

URČOVANIE OBJEMOV AKUMULÁCIÍ NA DNE BÝVALÝCH ĽADOVCOVÝCH DOLÍN POMOCOU METÓDY PRIEČNYCH PROFILOV VO VEĽKEJ A MALEJ STUDENEJ DOLINE VO VYSOKÝCH TATRÁCH

Miroslav Vích

*Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Katedra fyzickej
geografie a geookológie, e-mail: vich@fns.uniba.sk*

Abstract: This work deals with reconstruction of Velka and Mala Studena valley floors in the High Tatras without late glacial and Holocene accumulations, using cross sections and the determination of the volume of such accumulations. The method of cross sections consists of curve-fitting of real transects by mathematical function, in my case polynomial functions from second to fifth order. From such theoretical curves, theoretical valley floors (bedrocks) were modeled. Multiple methods were used for calculation of valley floor accumulations volume. The most probable calculated volume for Velka Studena valley is 41 652 890 m³. Mala Studena valley is represented by volume of 32 116 275 m³, which means 73 769 165 m³ for both valleys. In connection with the shape of some theoretical curves, range of volumes from 45 248 360 m³ to 73 769 165 m³ was also proposed. Because the modeled valley floors and calculated volumes were obtained only by GIS investigation, it would be desirable to perform also geophysical field measurements, which open possibilities for more precise estimation.

Key words: High Tatras; volume, cross section, accumulations, curve-fitting, polynomial function

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

V zahraničí sa, približne od 80. rokov minulého storočia, pomerne často používa kvantitatívne charakterizovanie priečných profilov dolín na určovanie genézy ľadovcových dolín, pri popise ich formy numerickými modelmi, ale aj na základné rozlišovanie typov ľadovcových dolín, charakteristických priečnym profilom v tvare písmena U, a dolín vytvorených inými (hlavne fluvialnymi) procesmi, pre ktoré je charakteristický priečný profil v tvare písmena V.

Priečne profily sa zvyknú bežne charakterizovať niekoľkými spôsobmi. Za najpoužívanejšie sa dajú považovať:

– mocninová funkcia (napríklad Aniya a Welch, 1981; Hirano a Aniya, 1988),

- kvadratická funkcia resp. polynomická funkcia určitého stupňa (napríklad Harbor a Wheeler, 1992) a
- ukazovateľ formy (form ratio), ktorý definoval Graf (1970).

Metódy hodnotenia priečných profilov sa prevažne používajú na kvantitatívne charakterizovanie ľadovcových údolí. Podľa Harbor a Wheeler (1992) je pritom hlavným nedostatkom používania matematických funkcií fakt, že holocénné akumulácie zakrývajú dno údolia a teda menia pôvodný ľadovcom vytvorený profil. Táto zdanlivá nevýhoda je však využitá v tejto práci, keď práve matematické funkcie slúžia pri modelovaní priebehu pevného podložia dna doliny (bedrock) a odčítaním úrovne podložia od súčasného dna dostaneme objem týchto prevažne holocénných akumulácií.

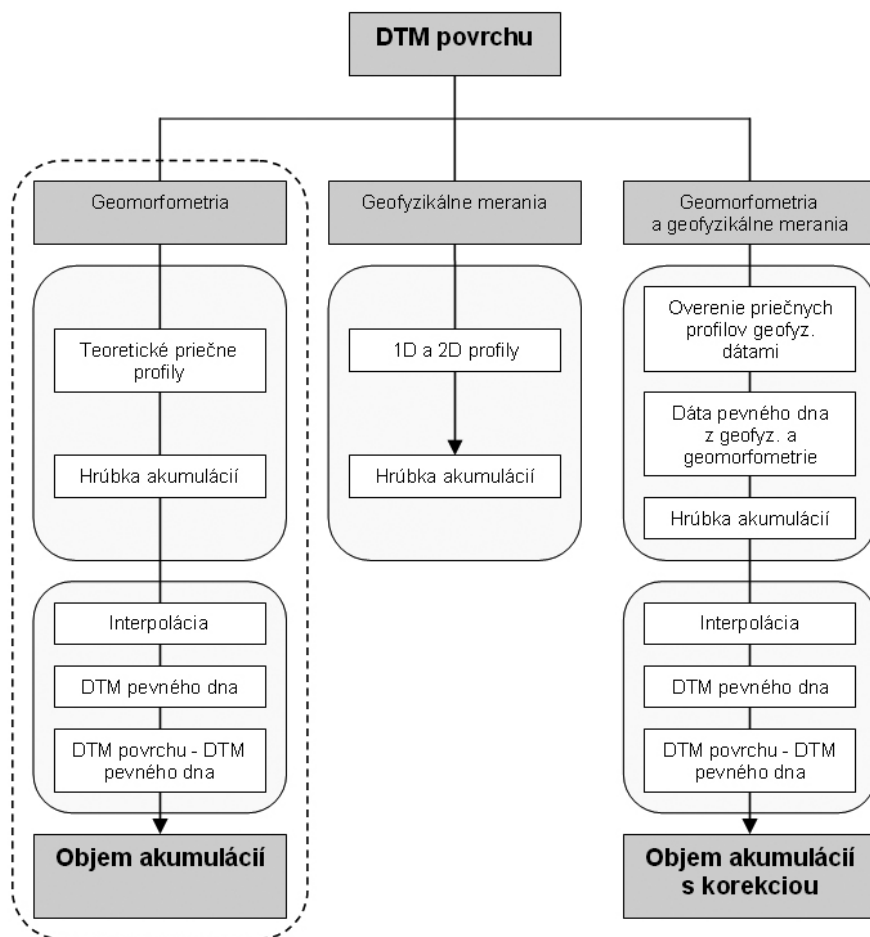
2 METODIKA

Metodický postup vychádza hlavne z práce Schrott et al., 2003, ktorý definuje dva základné kroky: najprv sa v teréne uskutoční podrobné geomorfologické mapovanie akumulačných foriem reliéfu (s využitím leteckých snímok) a geofyzikálne merania – priečne profily dolinami. Druhá, kabinetná časť spočíva v geomorfometrickej analýze priečných profilov v doline v prostredí GIS. Aproximácia dna pevného podložia matematickou funkciou, sa porovnáva a modifikuje pomocou dát získaných geofyzikálnymi meraniami. V tejto práci sa zaoberáme iba druhou časťou metodiky – geomorfometrickou analýzou priečných profilov, pričom kontrolné geofyzikálne merania sa v tejto lokalite plánujú uskutočniť v roku 2010. Geofyzikálne merania tak doplnia a spresnia matematicky vypočítané hĺbky akumulácií a tak bude možné vytvoriť ucelenejší a presnejší pohľad na objemy akumulácií v dolinách. Schéma postupu pre výpočet objemov obsahujúca aj plánované kontrolné geofyzikálne merania, je na obr. 1.

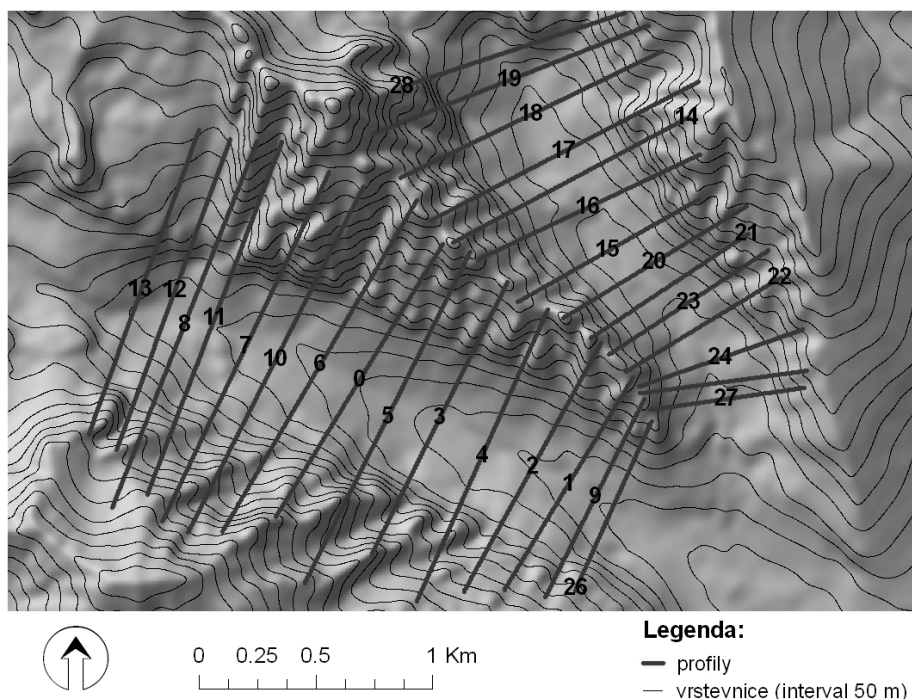
Dôležitým predpokladom na kvalitné modelovanie reliéfu pomocou GIS je dostupnosť digitálneho terénneho modelu ($DTM_{povrchu}$) s vysokým rozlíšením. V tejto práci bol použitý z fotogrametrických meraní odvodený grid s rozstupom bodov 15 m, z ktorého bol v prostredí GIS GRASS pomocou algoritmu spline vygenerovaný raster nadmorských výšok. Rovnaký algoritmus bol použitý aj neskôr pri generovaní rastrov DTM pevného podložia dna doliny ($DTM_{podkladu}$).

Ďalším krokom bolo určenie vhodných priečných profilov v dolinách (obr. 2). Podľa nášho názoru ide o jednu z najsúsubjektívnejších častí postupu. Subjektívnosť spočíva vo výbere začiatkových a koncových bodov profilov, keďže skalné steny sú často rozčlenené žľabmi a ryhami, ktoré môžu výrazne ovplyvniť tvar daného priečného profilu. Presnosť je tým menšia čím viac je orientácia žľabov odchýlená od priebehu profilu. Snažili sme sa preto vyberať miesta bez, prípadne iba s minimálne rozčleneným povrchom takýmito nerovnosťami. V Malej Studenej doline sa takýchto žľabov a rýh na skalných stenách nachádza menej (resp. žľabov a rýh s nevhodnou orientáciou v zmysle textu vyššie), preto je tu podľa nášho názoru výpočet reprezentatívnejší. Naopak vo Veľkej Studenej doline sú hlavne steny pod masívom

Slavkovského štítu výrazne rozčlenené žľabmi s približne severovýchodnou (na priebeh profilu šikmou) orientáciou a nebolo preto možné ideálne spojiť miesta zo stien Slavkovského štítu s miestami spod Prostredného hrebeňa, ktorého orientácia žľabov je mierne odlišná (približne juhojuhovýchod).



Obrázok 1 Schéma znázorňujúca metodický postup pre výpočet hrúbky a objemu akumulácií na dne dolín (prerušovanou čiarou je znázornená časť metodického postupu použitá v tejto práci), podľa Schrott et al. (2003)

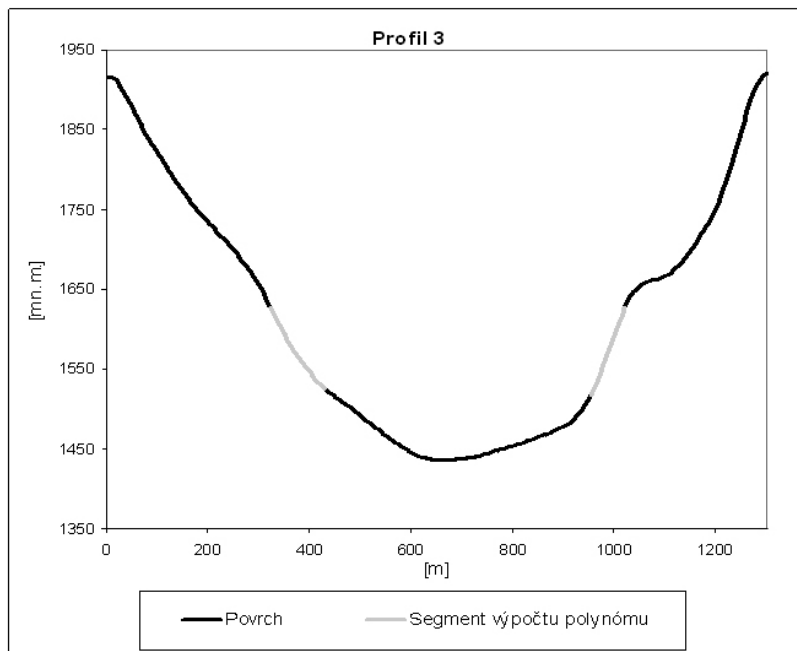


Obrázok 2 Vybrané priečne profily v trógoch Veľkej a Malej Studenej doliny
(DTM © Geodis Slovakia, s. r. o., www.geodis.sk)

Z línií profilov boli z rastra nadmorských výšok odobraté body, ktoré vytvorili samotný priečný profil, a ktoré ďalej vstupovali do výberu dvoch reprezentatívnych segmentov profilu použitých pre výpočet rovníc aproximačných polynómov. Segmenty predstavujú najstrmšiu časť výstupu skalného podložia nad okrajmi dna doliny, ktoré najlepšie reprezentujú neskoršou denudáciou neovplyvnený tvar pôvodného trógu. Dĺžka segmentu je rôzna a závisí od tvaru profilu. Ten vykazuje viacero „nerovností“ spôsobených jednak holocénnymi akumuláciami (morénami, úsypmi), ktorých objem sa pokúšame zistiť ale tiež visutými karmi, žľabmi, ryhami a inými stupňami v dolinách. Spravidla bola za reprezentatívny segment vybratá časť profilu nad spomínanými holocénnymi akumuláciami približne po najbližšie výraznejšie zmiernenie sklonu v smere nahor. Ukážky výberu reprezentatívnych segmentov sú na (obr. 3).

Po vybratí reprezentatívnych segmentov pre každý priečný profil boli pomocou nástrojov „curve-fitting tools“ programu Matlab R2008b počítané polynómy druhého až piateho stupňa (obr. 4). Polynómy boli vypočítané z reprezentatívnych segmentov každého priečného profilu. Ide tu o tzv. „curve-fitting“, teda o opísanie krivky (funkcie), ktorá čo najlepšie zodpovedá určitému počtu bodov. Na základe týchto

funkcií (a teda polynomických funkcií druhého až piateho stupňa) boli vypočítané nové teoretické priečne profily reprezentujúce tvar trógu bez sedimentárnej výplne.

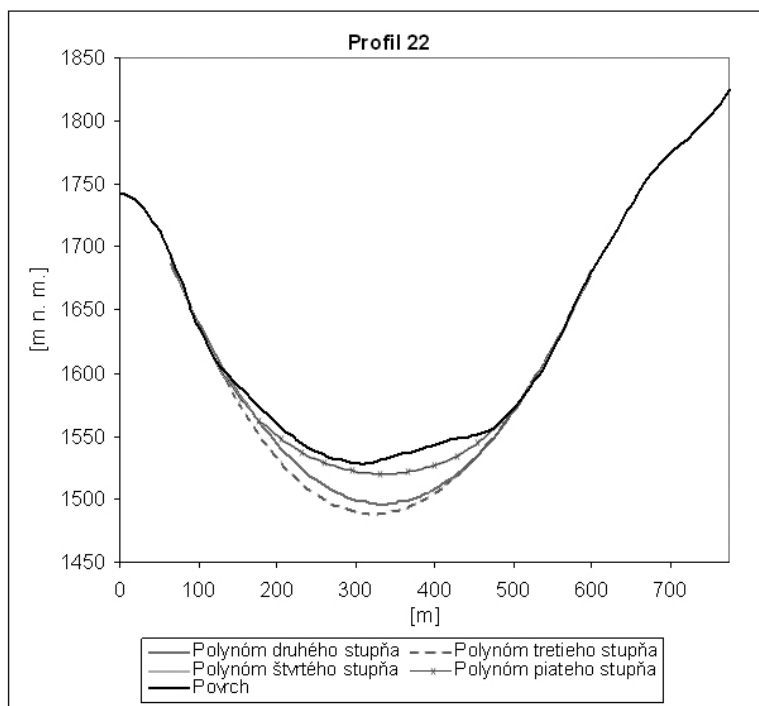


Obrázok 3 Ukážka výberu segmentu pre výpočet polynómu z priečného profilu 3

Pre aproximáciu výsledného pevného dna trógov sme použili ten z vypočítaných polynómov, ktorý pravdepodobne najviac zodpovedal skutočnému pevnému dnu (t. j. prechádzal v hĺbkach niekoľko desiatok až maximálne 150 m pod povrchom). Popri tomto výslednom (kombinovanom) teoretickom povrchu utvoreného z polynómov rôzneho stupňa sme počítali aj teoretické povrchy len z polynómov rovnakého stupňa, ktoré sa však nie vždy ukázali byť vhodné (miestami sa dostávali nad súčasný povrch a inde zase zasahovali do hĺbky až niekoľko 100 m pod povrchom), preto boli z analýz odobraté.

Po zhodnotení vhodnosti profilov do ďalších analýz tiež neboli vôbec započítavané profily 12, 13 a 28 (obr. 4). Tie sa nachádzajú v záveroch trógov, pričom v prípade profilov 12 a 13 sa koncový bod profilov nenachádza na skalných stenách ale už v kotlovej časti čím pochopiteľne dochádza k skresleniu profilov a preto takéto profily nemôžu byť použité na analýzu. V prípade profilu 28 sa síce koncový bod nachádza na skalných stenách, avšak jeho veľká časť prechádza cez kar a nie cez tróg ako by bolo potrebné, a preto bol tiež z ďalších analýz vylúčený. Odoberím týchto „koncových“ profilov zo záverov trógov sa však tiež odoberie možnosť pokryť kompletne celé plochy trógov. Treba však ale dodať, že tieto územia zo záve-

rov trógov majú len veľmi malú plochu a preto pri výpočte celého objemu trógov majú len nepatrnú váhu.



Obrázok 4 Priečný profil 22 s vypočítanými teoretickými krivkami

Na základe takto definovaných polynómov bol uskutočnený výpočet objemu. Najprv sme vypočítali objem metódou *jednoduchej segmentácie* – počítali sa čiastkové objemy „okolo“ každého profilu na základe vzťahu:

$$V_i = P_i \frac{(d_j + d_k)}{2} ,$$

kde V_i – čiastkový objem,

P_i – plocha medzi skutočným (povrchom) a teoretickým profilom (polynómom),

d_j – vzdialenosť medzi profilom [i] a nasledujúcim profilom,

d_k – vzdialenosť medzi profilom [i] a predchádzajúcim profilom.

Celkový objem trógu následne tvorí suma všetkých čiastkových objemov:

$$V = \sum V_i ,$$

kde V – celkový objem trógu,

V_i – čiastkové objemy okolo profilov.

Ako sme už uviedli, pre výpočet čiastkových objemov bolo potrebné vypočítať plochu medzi skutočným profilom (povrchom) a teoretickým profilom (polynómom). Výpočet sme rovnako uskutočnili v programe Matlab R2008b pomocou príkazu „trapz“ (trapezoidal numerical integration). Tento príkaz vypočíta plochu pod ľubovoľnou krivkou. Vypočítali sme plochu pod skutočným profilom a pod teoretickým profilom, pričom výslednú plochu medzi skutočným a teoretickým profilom sme dostali ich odčítaním. Pre zmiernenie chyby, ktorá vzniká „odrezaním“ trógov profilmi pred ich skutočným koncom sme sa rozhodli pre objemy koncových profilov trógov počítať so vzdialenosťou d_i rovnou d_k .

Objem akumulácií sme vypočítali tiež druhým spôsobom, pomocou algoritmu „cut/fill“. Ide o algoritmus programu *ArcGis 9.1.*, pri ktorom od seba odčítame dva rastre (v našom prípade DTM_{povrchu} a DTM_{podkladu}). Pričom DTM_{podkladu} predstavovali rastre vytvorené pomocou algoritmu spline z vybraných polynómov určitého stupňa. Algoritmus cut/fill nám určí zhodné plochy a plochy nad resp. pod východiskovým rastrom, pričom vypočíta aj objem medzi oboma rastrami. Tento postup sme uplatnili tiež pri vytváraní obrázkov hĺbok akumulácií, pričom sme počítali iba s hodnotami pevného dna (t. j. nepočítali sme objemy pre povrchy samostatných polynómov).

3 VÝSLEDKY

Objem hmoty medzi pevným dnom (kombinovaným výsledným povrchom) a skutočným povrchom vypočítaný metódou jednoduché segmentácie je pre tróg Veľkej Studenej doliny $41\,652\,890\text{ m}^3$, pre tróg Malej Studenej doliny $32\,116\,275\text{ m}^3$, čo spolu predstavuje $73\,769\,165\text{ m}^3$ hmoty pre obidva trógy (tab. 1). Objem hmoty medzi pevným dnom a skutočným povrchom pomocou algoritmu cut/fill je pre tróg Veľkej Studenej doliny $37\,767\,631\text{ m}^3$, pre tróg Malej Studenej doliny $27\,212\,628\text{ m}^3$, čo spolu predstavuje $64\,980\,259\text{ m}^3$ hmoty pre obidva trógy. Tieto hodnoty sú si veľmi podobné, čo svojím spôsobom verifikuje obidve metódy. Hodnoty podľa cut/fill sú ale v porovnaní s hodnotami vypočítanými jednoduchou segmentáciou o niečo nižšie, čo môže byť spôsobené práve zmiernením chyby koncových profilov trógov pri výpočte jednoduchou segmentáciou. Za primárne preto považujeme hodnoty vypočítané jednoduchou segmentáciou. Objemy medzi skutočným povrchom a teoretickými povrchmi jednotlivých polynómov, sú uvádzané s úpravami (eliminácia nevhodných polynómov) ako aj bez týchto úprav. Hodnoty sú v niektorých prípadoch výrazne odlišné. Pri polynómoch s nižším stupňom (2. a 3.) dochádzalo často k neprirodzene hlbokým teoretickým profilom, ktoré boli odobraté čím sú hodnoty „objemov bez úprav“ skôr vyššie ako „objemy s úpravami“. Pri vyšších stupňoch polynómov (4. a 5.) je skôr tendencia opačná, keďže tu sa často vyskytovali teoretické profily, ktoré boli skoro totožné so skutočným povrchom pričom po ich odobratí vychádzajú „objemy bez úprav“ skôr nižšie ako „objemy s úpravami“. Na rastroch znázorňujúcich hĺbku akumulácií v trógoch Veľkej a Malej Studenej doliny (obr. 5) a (obr. 6) je dobre viditeľný fakt, že aj napriek kombináciám rôznych stupňov polynómov pre výsledné pevné dno dochádza pravdepo-

dobne k neprirodzeným zníženiam v niektorých častiach (aj napriek tomu, že pozdĺžny profil trógu zrejme má stupňovitý profil aj pod akumuláciami, čo asi vytvára niektoré zníženie). Sú to miesta kde je tiež najvhodnejšie vybrať polynóm určitého stupňa pravdepodobne príliš „hlboký“ na to aby zobrazil skutočné pevné dno. Bez geofyzikálnych meraní, ktoré by mohli spresniť a potvrdiť správnosť meraní, je však diskusia na túto tému v čisto hypotetickej rovine.

Tabuľka 1 Výsledné objemy hmoty v m³ medzi skutočným povrchom a teoretickými povrchmi

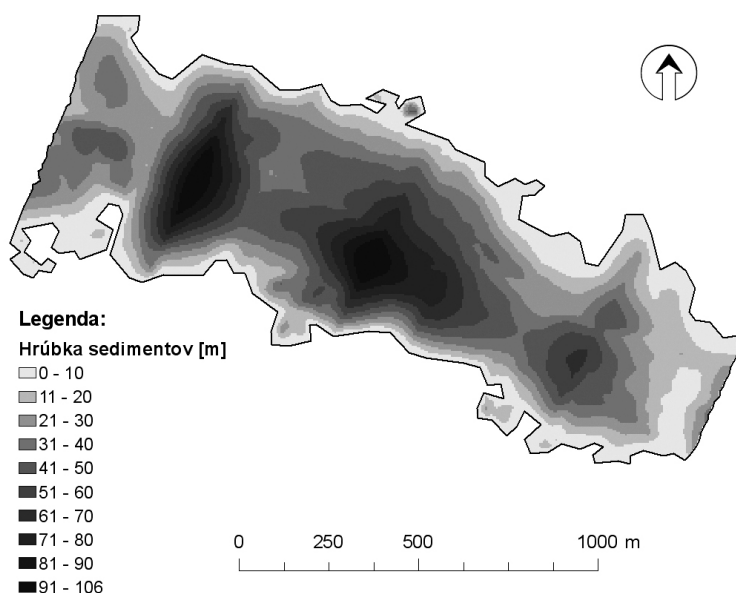
Oblasť / Spôsob výpočtu (stupeň polynómu)	Výsledný (Kombinovaný) Jednoduchá segmentácia	Výsledný (Kombinovaný) Cut/fill	2	3	4	5
			2 – bez úprav	3 – bez úprav	4 – bez úprav	5 – bez úprav
Veľká Studená dolina	41 652 890	37 767 631	33 512 000	39 547 525	20 902 190	32152020
			41 828 700	42 470 225	10 481 885	17938145
Malá Studená dolina	32 116 275	27 212 628	25 790 655	27 807 260	24 346 170	23454015
			29 726 480	41 862 110	16 282 455	17471345
Spolu	73 769 165	64 980 259	59 302 655	67 354 785	45 248 360	55606035
			71 555 180	84 332 335	26 764 340	35409490

Z uvedených dôvodov by sa tiež dalo uvažovať o nezapočítavaní niektorých profilov do výsledného výpočtu objemu ako sme to urobili v prípade teoretických povrchov vytvorených z rovnakých stupňov polynómu. Takýto postup však pri porovnaní s niektorými prácami, ktoré používali metódu priečnych profilov na výpočet objemu doliny nie je bežný a stupeň subjektivity by ešte vzrástol.

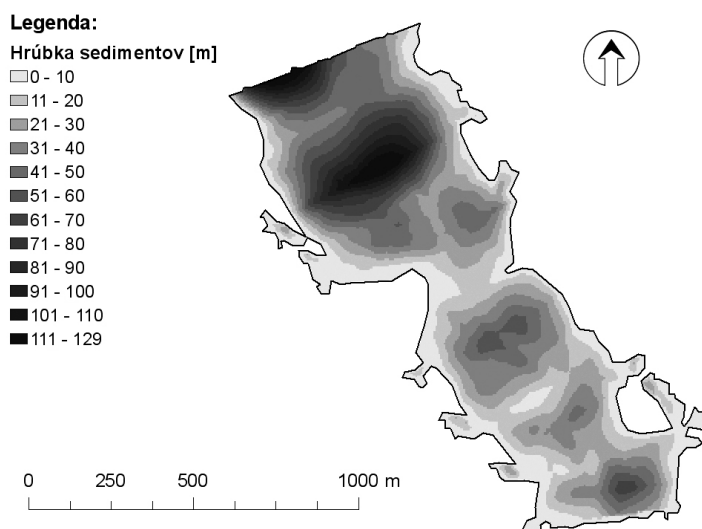
V súvislosti s vyššie uvedenými neurčitostami by sme preto mali uvažovať skôr o určitom rozpätí objemov, než hľadať jedinú konkrétnu hodnotu. V takom prípade by sme za najnižšiu pravdepodobnú hodnotu pre obidva trógy spolu považovali hodnotu 45 248 360 m³, ktorá predstavuje objem medzi skutočným povrchom a povrchom vytvoreným z polynómov 4. stupňa, z ktorých boli odobraté „nevhodné“ polynómy. Za najvyššiu pravdepodobnú hodnotu by v takom prípade potom mohla byť považovaná hodnota 73 769 165 m³. Objem medzi skutočným povrchom a povrchom vytvoreným z polynómov 3. stupňa síce dosahuje vyššiu hodnotu avšak takto vytvorený povrch už nepovažujeme za prirodzený.

Lukniš (1973) vypočítal objem úsypov v dolinách na 46 660 000 m³, avšak vzhľadom na spôsob výpočtu (autor počítal iba objem úsypov veľmi jednoduchými metódami) tieto hodnoty nemôžeme priamo porovnať. Aj napriek tomu je však táto hodnota aspoň rádo podobná nami vypočítanej hodnote, čo určite pokladáme za ďalší verifikačný moment.

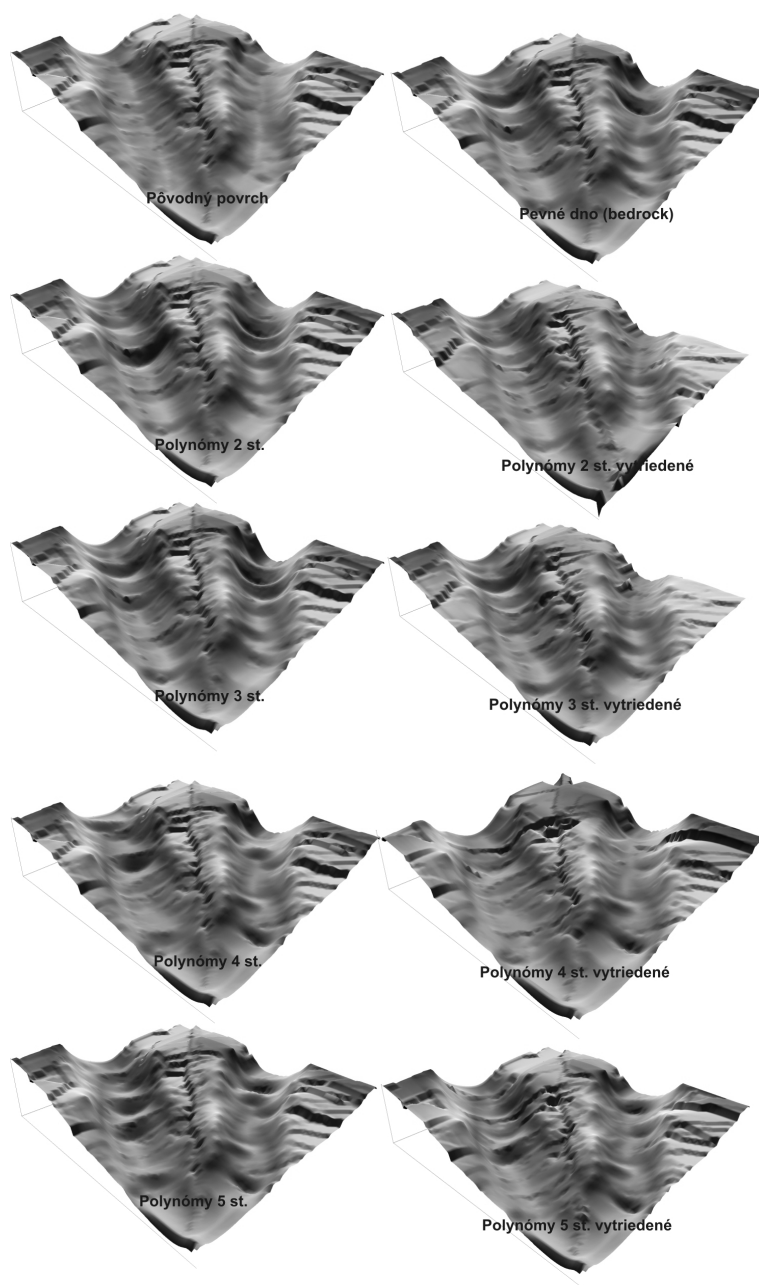
Pre lepšiu ilustráciu rozdielov medzi jednotlivými povrchmi vytvorenými polynómami rôznych stupňov „bez úprav“ a „s úpravami“ (vytriedené) a taktiež hlavného pevného dna sme vytvorili tiež ich 3D modely (obr. 7).



Obrázok 5 Hĺbka akumulácií v trógu Veľkej Studenej doliny (DTM © Geodis Slovakia, s. r. o., www.geodis.sk)



Obrázok 6 Hĺbka akumulácií v trógu Malej Studenej doliny (DTM © Geodis Slovakia, s. r. o., www.geodis.sk)



Obrázok 7 3D modely skutočného povrchu a teoretických vypočítaných povrchov trôgov Studených dolín (DTM © Geodis Slovakia, s. r. o., www.geodis.sk)

4 ZÁVER

Výskumu bývalých ľadovcových dolín sa v minulosti na Slovensku venovala dostatočná pozornosť, avšak vzhľadom na obdobie, v ktorom zväčša práce vznikali sú už v dnešnej dobe čiastočne zastarané. Popri mnohých iných charakteristikách sa pri ľadovcových dolinách skúmali a skúmajú takisto niektoré kvantitatívne charakteristiky medzi, ktoré patrí aj objem jednotlivých ľadovcových akumulácií, akými sú napríklad morény, prípadne tiež objemy holocénných akumulácií a teda foriem, ktoré vznikli po ústupe ľadovca z dolín.

Hlavným cieľom práce bolo pokúsiť sa určiť úroveň dna doliny bez holocénného resp. neskoro-glaciálneho pokryvu a vypočítať objem takéhoto pokryvu. Pri práci sme využili metodický postup, ktorý vypracovali Schrott et al. (2003), resp. časť postupu, ktorá využíva vo svete zaužívanú metódu priečných profilov.

Podarilo sa nám odhadnúť niekoľko hodnôt objemu akumulácií na dne dolín s rôznou subjektívnou mierou presnosti. Keďže sa ale jedná iba o časť postupu, ktorá musí byť spresnená geofyzikálnymi meraniami je vhodné v budúcnosti v tomto výskume pokračovať a spresniť tieto kabinetne získané odhady.

Podakovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. ESF-EC-0006-07.

Literatúra

- ANIYA, M., WELCH, R., 1981. Morphological analyses of glacial valleys and estimates of sediment thickness on the valley floor: Victoria Valley system, Antarctica. In *The Antarctic Record*, 1981, vol. 71, p. 76-95.
- BROOK, M. S., KIRKBRIDE, M. P., BROCK, B. W., 2008. Temporal constraints on glacial valley cross-profile evolution: Two Thumb Range, central Southern Alps, New Zealand. In *Geomorphology*, 2008, vol. 97, issues 1-2, p. 24-34.
- GRAF, W. L., 1970. The geomorphology of the glacial valley cross-section. In *Arctic and Alpine Research*, 1970, vol. 2, p. 303-312.
- GREENWOOD, M. C., HUMPREY, N., 2002. Glaciated Valley Profiles: An Application of Nonlinear Regression. In *Computing Science and Statistics*, 2002, vol. 34, p. 452-460. Dostupné na internete: <<http://www.interfacesymposia.org/I02/I2002Proceedings/GreenwoodMark/GreenwoodMark.paper.pdf>>
- HARBOR, J. M., WHEELER, D. A., 1992. On the mathematical description of glaciated valley cross-sections. In *Earth Surface Processes and Landforms*, 1992, vol. 17, issue 5, p. 477-485.
- HIRANO, M., ANIYA, M., 1988. A rational explanation of cross-profile morphology for glacial valleys and of glacial valley development. In *Earth Surface Processes and Landforms*, 1988, vol. 13, issue 8, 707-716.
- LUKNIŠ, M. 1973. *Reliéf Vysokých Tatier a ich predpolia*. Bratislava : Veda SAV, 1973, s. 19-319.
- SCHROTT, L., HUFSCHMIDT, G., HANKAMMER, M., HOFFMANN, T., DIKAU, R., 2003. Spatial distribution of sediment storage types and quantification of valley fill deposits

in an alpine basin, Reintal, Bavarian Alps, Germany. In *Geomorphology*, 2003, vol. 55, issues 1-4, p. 45-63.

Sediments volume calculation of former glacial valleys using method of cross sections in Velka and Mala Studena valley (High Tatras – Slovakia)

Summary

Main purposes of this work were to reconstruct valley floors of Velka and Mala Studena valley in the High Tatras without late glacial and holocene accumulations and to determinate volume of such accumulations. Velka and Mala Studena valley represent typical U-shaped valleys previously formed by glaciers. Practically the whole valleys consist of granite rocks and late glacial and Holocene accumulations (e. g. talus sheets, rockfall deposits, debris cones and some moraines) occur mostly in the glacial through of the valleys.

For the modeling of theoretical valley floor (bedrock), method of cross sections which consists of curve-fitting of real transects by mathematical function, in my case polynomial functions from second to fifth order, was used. Some other methods of curve-fitting using other functions (e. g. power law or form ratio) are presented in the first sections of this work but polynomial functions are mostly used for such modeling. Curve-fitting was always based on the first oversteepening rock wall segment. It prevent from covering late glacial and Holocene accumulations to polynomial estimations. Theoretical valley floors were modeled from such polynomials with different order to model moderate valley floors.

Two different methods were used to calculate valley floor accumulations volume. The first method was based on the simple mathematical formula and the second was based on the subtraction of two different raster maps (current surface and theoretical surface) using GIS. Both methods brought similar results but as the most probable calculated volume is considered volume which was calculated using mathematical formula. For Velka Studena valley was estimated to $41\,652\,890\text{ m}^3$ and for Mala Studena valley to $32\,116\,275\text{ m}^3$, which means $73\,769\,165\text{ m}^3$ for both valleys. In connection with the improper shape of some theoretical curves (some very deep or very shallow curves), range of volumes from $45\,248\,360\text{ m}^3$ to $73\,769\,165\text{ m}^3$ was also proposed.