

**Modelovanie brehovej erózie metódou BSTEM  
v súvislosti s extrémnymi prietokmi**

Modeling of bank erosion by method BSTEM  
in connection with extreme discharges

*Mariana Jakubisová*

*Arborétum Borová hora Technickej univerzity vo Zvolene,  
Borovianska cesta 66, 960 53 Zvolen, Slovenská republika*

**Abstrakt**

V súvislosti s klimatickou zmenou sa zvyšuje frekvencia výskytu extrémnych hydrologických situácií s následkom povodní a prejavov škodlivej erózie. V príspevku sa zaoberáme modelovaním a hodnotením brehovej stability a erózie v závislosti od prietoku na modelovom úseku (referenčnom profile) Železnobreznického potoka v geomorfologickom celku Kremnické vrchy s akcentom na extrémne prietoky. Modelom BSTEM (Bank Stability and Toe Erosion Model), ktorý bol na tieto účely vyvinutý v USA, kvantifikujeme faktor stability  $F_s$  a ohrozenie brehu koryta eróziou. Modelovaním sme potvrdili závislosť medzi stúpajúcim prietokom a faktorom stability. Faktor stability  $F_s$  klesá so stúpajúcim prietokom a ohrozenie brehu vodného toku eróziou stúpa.

**Kľúčové slová: vodné toky, brehová stabilita, erodibilita,**

**Abstract**

In the context of climate change increases the frequency of occurrence of extreme hydrological situations with the consequence of floods and following phenomena of harmful erosion. In the paper we deal with the modeling and evaluation of bank stability and erosion in dependence on the discharge in the flow profile of water flow Železnobreznický potok in the geomorphological unit Kremnické vrchy with focusing on the extreme discharges. With BSTEM (Bank Stability and Toe Erosion Model) which was developed on this purpose in the U.S. we quantify the factor of stability  $F_s$  and the menace of the bank through erosion. Through the modeling, we confirmed the dependence between discharges and factor of stability  $F_s$ . The factor of stability  $F_s$  decreases with increasing discharges and increases the erosion hazard on the bank of water flow.

**Keywords: water flows, bank stability, erodibility**

## Úvod

Klimatická zmena je zásadným a globálnym problémom Zeme. V súčasnosti sa na tento problém upriamuje pozornosť mnohých odborníkov z rôznych vedných disciplín. Zmeny, ktoré prináša klíma vo forme extrémnych javov a udalostí s extrémnymi dopadmi na krajinu a rôzne činnosti človeka sa prejavuje v rôznych oblastiach života. Neočakávané disturbancie, ich počet a intenzita sú výsledkom extrémnych poveternostných, klimatických aj hydrologických javov prebiehajúcich v krajine. Ľudská činnosť kontinuálne a významne ovplyvňuje tieto javy produkciou emisií a atmosférických radiačných plynov a aerosolov, ktoré majú dopad na zmeny vlastností zemského povrchu. Životný štýl človeka a exploatácia krajiny priniesli so sebou negatívne javy prejavujúce sa okrem iného aj zrážkami v podobe dlhotrvajúcich alebo privalových dažďov a následnými extrémnymi prietokmi s nadmernými prejavmi erózie v korytách vodných tokov. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) potvrdzuje, že vplyvom ľudskej činnosti sa bude naďalej otepľovať Zem s dramatickými dopadmi na klímu a s tým súvisiacimi environmentálnymi dôsledkami v krajine. Súhrnná medzinárodná správa o zmene klímy z 27. septembra 2013 prijatá v Štokholme 110 vládami poskytuje presvedčivé nové vedecké dôkazy, že ľudské aktivity sú príčinou bezprecedentných zmien klímy Zeme.

## Problematika

Extrémne prietoky v prirodzených korytách sú dôsledkom extrémnych prírodných hydrologických javov, charakterizovaných ako povodne (prírodné katastrofy), ktoré predstavujú podľa koncepcie integrovaného manažmentu povodňového rizika ohrozenie – riziko. SOLÍN, SKUBINČAN (2013) uvádzajú, že povodeň je prírodný hydrologický jav a od tohto hydrologického základu je odvodená aj koncepcia povodňového rizika, ktorá definuje riziko ako pravdepodobnosť  $F$ , s akou maximálny prietok  $Q_{max}$  neprekročí špecifikovanú hodnotu  $q$ . MAJERČÁKOVÁ ET AL. (2013) uvádza, že hydrologické extrémny, ak presiahnu hranicu, ktorá predstavuje únosnú mieru pre ochranu, sú pre dnešnú spoločnosť rizikovejšie ako kedykoľvek v minulosti. Postupne narastá citlivosť a zraniteľnosť kultúrnej krajiny voči akýmkoľvek extrémom, a to nielen hydrologickým. Extrémne prietoky sú však prirodzenou súčasťou obehu vody v prírode a môžeme ich aj paradoxne chápať ako jeden z prostriedkov sanácie prírodnej krajiny. JAKUBIS (2013) hodnotil skutočnosť, že oveľa viac pozornosti sa v minulosti venovalo rozsiahlym regionálnym povodňami v urbanizovanej krajine po dlhotrvajúcich dažďoch na veľkých riekach, ktoré postihovali rozsiahle územia ako povodňami v prírodnej krajine v malých horských povodiach, ktoré môžu byť rýchle,

nebezpečné a ničivé. Varovný systém a prognostika sú pri takýchto povodniach problematické, pretože sú náhle a neočakávané. Jedným zo znakov takýchto extrémnych prietokov, nielen pri lokálnych privalových, tzv. bleskových povodniach, sú prebiehajúce sprievodné extrémne až deštruktívne erózne procesy. Analýzou viacerých privalových (náhlych, bleskových, flash floods) povodní v malých povodiach SR, boli potvrdené opakujúce sa znaky takýchto povodní, t.z. pravdepodobnosť ich výskytu bola vyššia v letných mesiacoch (jún – august), teda z mimoriadne intenzívnych zrážok z tepla; riziko nebezpečnosti ich výskytu je vyššie po intenzívnych privalových zrážkach; vysoké zrážkové úhrny vznikli v krátkom čase, v priebehu niekoľkých hodín (napr. 1,5 až 3 hodiny), alebo išlo o vysoké denné zrážkové úhrny, resp. zrážkové úhrny za 24 hodín; nie je ich možné presnejšie predvídať, atď. Súčasťou takýchto extrémnych prietokov je aj extrémne ohrozenie vodných tokov nadmernou eróziou.

Kulminačný prietok (prietok plným prietokovým profilom), chápaný aj ako extrémny prietok, má pre úlohy v rámci starostlivosti o vodné toky, projektovania úprav (dimenzovania prietokových profilov), revitalizácie vodných tokov, protipovodňovej a protieróznej ochrany krajiny zásadný význam. Všeobecne, extrémnymi prietokmi sú najčastejšie ohrozené tie úseky toku, ktorých prietokové profily (PP) majú najnižšiu kapacitu. V týchto úsekoch sa pri zvýšení prietokov vylieva voda z koryta najskôr a teda aj najčastejšie. Prietok plným PP je blízky tzv. korytotvornému prietoku, t. j. prietoku, ktorý v porovnaní s inými prietokmi vykoná v určitom časovom intervale v danom prietokovom profile najväčšiu prácu (JAKUBIS 2009A, 2010). V SR výskumom dosiahnutia alebo prekročenia extrémneho prietoku na malých VT a jeho intervalom sa zaoberali viacerí domáci autori (GREŠKOVÁ, LEHOTSKÝ 2007, JAKUBIS 2007, 2009B, JAKUBIS, JAKUBISOVÁ 2012A, 2012B, 2012C, JAKUBIS 2011, JAKUBISOVÁ 2013 a ďalší). V zahraničí sa touto problematikou zaoberali WILLIAMS (1978), LAWLER ET AL. (2005), SHERWOOD, HUITGER (2005) a ďalší). Hodnotením extrémnych prietokov v súvislosti s brehovou stabilitou a s tým súvisiacou vodnou eróziou v korytách VT sa zaoberali mnohí zahraniční autori (PFANKUCH 1975, HARMEL ET AL. 1999, ROSGEN 2001, 2002, POLLEN ET AL. 2004, WYNN, MOSTAGHIMI 2006, CLARK, WYNN 2007 a ďalší). V súvislosti s extrémnymi prietokmi hodnotíme aj pôdnodeštruktčné procesy vyvolané vodnou eróziou v korytách VT a ich blízkom okolí.

Problematikou korytovej erózie a odnosom pôdy sa detailne zaoberali HESSION ET AL. (2003) a ALLMENDINGER ET AL. (2005). Z literatúry (MURGATROYD, TERNAN 1983, DARBY, THORN 1996, ROSGEN 1994, HUPP, OSTERKAMP 2006 a iní) je známy vplyv rôznych faktorov na brehovú stabilitu a eróziu pôdy. V súvislosti s citovanou literatúrou je možné vysloviť názor,

že erózia brehov korýt VT a rozdelenie tangenciálnych napätí v súvislosti s brehovou protieróznou ochranou má významný vplyv na výslednú hodnotu stupňa stability brehov a brehovej erózie. Výsledky výskumu objektívne potvrdzujú, že priame úseky korýt vodných tokov bez brehovej ochrany a s nižším koeficientom drsnosti boli viacnásobne vyššie poškodzované eróziou, ako s brehovou ochranou. Toto sa prejavuje viacnásobne extrémnejšie v oblúkoch korýt VT. Vo výsledkoch niektorých prác zahraničných autorov existujú rozpory, prípadne rozdiely, ktoré sú zdôvodňované odlišnými charakteristikami povodia a koryta toku, rozdielnymi lokálnymi podmienkami, ktoré charakterizujú skúmanú oblasť.

## Materiál

Modelovanie a hodnotenie brehovej stability a erózie koryta vodného toku v závislosti od extrémneho prietoku sme vykonali na modelovom referenčnom úseku referenčného profilu Železnobreznického potoka (ďalej RP ŽBP) v geomorfologickom celku Kremnické vrchy. Morfologické, hydrologické, geologické, pedologické, klimatické, vegetačné charakteristiky experimentálneho povodia a ŽBP sme podrobne spracovali v tabuľke (Tab. 1).

Tab. 1 Charakteristiky povodia Železnobreznického potoka

| Názov                        | Označ.           | Železnobreznický potok                |
|------------------------------|------------------|---------------------------------------|
| Geomorfologický celok:       | GMC              | Kremnické vrchy                       |
| Podcelok                     | -                | Flochovský chrbát, Túrovské predhorie |
| Hlavné povodie               | -                | SVP-IX-Hron                           |
| Hydrologické poradie         | -                | 4-23-04-026                           |
| Koeficient bystrinnosti pov. | $K_b$            | 0,191                                 |
| Charakter toku               | -                | Bystrina                              |
| Uzavierajúci profil povodia  | rkm              | 0,200                                 |
| Plocha povodia:              | $S_{pov}$        | 23,50 km <sup>2</sup>                 |
| Dĺžka rozvodnice             | O                | 28,97 km                              |
| Dĺžka hlavného toku          | L                | 12,500 km                             |
| Dĺžka prítokov.              | $L_p$            | 17,280 km                             |
| Celková dĺžka tokov          | $L_c$            | 29,780 km                             |
| Hustota tokov v povodí       | r                | 1,27 km/km <sup>2</sup>               |
| Dĺžka údolnice               | $L_u$            | 13,12 km                              |
| Stredná šírka povodia        | $B_p$            | 1,79 km                               |
| Pomer šírky ku dĺžke pov.    | š : d            | 1:7,33                                |
| Absolútny spád toku          | $\Delta H_t$     | 544 m                                 |
| Priemerný sklon toku         | $I_t$            | 4,35 %                                |
| Absolútny spád povodia       | $\Delta H_p$     | 685 m                                 |
| Absolútny spád údolnice      | $\Delta H_u$     | 670 m                                 |
| Priem. nadm. výška pov.      | $H_{\Phi_{pov}}$ | 595 m n. m.                           |
| Stredný sklon svahov pov.    | $I_{sv_{pov}}$   | 27,11 %                               |

Pokračovanie Tab. 1

|                              |             |   |
|------------------------------|-------------|---|
| Priemerný sklon údolnice     | $I_u$       | 5,11 %  |
| Plocha lesa v povodí         | $S_{LES}$   | 16,92 km <sup>2</sup>   |
| Lesnatosť povodia            | $l$ %       | 72,00 , %   |
| Luky a TTP                   | $S_{LP}$    | 5,070 km <sup>2</sup>   |
| Orná pôda                    | $S_{OP}$    | 0,990 km <sup>2</sup>   |
| Zastavaná plocha +spev.cesty | $S_{ZAST}$  | 0,410 km <sup>2</sup>   |
| Záhrady - ovocné sady        | $S_{ZAHR}$  | 0,110 km <sup>2</sup>   |
| Max. nadm. výška povodia     | $H_{max}$   | 960 m n.m.  |
| Min. nadm. výška povodia     | $H_{min}$   | 275 m n.m.  |
| Max. nadm. výška toku        | $H_{maxt}$  | 819 m n.m.  |
| Max. nadm. výška údol.       | $H_{maxu}$  | 945 m n.m.  |
| Priemerná ročná teplota      | $T$         | 5,9 °C  |
| Priemerný roč. zráž. úhrn    | $Z$         | 905 mm  |
| Priemerná roč. odtok. výška  | $O$         | 457 mm  |
| Priemerný roč. klim. výpar   | $E$         | 448 mm  |
| 100-ročný prietok            | $Q_{100}$   | 19,66 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>   |
| 50 – ročný prietok           | $Q_{50}$    | 16,8 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>  |
| 20 – ročný prietok           | $Q_{20}$    | 13,4 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>  |
| 10 – ročný prietok           | $Q_{10}$    | 10,9 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>  |
| 5 – ročný prietok            | $Q_5$       | 8,7 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>   |
| 2 – ročný prietok            | $Q_2$       | 5,9 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>   |
| 1 – ročný prietok            | $Q_1$       | 3,8 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>   |
| 364 – denný prietok          | $Q_{364 d}$ | 0,027 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>   |
| Maximálny špecif. odtok      | $q_{max}$   | 0,836 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>-2</sup>   |
| Geologické podložie          | -           | Neovulkanity (pyroxénické andezity, amfibolicko-biotitické andezity)  |
| Pôdne typy                   | -           | Kambizem mod. nasýtená (85%), Ranker mod., Kambizem ando-zemná, Ranker mod., Fluvizem mod.  |
| Pôdne druhy                  | -           | Hlinité (97%), Piesočnato-hlinité Hlinito-piesočné, Ílovito-hlinité   |
| Dreviny (listnaté/ihličnaté) | -           | Listnaté (75%), Ihličnaté (25%)   |
| Lesné vegetačné stupne       | -           | 1. – 5. lvs   |
| Klimatické oblasti a okrsky  | -           | T – teplá, s okrskom T7-teplým, mierne vlhkým, s chladnou zimou, M – mierne teplá, s okrskami M3-mierne teplým, mierne vlhkým, pahorkatinovým až vrchovinovým, M6-mierneteplým, vlhkým, vrchovinovým; C – chladná, s okrskom C1-mierne chladným |

## Metodika

Najnovšia metóda na výskum recentného stavu brehovej erózie vodných tokov a jej predikcie, ktorá je na Slovensku v stave overovania, je IT metóda stanovenia brehovej stability a erózie päty svahu BSTEM - Bank Stability and Toe Erosion Model (SIMON ET AL. 2009). Model bol vyvinutý v USA (v Oxforde) Národným sedimentačným laboratóriom pre výskum fyzikálnych procesov v povodiach (USDA-ARS-NSL Watershed Physical Processes Research Unit, Oxford).

Metodika modelu vychádza z kategorizácie pokusných úsekov VT na základe vypočítaného faktora stability ( $F_s$ ) a koeficienta erodibility. Model umožňuje vypočítať, modelovať, predikovať a hodnotiť existujúcu a potenciálnu stabilitu a brehovú eróziu koryta VT na základe meraných, prípadne volených vstupných údajov v súvislosti s ochranou brehu alebo bez nej v kontexte spolupôsobiacich faktorov. Modelovaním vstupných údajov (geometrických, hydraulických, hydrologických a pôdných), vrátane hodnotenia brehovej ochrany, je možné hodnotiť stabilitu brehov VT a eróziu, vrátane erózie päty svahu, kde vzniká najväčšie tangenciálne napätie a ohrozenie eróziou. Model ponúka hodnotenie brehovej ochrany s rozčlenením na technickú a biologickú ochranu brehov korýt VT. Vegetačné spevnenie, ako forma biologickej ochrany brehov, je hodnotené Rip-Root modelom (Run Root-Reinforcement Model), prostredníctvom tzv. prídavnej kohézie koreňov -  $c_r$  (kPa).

Výpočet faktora stability ( $F_s$ ) prebieha podľa vzťahu 1 (SIMON ET AL 2000):

$$F_s = \frac{\sum_{i=1} (c'_i L_i + (\mu_a - \mu_w)_i L_i \tan \phi_i^b + [W_i \cos \beta - \mu_{ai} L_i + P_i \cos(\alpha - \beta)] \tan \phi_i')}{\sum_{i=1} (W_i \sin \beta - P_i \sin[\alpha - \beta])} \quad (1)$$

kde:

$c'_i$  – efektívna súdržnosť  $i$  tej vrstvy (Pa);

$L_i$  – dĺžka poškodenej roviny  $i$  tej vrstvy (m);

$\mu_a$  – sací tlak v kapilárach (Pa);

$\mu_{ai}$  – sací tlak v kapilárach  $i$  tej vrstvy (Pa);

$\mu_w$  – sací tlak pôdnej vody (celkový potenciál pôdnej vody) (Pa);

$\phi_i$  – efektívny uhol vnútorného trenia  $i$  tej vrstvy ( $^\circ$ );

$\phi_i^b$  – efektívny uhol vnútorného trenia závislý od druhu pôdy a saturácie

$W_i$  – hmotnosť  $i$  tej vrstvy (kN);

$P_i$  – podiel hydrostatickej-hraničnej sily (kN/m) pôsobiacej na  $i$  tú vrstvu

$\beta$  – uhol poškodenej roviny ( $^{\circ}$ ) od horizontálnej roviny;

$\alpha$  – uhol sklonu brehu ( $^{\circ}$ );

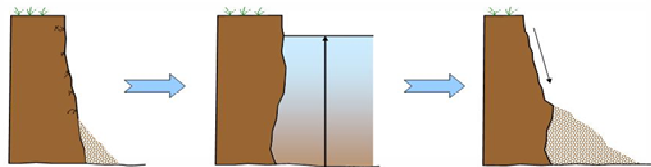
$i$  – číslo vrstvy.

Hodnotenie brehovej stability je založené na výpočte tzv. faktora stability ( $F_s$  - Factor of Safety) a klasifikačnej stupnice v Tab. 2.

Tab. 2 Klasifikačná stupnica faktora stability podľa BSTEM

|                            |              |                         |                |
|----------------------------|--------------|-------------------------|----------------|
| Faktor stability ( $F_s$ ) | $>1,3$       | $1,0 - 1,3$             | $< 1,0$        |
| Stupeň stability brehu     | Stabilný – S | prechodne stabilný - PS | Nestabilný - N |

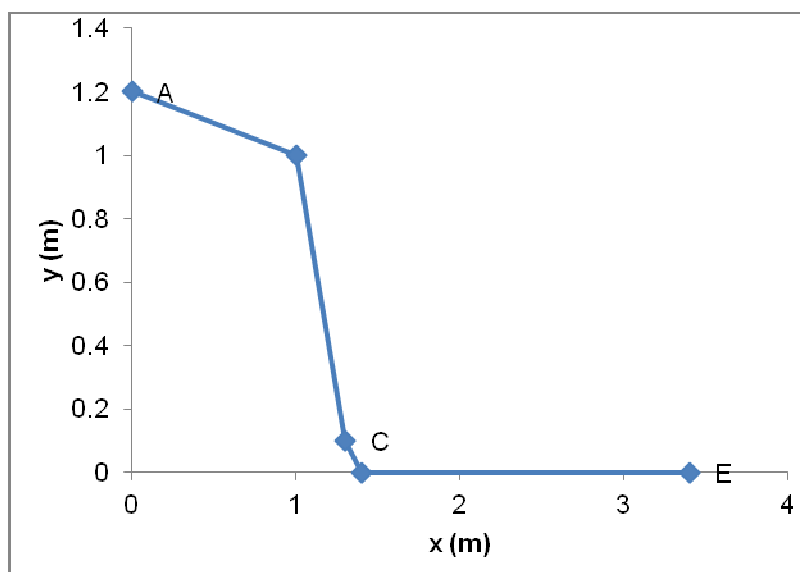
Eróznym modelom BSTEM na základe vstupných údajov (pozri Tab. 3, Obr. 2 ) sme vygenerovali vstupné súradnice pre výslednú geometriu referenčného profilu (pozri Tab. 4, Obr. 3). V časti pre vstupné údaje brehového materiálu sme zvolili podľa skutočného pôdneho zloženia druh pôdy na svahu (hlinitá pôda) a na päte svahu (štrk) a výstupným modelom BMO (Bank Model Output) sme kvantifikovali faktor stability  $F_s$ . V prípade nestabilného svahu ( $F_s = 0,6$ ) model BMO vypočíta aj výstupné hodnoty ohrozenia brehu a päty svahu eróziou (pozri Tab.5, Tab.6). Vo výpočte boli zohľadnené skutočné geometrické, hydraulické, hydrologické a pôdne charakteristiky a parametre koryta RP ŽBP. Vykonali sme modelovanie faktora stability  $F_s$  v závislosti od výšky prietoku (pozri Obr. 4) na vybranom vzorovom RP ŽBP a simuláciu priebehu faktora stability v rozpätí výšok od maximálneho prietoku plným prietokovým profilom (v našom prípade je  $H_{\max} = 1$  m) po výšku minimálneho prietoku ( $H_{\min} = 0,05$  m). Identifikovali sme  $F_s$  - faktor stability a  $S_{TS}$  - stupeň stability (pozri Tab. 8) pri rôznych výškach prietoku na základe klasifikačnej stupnice podľa BSTEM (pozri Tab.2). Modelom TMO (Toe Model Output) sme vypočítali výstupné parametre erózneho ohrozenia päty svahu s kvantifikáciou jej erózneho ohrozenia na modelovom RP ŽBP (pozri Tab. 6). Modelom TMO (Toe Model Output) sme stanovili hodnoty kritického tangenciálneho napätia a koeficienta erodibility v súvislosti s prítomným brehovým materiálom (pozri Tab. 7) a stupňom drsnosti podľa Manninga ( $n = 0,0303$ ). Tieto údaje sme porovnali so skutočným stavom poškodenia RP a RU v teréne, ktoré sme vyhodnotili v predchádzajúcom výskume (JAKUBISOVÁ 2011) podľa metódy stanovenia súčiniteľa erózneho ohrozenia brehu podľa Rosgena, Bank Erosion Hazard Index (ROSGEN 2002). Mechanizmus poškodenia brehu pri zvýšených prietokoch simuluje Obr. 1 (SIMON ET AL. 2009).



Obr. 1: Mechanizmus poškodenia brehu pri zvýšených prietokoch (SIMON ET AL. 2009)

Tab. 3: Vstupné údaje pre výpočet brehovej stability a erózie pre RP ŽBP podľa BSTEM

|   |                               |      |      |      |      |
|---|-------------------------------|------|------|------|------|
| X (súradnica geometrie brehu, RP)                       | 0,00                          | 1,00 | 1,30 | 1,40 | 3,40 |
| Y (súradnica geometrie brehu, RP)                       | 1,20                          | 1,00 | 0,10 | 0,00 | 0,00 |
| dĺžka referenčného úseku (m)                            | 10                            |      |      |      |      |
| ø sklon referenčného úseku (m/m)                        | 0,015                         |      |      |      |      |
| výška referenčného prietokového profilu (m)             | 1,0                           |      |      |      |      |
| trvanie prietoku (h) RP                                 | 3                             |      |      |      |      |
| mocnosť pôdnej vrstvy (m) RP                            | 1,0                           |      |      |      |      |
| druh pôdy/breh RP                                       | hlinitá pôda                  |      |      |      |      |
| druh pôdy/päta svahu RP                                 | hrubý štrk s prímiesou piesku |      |      |      |      |
| ø rozmer nesúdržnej častice (mm) RP                     | 0,5                           |      |      |      |      |
| tangenciálne napätie - $\tau_c$ (Pa) RP                 | 0,36                          |      |      |      |      |
| koeficient erodibility ( $\text{cm}^3 / \text{Ns}$ ) RP | 0,167                         |      |      |      |      |
| $F_s$ pri plnom prietokovom profile RP                  | 0,6                           |      |      |      |      |
| ø rozmer efektívneho zrna na päte svahu RP              | 6,3                           |      |      |      |      |
| koeficient drsnosti na päte svahu                       | 0,0303                        |      |      |      |      |



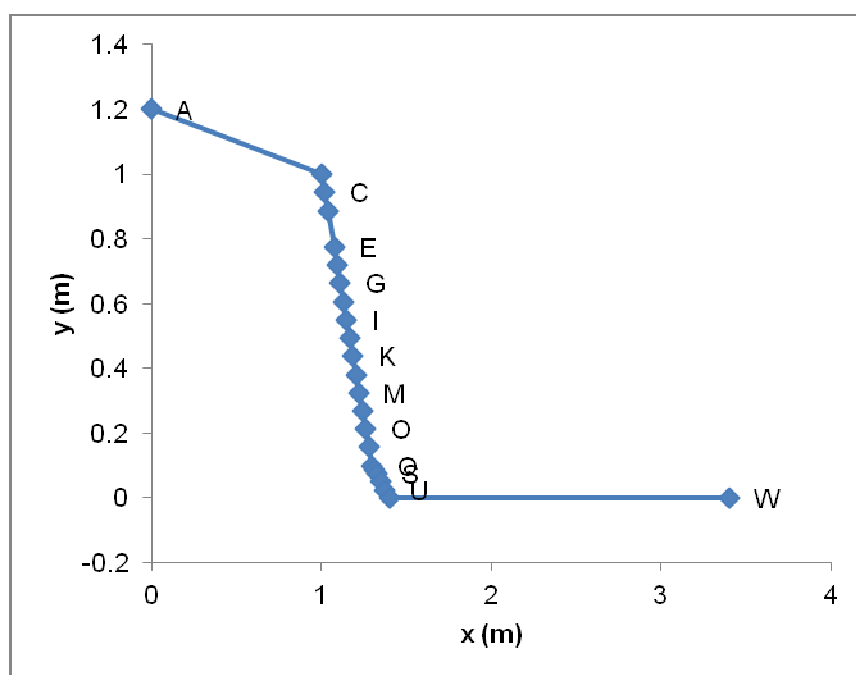
Obr. 2: Geometrické charakteristiky RP



## Výsledky

Tab. 4: Geometria RP (súradnice x, y) vygenerovaná modelom BSTEM

| súradnice | x    | y    |      | x    | y    |      | x    | y    | Vrchol     |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------|
| body      | (m)  | (m)  | body | (m)  | (m)  | body | (m)  | (m)  | päty svahu |
| A         | 0,00 | 1,20 | I    | 1,15 | 0,55 | Q    | 1,30 | 0,10 | ☑          |
| B         | 1,00 | 1,00 | J    | 1,17 | 0,49 | R    | 1,31 | 0,09 |            |
| C         | 1,02 | 0,94 | K    | 1,19 | 0,44 | S    | 1,33 | 0,08 |            |
| D         | 1,04 | 0,89 | L    | 1,21 | 0,38 | T    | 1,35 | 0,05 |            |
| E         | 1,08 | 0,78 | M    | 1,23 | 0,33 | U    | 1,38 | 0,03 |            |
| F         | 1,09 | 0,72 | N    | 1,24 | 0,27 | V    | 1,40 | 0,00 |            |
| G         | 1,11 | 0,66 | O    | 1,26 | 0,21 | W    | 3,40 | 0,00 |            |
| H         | 1,13 | 0,61 | P    | 1,28 | 0,16 |      |      |      |            |
|           |      |      |      |      |      |      |      |      |            |



Obr. 3: Geometria RP vygenerovaná modelom BSTEM

Tab. 5: Výstupné hodnoty  $F_s$  a brehovej erózie RU ŽBP vygenerované modelom BSTEM

|  |            |
|--|------------|
| Faktor stability ( $F_s$ ) RP pri PPP          | 0,6        |
| Stupeň stability brehu ( $S_{TS}$ ) RP pri PPP | nestabilný |
| Šírka poškodenia (m)                           | 1,29       |
| Objem poškodenia ( $m^3$ )                     | 4          |
| Hmotnosť sedimentov (kg)                       | 7210       |

Legenda: RP - referenčný profil, PPP - plný prietokový profil,  $S_{TS}$  – stupeň stability

Tab. 6: Výstupné hodnoty erózie päty svahu RP ŽBP vygenerované modelom BSTEM

| n<br>(bezrozmerné) | aplikované<br>$\tau_c$ (Pa) | LU <sub>max</sub><br>(cm) | EP <sub>brehu</sub><br>(m <sup>2</sup> ) | EP <sub>päty svahu</sub><br>(m <sup>2</sup> ) | EP <sub>dna</sub><br>m <sup>2</sup> | $\Sigma$ EP<br>m <sup>2</sup> |
|--------------------|-----------------------------|---------------------------|--|---|-------------------------------------|-------------------------------|
| 0,0303             | 23,23                       | 9,729                     | 0,052                                    | 0,002   | 0,000                               | 0,054                         |

Legenda: n - koeficient drsnosti;  $\tau_c$  (Pa) – aplikované kritické tangenciálne napätie (podľa koeficienta drsnosti); LU<sub>max</sub> (cm) - maximálny laterálny ústup; EP<sub>brehu</sub> (m<sup>2</sup>) - plocha erózie brehu; EP<sub>päty svahu</sub> (m<sup>2</sup>) - plocha erózie päty svahu; EP<sub>dna</sub> (m<sup>2</sup>) - plocha erózie dna koryta;  $\Sigma$ EP (m<sup>2</sup>) - celková plocha erózie; RP ŽBP – referenčný profil Železnobreznického potoka

Tab. 7: Výstupné hodnoty  $\tau_c$  a koeficienta erodibility podľa pôdneho materiálu v TMO

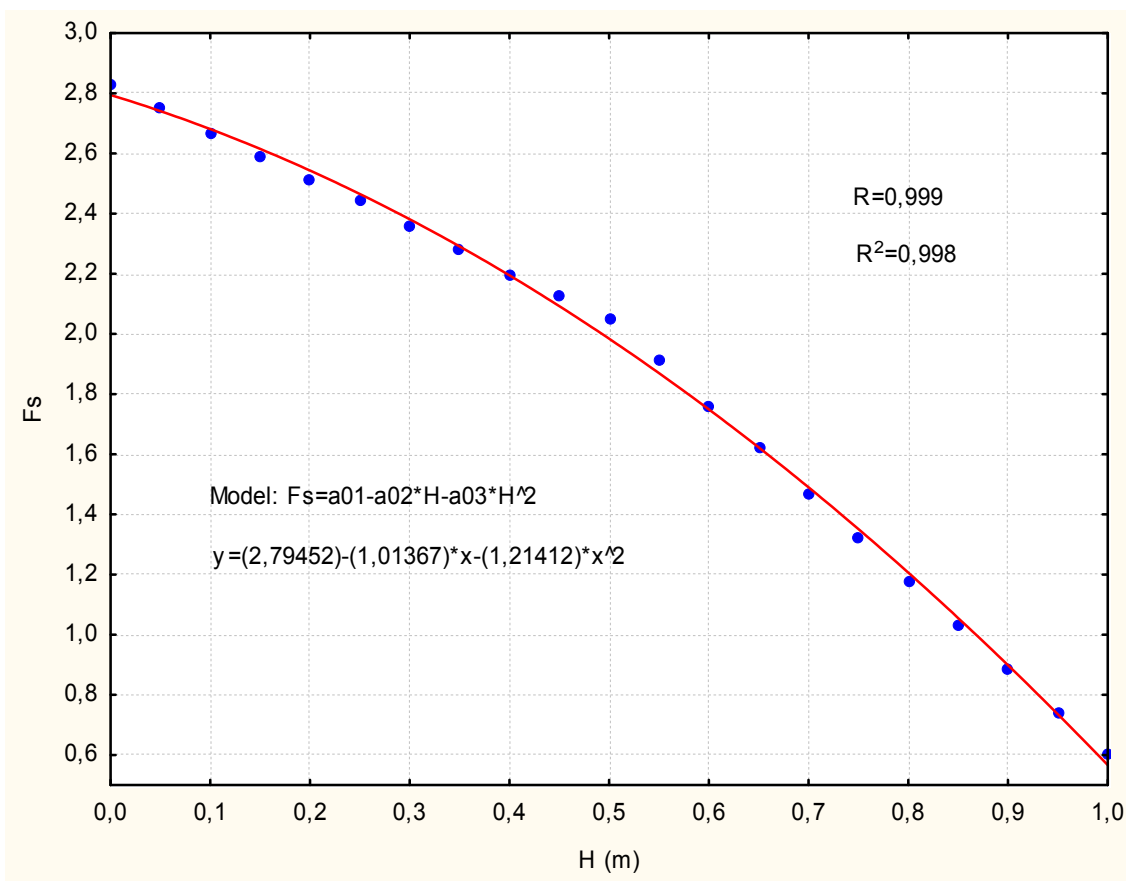
| Lokalizácia pôdneho materiálu                   | Svah         | Päta svahu |
|---|--------------|------------|
| Druh materiálu                                  | hlina/piesok | štrk       |
| Kritické tangenciálne napätie $\tau_c$ (Pa)     | 0,13         | 11,00      |
| Koeficient erodibility (cm <sup>3</sup> /Ns)    | 0,282        | 0,030      |
| $\phi$ rozmer efektívneho zrna na päte svahu RP | -            | 6,3        |
| koeficient drsnosti na päte svahu               | -            | 0,0303     |

Legenda: TMO – výstupný model (Toe Model Output)

Tab. 8: Výstupné hodnoty F<sub>s</sub> a S<sub>T</sub>S v závislosti od výšky vodnej hladiny RP ŽBP

| P.č. | H <sub>(m)</sub> | F <sub>s</sub> | S <sub>T</sub> S | P.č. | H <sub>(m)</sub> | F <sub>s</sub> | S <sub>T</sub> S |
|------|------------------|----------------|------------------|------|------------------|----------------|------------------|
| 1    | 1,00             | 0,60           | N                | 11   | 0,50             | 2,05           | S                |
| 2    | 0,95             | 0,74           | N                | 12   | 0,45             | 2,13           | S                |
| 3    | 0,90             | 0,89           | N                | 13   | 0,40             | 2,20           | S                |
| 4    | 0,85             | 1,03           | PS               | 14   | 0,35             | 2,28           | S                |
| 5    | 0,80             | 1,18           | PS               | 15   | 0,30             | 2,36           | S                |
| 6    | 0,75             | 1,32           | S                | 16   | 0,25             | 2,44           | S                |
| 7    | 0,70             | 1,47           | S                | 17   | 0,20             | 2,51           | S                |
| 8    | 0,65             | 1,62           | S                | 18   | 0,15             | 2,59           | S                |
| 9    | 0,60             | 1,76           | S                | 19   | 0,10             | 2,67           | S                |
| 10   | 0,55             | 1,91           | S                | 20   | 0,05             | 2,75           | S                |

Legenda: P. č. – poradové číslo; H(m) – výška vodnej hladiny v metroch; F<sub>s</sub> – faktor stability; S<sub>T</sub>S – stupeň stability: N – nestabilný, PS – prechodne stabilný, S – stabilný



Obr. 4: Závislosť faktora stability ( $F_s$ ) od výšky vodnej hladiny ( $H$ ),  $F_s = f(H)$

## Diskusia

Problematika brehovej stability a s ňou súvisiaca brehová erózia VT nadobúda čoraz väčší význam hlavne z dôvodov možných negatívnych dopadov na človeka a spoločnosť. SIMON ET AL. (2009) uvádzajú, že pôdne straty z brehov VT môžu tvoriť až 90% z celkového objemu erodovaného riečneho materiálu za rok. ROSGEN (2002) uvádza, že v niektorých prípadoch môžu tvoriť pôdne straty vyvolané eróziou brehov vodných tokov až 80% z celkových ročných pôdnych strát v povodí. POLLEN ET AL. (2004) zistili, že tento podiel môže tvoriť viac ako 50% z celkových ročných pôdnych strát v povodí. SIMON ET AL. (2011) uvádzajú, že následkom brehovej erózie zlyháva priemerne až 50% všetkých brehov VT. Tieto hodnoty citovaní autori uvádzajú v súvislosti s rôznymi lokálnymi podmienkami a faktormi vplyvu. Výskumom však potvrdzujú, že význam problematiky, vzhľadom na reálne pôdne straty, narastá. V súvislosti s citovanou literatúrou je možné vysloviť názor, že erózia brehov korýt VT a rozdelenie tangenciálnych napätí v súvislosti s brehovou protieróznou ochranou má významný vplyv na výslednú hodnotu stupňa stability brehov a brehovej erózie. Výsledky výskumu objektívne potvrdzujú, že priame úseky korýt vodných tokov bez brehovej ochrany a s nižším koeficientom drsnosti boli viacnásobne vyššie poškodzované eróziou, ako s ňou.

Toto sa prejavuje viacnásobne extrémnejšie v oblúkoch korýt VT. Vo výsledkoch niektorých prác autorov existujú rozpory, prípadne rozdiely, ktoré sú zdôvodňované odlišnými charakteristikami povodia a koryta toku, rozdielnymi lokálnymi podmienkami, ktoré charakterizujú skúmanú oblasť.

Z analyzovaných parametrov vyplýva, že brehová stabilita a intenzita brehovej erózie súvisí s konkrétnymi lokálnymi charakteristikami RP (RU): geometrickými (tvar prietokového profilu), pedologickými (druh pôdy, existencia alebo absencia pôdnych vrstiev, skeletnosť, pôdna vlhkosť, saturácia), brehovou ochranou (nezohľadňovali sme brehovú ochranu), hydraulickými atď. Potvrdili sme fakty, uvádzané v literatúre (SIMON ET AL. 2000, SIMON, POLLEN-BANKHEAD 2011), že stupeň poškodenia brehu závisí od výšky vodnej hladiny, ďalej pôdneho druhu, typu svahu, stratifikácie a ďalších zohľadnených faktorov v modelovaní. Mechanizmy poškodenia brehu pri zvýšených prietokoch súvisia s teóriou poškodení tzv. horizontálnych a vertikálnych vrstiev na svahu a jeho päte, ktoré model BSTEM podrobne popisuje a vo výpočtoch zohľadňuje. Vo výstupnom modeli BMO pri  $F_s = 0,6$  a maximálnom prietoku je predpokladaná šírka poškodenia brehu 1,29 m, objem poškodenia  $4 \text{ m}^3$  a hmotnosť erodovaných sedimentov 7210 kg na priamom RU s dĺžkou 10 m. V rámci analýzy a hodnotenia reálneho stavu na RU ŽBP s odkazom na literatúru (SIMON ET AL. 2000, SIMON, COLLISON 2002) predpokladáme prevládajúce rotačné zosuvy svahov pri zvýšených prietokoch a previsové poškodenia brehov v dôsledku podmytia päty svahu pri maximálnych prietokoch (THORNE ET AL. 1981). Erodujúca bazálna vrstva päty svahu spôsobuje v extrémnych prípadoch rúcanie svahov a vznik extrémnej erózie pri maximálnych prietokoch, typických pre rýchle povodne. Z porovnania závislosti brehovej stability od výšky hladiny prietoku ( $F_s = f(H)$ ) vyplýva, že so zvyšujúcou sa hladinou prietoku faktor stability klesá, teda poškodenie brehu a päty svahu stúpa. Pri extrémnych prietokoch, prietokoch plným prietokovým profilom sa stupeň ohrozenia brehu eróziou zvyšuje, čo dokumentuje údaj o faktore stability brehu ( $F_s = 0,6$ ) a breh je vyhodnotený v rámci metodiky ako nestabilný. Pri prietoku plným prietokovým profilom v trvaní 3 hodiny (pozri Tab. 3) je stupeň poškodenia brehu a päty svahu eróziou významný, čo dokumentujú kvantifikované údaje o brehovej erózii a potvrdzujú predpoklady o pôdnych stratách dokumentované v literatúre. RP ZBP vykazuje reálnu ohrozenosť pri zvýšených prietokoch s výškou vodnej hladiny 0,75 m a vyššou a podľa klasifikačnej stupnice podľa BSTEM (pozri Tab. 2) ho zaradujeme do kategórie nestabilných brehov. Faktor stability sa mení podľa dosiahnutej výšky vodnej hladiny v rozpätí hodnôt od  $F_s=0,6$  do  $F_s=2,75$  (zo stupňa nestabilného cez prechodne stabilný až k stabilnému), teda stabilita alebo labilita korešponduje s vypočítaným faktorom

stability brehu. Rozhodující vplyv na erodibilitu brehov a ich stabilitu má kritické tangenciálne napätie. Pri aplikovanom tangenciálnom napätí na päte svahu, ktorý model vypočítal pri prietoku plným prietokovým profilom a na základe zadanej hodnoty stupňa drsnosti podľa Manninga, maximálny laterálny ústup brehu ( $LU_{max}$ ) v dôsledku erózie päty svahu je rovný 9,729 cm, čo predstavuje plochu erózie brehu na RP:  $EP_{brehu} = 0,052 \text{ m}^2$  a päty svahu:  $EP_{päty \text{ svahu}} = 0,002 \text{ m}^2$ . Plocha celkovej erózie na päte svahu RP je  $0,054 \text{ m}^2$ . Na celom RU s dĺžkou 10 m, by bola potenciálna erózia na päte svahu  $0,54 \text{ m}^3$ . Objem brehového poškodenia vypočítaný podľa BMO je  $4 \text{ m}^3$ . Predpokladaná celková erózia RU ZBP predstavuje hodnotu  $4,54 \text{ m}^3$ . Modelovaním sme potvrdili priamu závislosť stability svahu od výšky prietoku a kvantifikáciou brehovej erózie sme stanovili potenciálnu eróziu RU ZBP, ktorá môže vzniknúť pri extrémnych prietokoch.

### **Záver**

V celospoločensky dôležitej problematike posudzovania brehovej stability a erózie korýt VT v súvislostiach s extrémnymi prietokmi sme analyzovali vzťahy medzi faktorom stability brehu  $F_s$ , ktorý bol vypočítaný modelom BSTEM a výškou prietoku s dôrazom na extrémny prietok, pričom hodnoty faktora stability  $F_s$  sme považovali za nezávislé premenné. Analyzovali sme závislosť  $F_s = f(H)$ . Kvantifikovali sme parametre brehovej erózie pri prietoku plným prietokovým profilom. Zistili sme potenciálnu eróziu na brehu RU, ktorá predstavovala hodnotu  $4,54 \text{ m}^3$  na priamom úseku dĺžky 10 m. Výsledky sme porovnali s reálnymi výsledkami z predchádzajúceho výskumu podľa metodiky BEHI Bank Erosion Hazard Index (ROSGEN 2002) a potvrdili relevantnosť výsledkov podľa metodiky BSTEM. Na základe analýzy na viacerých vodných tokoch SR sme zistili, že model BSTEM je možné uplatniť pri posudzovaní stability brehov, kvantifikácii a predikcii ich eróznej ohrozenosti aj pre podmienky Slovenska. Použitie modelu BSTEM je uplatniteľné v praxi v otázkach posudzovania brehovej stability a erózie brehov VT za predpokladu odbornej spôsobilosti používateľa.

### **Literatúra**

ALLMENDINGER, N. F., PIZUTTO, J. E., POTTER, N., JOHNSON, T. E. AND HESSION, C. W. 2005: The influence of riparian vegetation on stream width, eastern Pennsylvania, USA. The Geological Society of America Bulletin, Vol. 117, No. 1-2, pp. 229-243.

- CLARK, L. A., WYNN T. M. 2007: Methods for determining streambank critical shear stress and soil erodibility: implications for erosion rate predictions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50, No. 1, pp. 95-106.
- DARBY, S. E. AND THORNE, C. R. 1996: Development and testing of riverbank – stability analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122, No. 8, pp. 443-454.
- GREŠKOVÁ, A., LEHOTSKÝ, M. 2007: Vplyv lesných brehových porastov na správanie a morfológiu riečného koryta. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 7, č. 1, s. 36-42
- HARMEL, R. D., HAAN, C. T., DUTNELL, R. C. 1999: Evaluation of Rosgen' streambank erosion potential assessment in Northeast Oklahoma. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, No. 1, pp. 113-121.
- HESSION, W. C., PIZZUTO, J. E., JOHNSON, T. E., HORWITZ, R. I. 2003: Influence of bank vegetation on channel morphology in rural and urban watersheds. *Geology*, 31, pp. 147– 150.
- HUPP, C. R., OSTERKAMP, W. R. 1996. Riparian vegetation and fluvial geomorphic processes. *Geomorphology*, Vol. 14, pp. 277 – 295.
- JAKUBIS, M. 2007: Analýza kapacity prirodzených prietokových profilov a možnosti využitia výsledkov v procesoch preventívnej starostlivosti o bystriny. In: Klč, P., Zajacová, J. (eds.): Zborník referátov MVK Lesnícké stavby a jejich perspektivy. Praha: ČZU, Fakulta lesnícká a environmentální, s. 29 – 36.
- JAKUBIS, M. 2009A: Prietoková kapacita prirodzených malých tokov a jej význam protipovodňovej ochrane krajiny. In: Dreslerová, J. (ed.): Venkovská krajina 2009. Zborník zo 7. ročníka medzinárodnej medziodborovej konferencie. Brno: Česká společnost pro krajinnou ekologii, s. 61 – 69.
- JAKUBIS, M. 2009B: Interval opakovania prietoku plným prietokovým profilom v prirodzených korytách vodných tokov v malých povodiach. *Acta Facultatis Forestalis Zvolen*, XLXI, s.77-87.
- JAKUBIS, M. 2011: Povodňové prietoky a interval ich opakovania v prirodzených korytách horských tokov. In: Plechatá, S. (ed.) Zborník referátov medzinárodnej odbornej konferencie Vodní toky 2011. Kostelec nad Černými lesy: Lesnícká práce, s.r.o., s. 161-167.
- JAKUBISOVÁ, M. 2011. Predikcia stability a erózneho ohrozenia brehov v prítokoch vodárenských nádrží modelom BSTEM. In: Buchlovičová, J. (ed.): Zborník prednášok z konferencie s medzinárodnou účasťou PITNÁ VODA. Bratislava: VÚVH, s. 283-292.
- JAKUBIS, M., JAKUBISOVÁ, M. 2012 A: Analýza závislostí základných geometrických charakteristik prietokových profilov prirodzených bystrín Západných Tatier. In: Ondrejka-Habuláková, V. (ed.): Zborník prác IX. International Scientific Conference FCE TUKE, Košice, 7 s.

JAKUBIS, M., JAKUBISOVÁ, M. 2012 B: Frekvencia výskytu prietoku plným prietokovým profilom v prirodzených korytách bystrín Západných Tatier pod zdrojovými zónami. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, 54 (3), s. 121-134.

JAKUBIS, M., JAKUBISOVÁ, M. 2012 C: Význam brehovej vegetácie vodných tokov v ochrane vidieckej krajiny pred eróziou. In: Drobilová, L. (ed.): Venkovská krajina 2012. Zborník z 10. ročníka medzinárodnej medziodborovej konferencie. Brno: MZLU, LDF, s. 89-94.

JAKUBISOVÁ, M., 2013: Brehové porasty a povodňové prietoky. In: Jakubis, M., Podkonický, L. (eds.) Zborník vedeckej konferencie Súčasný stav a východiská protipovodňovej ochrany v SR – technické a biotechnické opatrenia v povodiach. Zvolen: TU vo Zvolene, s. 69 – 76.

JAKUBIS, M. 2013: K problematike privalových povodní na Slovensku a k úlohám lesníkov v ochrane krajiny pred povodňami. In: Jakubis, M., Podkonický, L. (eds.) Zborník vedeckej konferencie Súčasný stav a východiská protipovodňovej ochrany v SR – technické a biotechnické opatrenia v povodiach. Zvolen: TU vo Zvolene, s. 42 – 50.

LAWLER, D. M., THORNE, C. R. AND HOOKE, J. M. 2005: Bank erosion and Instability. In: Thorne, C.R., Hey, R. D., Newson, M. D. (Eds.): Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management. Cichester: John Wiley & Sons Ltd., pp.137-172.

MAJERČÁKOVÁ, O., MAJERČÁK, J., LEŠKOVÁ, D. 2013: Ak je vody priveľa. In: Jakubis, M., Podkonický, L. (eds.) Zborník vedeckej konferencie Súčasný stav a východiská protipovodňovej ochrany v SR – technické a biotechnické opatrenia v povodiach. Zvolen: TU vo Zvolene, s. 6 – 14.

MURGATROYD, A. L. AND TERNAN, J. L. 1983: The impact of afforestation on stream bank erosion and channel form. Earth Surface Processes and Landforms, 8, pp. 357 – 369.

PFANKUCH, D. J. 1975: Stream reach inventory and channel stability evaluation. Washington, D. C.: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, R1-75-002, 26 p.

POLLEN, N., SIMON, A. AND COLLISON, A. J. C. 2004: Advances in Assessing the Mechanical and Hydrologic Effects of Riparian Vegetation on Streambank Stability, In: Bennet S., Simon A. (eds): Riparian Vegetation and Fluvial Geomorfology, Water Science and Applications 8, AGU, pp. 125-139.

ROSGEN, D. L. 1994: A classification of Natural Rivers. Catena, Vol. 22. Elsevier Science, B. V. Amsterdam, pp. 169-199.

ROSGEN, D. L. 2001: A stream channel stability assessment methodology. In: Proceedings of the 7th federal interagency sedimentation conference, Vol. II, Pagosa Springs, CO: Wildland Hydrology, pp. 18 – 26.

ROSGEN, D. L. 2002: A practical method of computing streambank erosion rate. Pagosa Spring, Colorado: Wildland Hydrology, 10 p.

SHERWOOD, J. M., HUITGER, C. A. 2005: Bankfull characteristics of Ohio streams and their relation to peak streams-flows. U. S. Geological Survey Scientific Investigation report 2005-5153, s. 38

SIMON, A., CURINI, A., DARBY, S. E., LANGENDOEN, E. J. 2000: Bank and near-bank processes in an incised. *Geomorphology*, 35, pp. 183-217.

SIMON, A., THOMAS, R., CURINI, A., BANKHEAD, N. 2009: Bank stability and toe erosion model (BSTEM) Static version 5.2. Oxford: USDA ARS - National Sedimentation Laboratory, 54 p.

SIMON, A., POLLEN - BANKHEAD, N., THOMAS, R., E. 2011: [Ebookbrowse.com/bstem-pdf-d233769994](http://Ebookbrowse.com/bstem-pdf-d233769994) - pp Application of BSTEM 012811. 23 p.

SOLÍN, L., SKUBINČAN, P. 2013: Preventívna protipovodňová ochrana v SR: inžiniersky alebo integrovaný prístup? In: Jakubis, M., Podkonický, L. (eds.) Zborník vedeckej konferencie Súčasný stav a východiská protipovodňovej ochrany v SR – technické a biotechnické opatrenia v povodiach. Zvolen: TU vo Zvolene, s. 15 – 25.

THORNE, C. R., TOVEY, N. K. 1981: Stability of Composite river banks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 6, pp. 469-484.

WILLIAMS, P. G. 1978: Bankfull discharge of rivers. *Water Resources Research*, 14, No 6, s. 1141-1154

WYNN, T., MOSTAGHIMI, S. 2006. The effect of vegetation and soil type on streambank erosion, Southwestern Virginia, USA. *Journal of the American Water Resources Association*, 42, pp. 69 – 82.

### **Pod'akovanie**

Príspevok vznikol s podporou Vedeckej grantovej agentúry MŠVVaŠ SR a SAV (VEGA) v súvislosti s riešením projektu č. 1/0918/12 Kvantifikácia a predikcia erózie na brehoch malých vodných tokov. Autorka vyslovuje GA pod'akovanie.

### **Kontakt:**

Ing. Mariana Jakubisová, PhD.

Arborétum Borová hora

Technická univerzita vo Zvolene

Borovianska cesta 2171/ 66



960 53 Zvolen,

Slovensko

tel.: +421 45 5320814, e-mail: [jakubisova@tuzvo.sk](mailto:jakubisova@tuzvo.sk)