the fluvial system as a whole as well as for the river management because settlements in mountainous areas are frequently located on alluvial fans fed by steep streams and flood events are one of the main natural hazards in our regions. The knowledge of processes acting along step-pool channels to stabilize channel morphology and control sediment yields, ensure downstream water supplies, and protect human activities and aquatic habitat is becoming particularly important under conditions of increasing land use and recent climate fluctuations.

---

Tento príspevok vznikol s podporou softvéru získaného v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Centra excelentnosti: „Centrum pre rozvoj sídelnej infraštruktúry znalostnej ekonomiky“ SPECTRA+ (ITMS 26240120002), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

