



Obr. 1. Snímkování erozní rýhy pomocí bezpilotního letadla
Fig. 1. Photographing of the erosion rill with unmanned aircraft

Stanovení odnosu půdy z rýhové eroze metodou digitální fotogrammetrie a metodou volumetrické kvantifikace

JANA UHROVÁ, RADEK BACHAN, PAVLA ŠTĚPÁNKOVÁ

Klíčová slova: digitální fotogrammetrie – volumetrická kvantifikace – rýhová eroze – digitální model terénu – bezpilotní letecké prostředky – odnos půdy

SOUHRN

Článek představuje dvě rozdílné metody měření rýhové eroze, která patří k častým důsledkům extrémních srážkových úhrnů. Na vybrané lokalitě, postižené výraznou rýhovou erozí, byly pomocí volumetrické kvantifikace a blízké fotogrammetrie zdokumentovány projevy eroze způsobené přívalovými srážkami. Volumetrická kvantifikace je metodou přímého měření terénu. Pomocí speciálního zařízení – erodoměru – jsou ve vybraných místech zaměřeny příčné profily průběhu terénu, na základě kterých je pak vypočítána celková hodnota rýhové eroze. Metody blízké fotogrammetrie jsou založeny na snímkování zájmové lokality pomocí bezpilotního letadla. Pořízené fotografie následně slouží k vytvoření digitálního modelu terénu (DMT), jeho analýzou je poté zjištěn objem erodovaného materiálu. Srovnání těchto postupů pak proběhlo s využitím příčných řezů terénem vyneseným fotogrammetrií v místech fyzického měření erodoměrem.

ÚVOD

Rýhová eroze patří v našich podmínkách k rozšířenému typu poškození půdy. Tento typ vodní výmolvé eroze ohrožuje zejména svažitě zemědělské pozemky. Míra ohrožení stoupá, pokud je povrch půdy bez vegetačního pokryvu, případně s výsadbou širokořádkových plodin (kukuřice, řepa, brambory apod.). Spouštěčem rýhové eroze bývá nejčastěji přívalový déšť. Srážky nejprve odtékají po povrchu, následně se soustřeďují do jednotlivých rýh a celá situace může vyústit v soustředěný odtok vody. Při tomto jevu dochází k odnosu nejméně částí půdy a poškození daného zemědělského pozemku, případně i odnosu sadby.

Kvantifikace odnesené půdy slouží ke stanovení přímých škod způsobených na pozemku, kdy vlivem eroze dochází k odstraňování úrodné orniční vrstvy a tím ke snižování produkční schopnosti půdy. Zhoršují se její fyzikální, biologické ale i chemické vlastnosti půdy [1].

Měření eroze půdy je možné provádět pomocí volumetrické kvantifikace s využitím tzv. erodoměru – přístroje pro záznam průběhu povrchu půdy ve vybraném profilu. Toto zařízení bylo nejprve využito pro stanovení ztráty půdy, ke které došlo při těžbě dřeva [2]. Dále byl erodoměr používán v různých modifikacích. Například v hornatých oblastech Blaney a Warrington [3] pracovali s erodoměrem, který zaměřoval pouze deset bodů pro jeden příčný profil. V České republice začal erodoměr pro stanovení objemu odnesené půdy využívat tým v Ústavu vodního hospodářství krajiny Fakulty stavební VUT v Brně pod vedením profesora Dumbrovského [4, 5], kde stále probíhá vývoj přístroje i postupů zaznamenávání a vyhodnocení erozních odnosů půdy při rýhové erozi.

Nepřímou metodu stanovení objemu eroze představují bezpilotní letecké prostředky (UAV), které mohou být používány k dálkovému průzkumu Země (DPZ) a umožňují sledování objektů a zemského povrchu bez přímého fyzického kontaktu [6]. UAV v dnešní době umožňují přesné, rychlé a relativně levné podklady pro vyhodnocení eroze na zemědělských plochách. Díky metodám fotogrammetrie a SfM (Structure from Motion) je možné zpracovat sadu neuspořádaných a různě se překrývajících snímků a rekonstruovat tak trojrozměrné modely, ze kterých lze následně měřit parametry erozních rýh (hloubka, šířka, délka) a stanovit objem odnesené půdy či vytvářet 3D modely současného i původního terénu. Metodami SfM se podrobně ve své práci zabývá například Westoby a kol. [7].

UAV byly pro monitoring časových změn půdního povrchu a intenzity eroze půdy využity např. v letech 2012 a 2013 Eltnerovou a kol. [8]. Další studie od Pierzchala [9] využila snímkování pomocí bezpilotních letadel ke sledování objemu přemístěné zeminy při těžbě dřeva. V České republice se pak na výzkum erozního poškození půd pomocí metod DPZ zaměřuje ve své práci Vláčilová a Krása [10]. V současnosti se pak optimalizací monitoringu eroze zemědělské půdy a postupy kvantifikace erodovaného materiálu s využitím bezpilotních letadel zabývá například Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství ČVUT v Praze ve spolupráci s Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půdy, v. v. i., a Českým hydrometeorologickým ústavem v projektu s názvem Vývoj automatizovaného nástroje pro optimalizaci monitoringu eroze zemědělské půdy pomocí distančních metod.

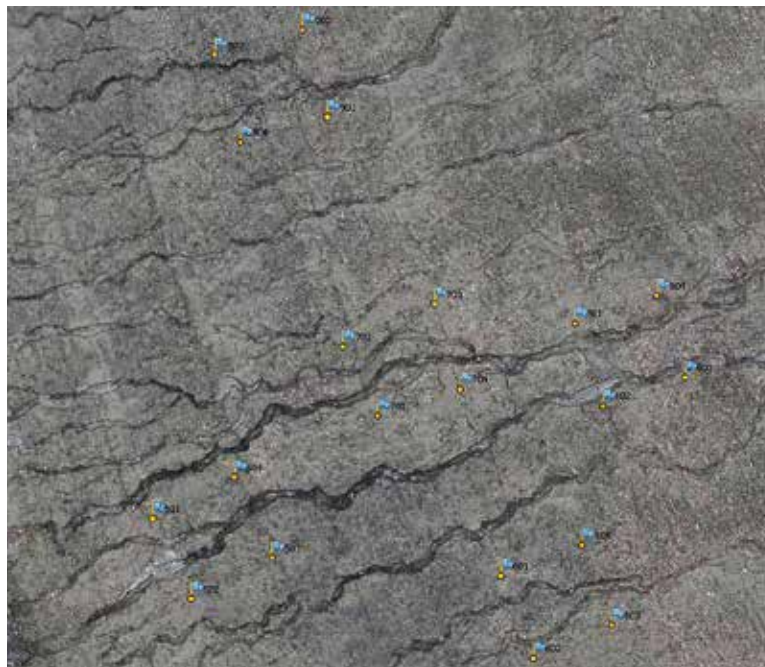
Brněnské pracoviště Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka, v. v. i., provádí výzkum v oblasti možného stanovení míry odnosu erodovaného materiálu ze zemědělsky využívaných ploch pomocí metod digitální fotogrammetrie a volumetrické kvantifikace s následným porovnáním získaných výsledků. Tento příspěvek popisuje první výsledky záznamu rýhové eroze a jejího vyhodnocení pomocí výstupů dvou výše uvedených metod na vybrané pilotní lokalitě.

MATERIÁLY A METODY HODNOCENÍ

Metody digitální fotogrammetrie

K měření rýhové eroze pomocí bezpilotního letadla se využívá metody blízké fotogrammetrie. Vlastní postup se skládá ze snímkování povrchu terénu, následného zpracování pořízených snímků a vytvoření podrobného digitálního modelu terénu, ze kterého se provede výpočet objemu odnesené půdy [11].

Snímkovaná zájmová oblast musí být před vlastním vzletem bezpilotního letadla (obr. 1) vyznačena vlíčovacími body (obr. 2), které je nezbytné přesně polohově zaměřit pomocí geodetických přístrojů. Naměřené souřadnice vlíčovacích bodů a jejich nadmořské výšky slouží k případné korekci nepřesností vlastních snímků a ke georeferencování vytvářeného modelu terénu. U pořízených snímků terénu je nezbytný překryv z 60–80 %. Jen tak je zabezpečeno bezproblémové spojení získaných fotografií, které usnadní další dílčí zpracování dat a zvýší přesnost konečného výsledku.



Obr. 2. Zájmová lokalita s vyznačenými vlíčovacími body
Fig. 2. The location of interest with marked ground control points

Po práci v terénu následuje již vlastní zpracování snímků metodou SfM pomocí specializovaného softwaru (např. Agisoft PhotoScan Professional). Program je schopen identifikovat polohy, směry a náklony fotoaparátu umístěného na bezpilotním letadle [12]. Výstupem jsou data ve formátu ASCII nebo bodová vrstva s XYZ souřadnicemi, které je možné dále zpracovávat v prostředích GIS. Zde lze zvolit ideální velikost rozlišení modelu, který se pro samotné zpracování může stát zásadním. Samotný výpočet objemu erozních rýh je pak založen na stanovení objemu prostoru mezi teoretickým původním terémem a terémem po odnosu půdy, který byl zaměřen bezpilotním letadlem a následně vymodelován. Podobnými postupy a využitím UAV při kvantifikaci objemů erodovaného materiálu se věnuje ve své publikaci Glendell a kol. [13].

Metoda přímé volumetrické kvantifikace

Volumetrická kvantifikace rýhové eroze na ploše pozemku představuje metodu přímého měření průběhu terénu. Pro jeho zaznamenání je využíván erodoměr – zařízení umožňující zaměření příčného profilu průběhu terénu. Použitý typ měřicího zařízení byl vyvinut v Ústavu vodního hospodářství krajiny Fakulty stavební VUT v Brně [4]. Při kvantifikaci rýhové eroze se záznam průběhu terénu provádí ve čtvercovém rámu o rozměru 2 × 2 m (obr. 3), v němž je vyneseno pět profilů v celé šířce čtvercového pole v pravidelných vzdálenostech (cca 0,33 m). Čtvercový rám s erodoměrem je umísťován na erozi zasažený svah. Povrch půdy vyznačují jehlice v celé šířce erodoměru (1 m), jejichž horní části po spuštění na terén kopírují průběh povrchu půdy. Ten je zdokumentován pomocí fotoaparátu a převeden do digitální podoby ve formě grafu, který dále slouží ke stanovení objemu erozních rýh [5].

Vyhodnocení erozního odnosu na pilotní lokalitě Šardice

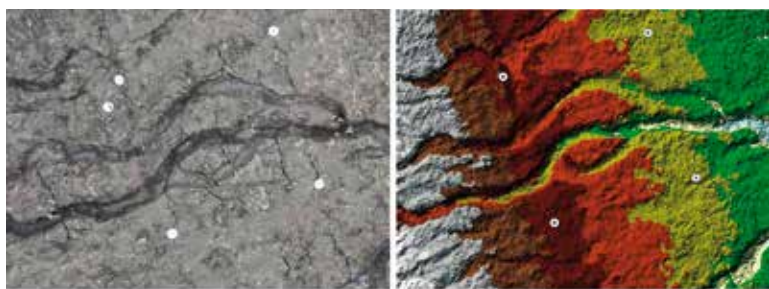
Katastr obce Šardice (okres Hodonín) byl v únoru 2017 postižen erozí z náhlého tání sněhu, kdy vznikly poměrně výrazné souběžné erozní rýhy. Lokalita se nacházela jižně od intravilánu obce nad Šardickým potokem s půdami o hlavní



Obr. 3. Záznam průběhu terénu pomocí erodoměru s využitím čtvercového pole
Fig. 3. Record the terrain course using the soil erosion bridge with the use of a square field

půdní jednotce (HPJ) 08, popsané jako černozemě modální a černozemě pelické, hnědozemě, luvizemě, popř. i kambizemě luvické, smyté. Následky eroze byly dokumentovány jak přímou metodou volumetrické kvantifikace (erodoměr), tak i s využitím blízké fotogrammetrie (UAV).

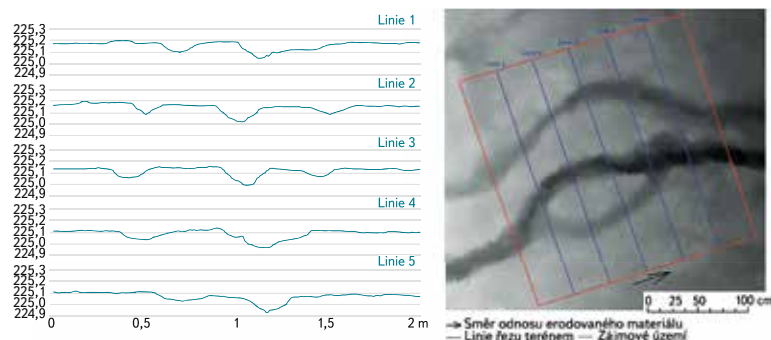
Nejprve bylo metodou přímého měření zaznamenáno 25 příčných profilů erozních rýh – v pěti čtvcích (2×2 m) rozmístěných tak, aby zachytily výrazné projevy rýhové eroze. Vlíčovacími body pro snímkování pomocí UAV byla jednak vymezena zájmová oblast, ale také i vrcholy jednotlivých měřicích čtvců pro volumetrickou metodu (obr. 4). Na základě terénního průzkumu, velikosti snímaného území a požadované přesnosti výsledků byla pro pilotní lokalitu optimální výška letu stanovena na 10 m nad terénem. Z pořízených snímků byl vytvořen DMT povrchu půdy a v místech, kde probíhalo přímé měření pomocí erodoměru, byly vytvořeny příčné řezy DMT pro následné porovnání. V případě pilotní lokality byla velikost pixelu modelu DMT určena na velikost 1 cm, tato vzdálenost odpovídá rozlišení při metodě volumetrické kvantifikace.



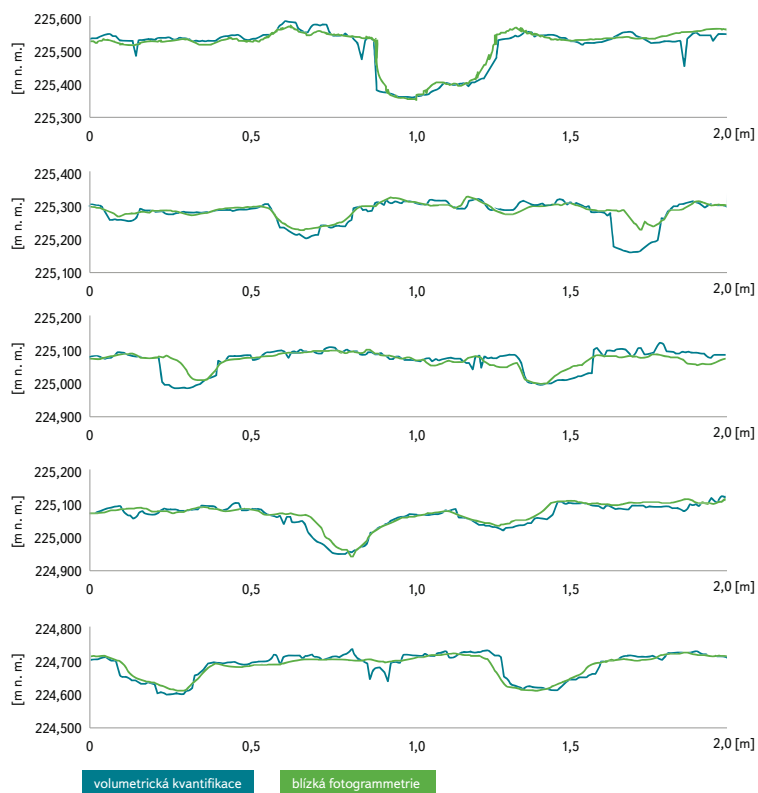
Obr. 4. Ortofoto snímek a DMT erozních rýh s vličovacími body pro jeden ze čtvců měřených erodoměrem
Fig. 4. Ortofoto image and DMT erosion rill with ground control points for one of the squares measured by a soil erosion bridge

VÝSLEDKY A DISKUSE

Základním výstupem volumetrické metody je záznam jednotlivých příčných profilů erozních rýh (obr. 5). Pro srovnání obou metod bylo nezbytné vynést z fotogrammetrických výstupů shodné příčné profily (umístění, rozsah). Srovnání výstupů získaných oběma metodami ukazuje dobrou shodu v průběhu těchto linií (obr. 6). Z jednotlivých příčných profilů je zřejmé, že výsledky získané metodou blízké fotogrammetrie shlazují do určité míry tvar terénu, a to především v případě kolmých stěn erozních zářezů.



Obr. 5. Příčné profily erozních rýh získané pomocí erodoměru
Fig. 5. Cross profile of erosion rills obtained by using a soil erosion bridge



Obr. 6. Srovnání příčných profilů erozních rýh získaných pomocí volumetrické kvantifikace (erodoměr) a bezpilotního letadla (blízká fotogrammetrie)
Fig. 6. Comparison of transverse profiles of erosion rills obtained by volumetric quantification (soil erosion bridge) and unmanned aircraft (close-up photogrammetry)

Dosavadní zkušenosti uváděné v literatuře předpokládaly, že odhad objemu erodovaného materiálu měřeného přímou metodou pomocí erodoměru bude až dvojnásobný ve srovnání s postupy blízké fotogrammetrie (bezpilotní letadlo) [10]. První srovnání výstupů z pilotní lokality v Šardicích tyto předpoklady nepotvrzují, průběh příčných profilů ve čtyřech z pěti měřených čtvců vykazují dobrou shodu. K vynesným řezům byl pro prvotní stanovení odnosu ze čtvců při hodnocení volumetrické kvantifikace vynes řez z digitálního modelu reliéfu ČR 5. generace [14]. Následný odnos ze čtverce byl stanoven rozdílem ploch v profilech přepočtených na plochu. Odhad objemu erodovaného materiálu při blízké fotogrammetrii byl stanoven přímo pro plochu každého čtverce, jako rozdíl dvou DMT. První výpočty odnosu uvádí *tabulka 1*. Z tabulky vyplývají u 4 z 5 čtvců minimální rozdíly při srovnání výsledků stanoveného odnosu půdy. Významnost shody obou metod bude následně

Tabulka 1. Hodnoty průměrné ztráty půdy z profilů vynesených terénem v absolutních hodnotách v m³ pro jednotlivé čtverce
Table 1. Average soil loss values from terrain profiles in absolute values in m³

	čtverec A	čtverec B	čtverec C	čtverec D	čtverec E
blízká fotogrammetrie	0,1239	0,0522	0,1312	0,1579	0,1393
volumetrická kvantifikace	0,1589	0,1261	0,1784	0,1403	0,1406

stanovena obvyklými statistickými metodami a další kroky výzkumu povedou k hledání postupů ke zpřesnění vyčíslení objemu odneseného materiálu oběma metodami.

První srovnání výstupů obou metodik tak ukazuje, že postupy založené na leteckém snímání mohou být považovány za rovnocenné přímým metodám. Pro jejich širší uplatnění hovoří také, že poskytují spojitý obraz erozní rýhy v celém jejím průběhu. Je třeba mít na paměti shlazování kolmých stěn erozních zářezů při tvorbě digitálního modelu terénu z orotofoto snímků. Nicméně i metoda volumetrické kvantifikace má svá omezení, kdy může docházet ke zkreslení reálných hodnot při zaznamenávání průběhu terénu pomocí fotoaparátu a jeho následnou interpretaci. Navíc její pracnost a časová náročnost omezuje počet prováděných měření. Podrobné srovnání pozitiv a negativ obou metod je uvedeno v tabulce 2. Další práce v této oblasti budou zaměřeny na možnosti stanovení celkového objemu erodované půdy. Pro obě metody je třeba vyřešit stanovení základní roviny povrchu výchozího terénu před erozní událostí, a to jak její celkový průběh, tak také její vertikální umístění v získaných řezech terénu s projevem eroze.

Tabulka 2. Srovnání výhod a nevýhod jednotlivých stanovení
Table 2. Comparison of advantages and disadvantages of individual determinations

Volumetrická kvantifikace		Digitální fotogrammetrie	
+	-	+	-
Velmi přesný záznam příčného profilu erozní rýhy	Nezbytné technické vybavení s náročnou manipulací	Za relativně krátkou dobu je možné zaznamenat průběh eroze na velké ploše	Nezbytné finančně náročné technické vybavení a potřeba proškoleného pilota
	Průměrování hodnot objemu eroze na základě několika příčných profilů pro celou délku erozní rýhy	Možnost relativně přesného zpracování velkých oblastí postižených erozí	Shlazování kolmých hran erozních rýh
	S rostoucím prostorovým rozsahem eroze klesá přesnost vyhodnocení (průměrování hodnot)	Výstupy ve formě spojitě informace	Větší závislost na povětrnostních podmínkách (nelze při dešti a silnějším větru)

V současné době jsou za účelem stanovení průběhu původního terénu ověřovány možnosti využití digitálního modelu reliéfu ČR 5. generace [14], a to jak v jednotlivých příčných profilech, tak i na celkové ploše pozemku. Další možností, jak stanovit průběh původního povrchu terénu, je zaměření pozemku po zapravení erozních projevů zemědělskou technikou pomocí digitální fotogrammetrie.

ZÁVĚR

Erozní procesy mají za následek odstraňování úrodné orní vrstvy a tím i snižování produkční schopnosti půdy. Stanovení objemu odneseného materiálu představuje jednu z možností vyčíslení přímých škod způsobených na pozemku. Pro stanovení objemu odnesené půdy je možné využít jak přímou volumetrickou metodu pomocí erodoměru, tak také i metody blízké fotogrammetrie pomocí bezpilotního letadla (UAV).

Na pilotní lokalitě v katastrálním území obce Šardice (okres Hodonín) byly pomocí obou uvedených metod zaznamenány projevy eroze z tání sněhu v roce 2017. Hlavním cílem bylo posouzení přesnosti výstupů získaných metodou blízké fotogrammetrie ve srovnání s výstupy z měření erodoměrem. Srovnání prvních výsledků ukázalo, že metody blízké fotogrammetrie poskytují srovnatelné výstupy (průběh příčných profilů terénu) jako záznam erodoměrem. V dalších krocích budou hledány postupy pro zpřesnění stanovení objemu odneseného materiálu pomocí obou metod. Pokud by se prokázalo, že metody blízké fotogrammetrie poskytují dostatečně spolehlivé a přesné výsledky, umožnilo by to širší využití těchto postupů. Jedná se o efektivní, flexibilní, ekonomický i ekologický způsob sběru dat s vysokou přesností. Určitou nevýhodou bezpilotních letadel je v současné době slabá výdrž baterií a s tím spojený omezený dolet stroje a také značná závislost na vhodných povětrnostních podmínkách pro provoz UAV.

Kombinace metod blízké fotogrammetrie a volumetrické kvantifikace tak jak jsou prezentovány, může přispět k lepšímu poznání míry poškození zemědělské půdy erozními jevy. Bezkontaktní postupy navíc umožní získání spojitě informace o následcích eroze na velkých plochách v relativně krátkém čase.

Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory projektu CZ.07.1.02/0.0/0.0/16_023/0000118 Voda pro Prahu řešeného v rámci operačního programu Praha – Pól růstu ČR.

Literatura

- [1] DUMBROVSKÝ, M. *Vliv eroze na produkční schopnost půd a půdní vlastnosti*. Disertační práce. Praha: VÚMOP, 1992.
- [2] RANGER, G.E. and FRANK, F.F. *The 3-F erosion bridge – A new tool for measuring soil erosion*. Publication No. 23. Department of Forestry, California, 1978, 7 p.
- [3] BLANEY, D.G. and WARRINGTON, G.E. *Estimating soil erosion using an erosion bridge*. Colorado, 1983. WSDG-TP-00008. WSDG Report. USDA Forest Services.
- [4] DUMBROVSKÝ, M., SOBOTKOVÁ, V., PAVLÍK, F. a UHROVÁ, J. Objemová kvantifikace erozních rýh v povodí Šardického potoka. *Littera Scripta*, 2011, roč. 4, č. 1, s. 145–154. ISSN 1802-503X.
- [5] SOBOTKOVÁ, V. *Volumetrická kvantifikace projevů vodní eroze a jejich vliv na komplex vybraných půdních charakteristik*. Dizertační práce. Brno, 2012. 121 s.
- [6] ŽIŽALA, D., KRÁSA, J. a kol. *Monitoring erozního poškození půd v ČR nástroji dálkového průzkumu Země*. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v. v. i., 2016. ISBN 978-80-87361-63-4.
- [7] WESTOBY, M.J. et al. "Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 2012. vol. 179, p. 300–314.
- [8] ELTNER, A. et al. Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014. doi: 10.1002/esp.3673.

[9] PIERZCHALA, M. et al. Estimating Soil Displacement from Timber Extraction Trails in Steep Terrain: Application of an Unmanned Aircraft for 3D Modelling. *Forests*, 2014, vol. 5, p. 1212–1223.

[10] VLÁČILOVÁ, M. a KRÁSA, J. Monitoring erozního poškození půd a projevů eroze pomocí metod DPZ. *Voda a krajina*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2013, s. 311–319. ISBN 978-80-01-05318-8.

[11] PAVELKA, K. Fotogrammetrie. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003. ISBN 80-7082-972-9.

[12] AGISOFT. About. [online]. [citováno 2018-09-12]. Dostupné z: <http://www.agisoft.com/>

[13] GLENDELL, M. et al. Testing the utility of structure from motion photogrammetry reconstructions using small unmanned aerial vehicles and ground photography to estimate the extent of upland soil erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017

[14] ČÚZK. Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) [online]. 2010. [citováno 2018-09-14]. Dostupné z: [http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(ov0bod53pfziiljecfc3t3i\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302](http://geoportal.cuzk.cz/(S(ov0bod53pfziiljecfc3t3i))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302)

Autoři

Ing. Jana Uhrová, Ph.D.

✉ jana.uhrova@vuv.cz

Mgr. Radek Bachan

✉ radek.bachan@vuv.cz

Mgr. Pavla Štěpánková, Ph.D.

✉ pavla.stepankova@vuv.cz

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., pobočka Brno

Příspěvek prošel lektorským řízením.

DETERMINATION OF SOIL LOSS FROM EROSION RILLS BY METHOD OF DIGITAL PHOTOGRAMMETRY AND METHOD OF VOLUMETRIC QUANTIFICATION

UHROVA, J.; BACHAN, R.; STEPANKOVA, P.

TGM Water Research Institute, p. r. i., Brno Branch

Keywords: close-up photogrammetry — method of volume quantification — rill erosion — digital terrain model — unmanned aerial vehicles — soil loss

This article presents the first results of the research focused on the recording of rill erosion, and its evaluation using the outputs of the two methods that can be used to determine the soil yield. The consequences of erosion have been documented on a selected pilot site, both as a direct method of volume quantification (using an profile meter – so called soil erosion bridge) and with the use of unmanned aircraft in close-up photogrammetry (UAV). Volumetric quantification of rill erosion on land is a direct field measurement method which was recorded with an soil erosion bridge – a device that allows the direct measurement of the cross section of the terrain. By direct measurement, 25 transverse erosion engraving profiles of 2 m were recorded, which exhibited significant signs of escape erosion. The site of interest was also captured using UAV. A digital terrain model (DMT) was created from the captured images, and DMT cross-sections for subsequent comparison were created at points where direct erodometric measurements were taken. It has been shown that methods such as soil erosion bridge readings and photogrammetry are highly effective in the measurement and analysis of rill erosion. They are efficient, flexible, economical and environmentally friendly methods for collecting data with great precision.