

Ověření využitelnosti metod modelování eroze a konektivity sedimentů v povodí Slaviče v Moravskoslezských Beskydech na základě geomorfologického mapování fluviálních procesů

**TEREZA MACUROVÁ, ANTONÍN KOHUT, JAN UNUCKA, LENKA PETRUŠKOVÁ,
MARTIN ADAMEC, IRENA PAVLÍKOVÁ**

Klíčová slova: Slavič – Moravskoslezské Beskydy – eroze – fluviální procesy – diskonektivita vodních toků

ABSTRAKT

V rámci výzkumných aktivit Oddělení hydrologie Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) Ostrava probíhají na několika povodích terénní šetření a měření pro ověření výstupů nástrojů GIS, empirických vzorců a matematických modelů zaměřených na povrchový odtok, fluviální erozi a transport sedimentů. Hlavní důraz je kladen na vliv odlesnění a změn *land use* na srážkoodtokové vztahy a fluviální erozi, zejména v rámci řešení projektů Národní agentury pro zemědělský výzkum (NAZV) „*DEFOREST*“ a „*CLIMCFOR*“, na nichž ČHMÚ spolupracuje s Výzkumným ústavem lesního hospodářství a myslivosti, Biskupstvím ostravsko-opavským a Vodohospodářským rozvojem a výstavbou, a. s. Předložený článek se zabývá možnostmi analýz fluviálních procesů a diskonektivitou vodních toků v povodí Slaviče v Moravskoslezských Beskydech. Pro tyto analýzy byly využity nástroje ESRI ArcGIS a GRASS GIS. Terénní ověření výstupů probíhalo v několika samplovacích bodech v rámci hlavního toku Slaviče.

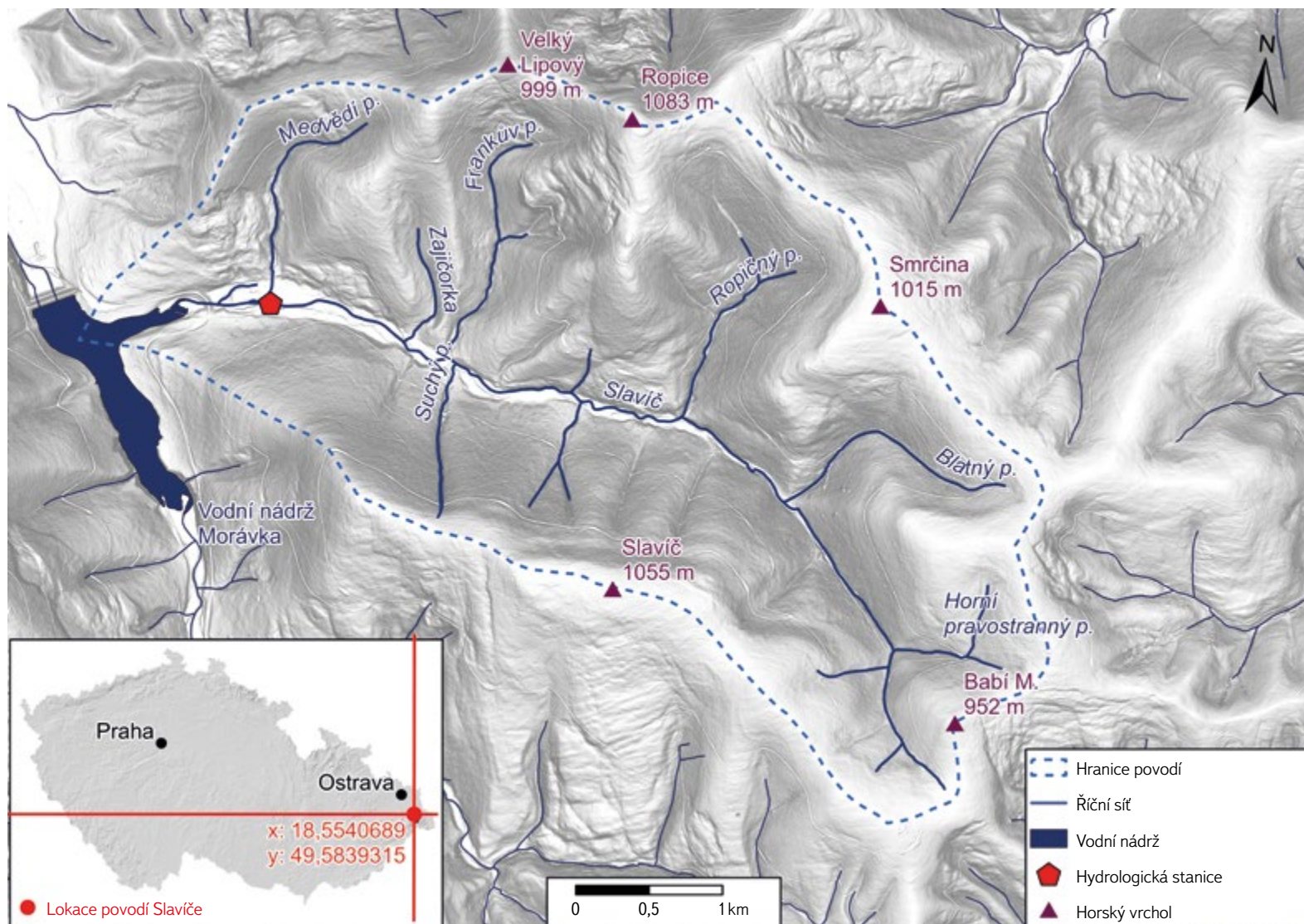
ÚVOD

Sedimenty společně s organickým materiálem tvoří nezbytnou součást fluviálních systémů a společně s energií proudící vody utvářejí rozličnou morfologii koryta. Jednotlivé části korytových úseků či povodí jsou v přírodních systémech vzájemně propojeny a souhrnně tato propojení nazýváme „konektivita“. Tento výzkum se zaměřuje na geomorfologii a konektivitu materiálu v bystřiných tocích, které se zpravidla vyznačují vysokou potenciální energií pro transport vody a materiálu [1].

Nejen antropogenní, ale taktéž přírodní formy, např. dřevní nápěchy stabilizované štěrkovými lavicemi, mohou ve vodním toku působit diskonektivně, a omezovat tak poproudový transport materiálu. To však neplatí pro hydrologickou konektivitu, jež těmito diskonektivitami příliš ovlivněna není. Narušení hydrologické konektivity můžeme do jisté míry vnímat např. u přehradních nádrží, kde jsou prováděny manipulace a do vodního toku pod přehradní nádrží pak proudí ovlivněné průtoky, což zároveň zpětně působí na konektivitu sedimentů [2].

Lidé do těchto přirozeně fungujících systémů svou činností bohužel vnášejí množství negativních antropogenních bariér, jež tato vzájemná propojení významně narušují jak ve směru podélném (retenční přehrážky, stabilizační stupně, jezy, vodní díla apod.), tak ve směru laterálním (např. opevněním břehů). Tyto antropogenní formy v povodí působí tzv. diskonektivitu v různých dlouhých časových měřítcích a s různou intenzitou [2]. Např. retenční přehrážky mají v povodí nejvyšší účinnost v období ihned po výstavbě a poté do doby, než je retenční prostor zcela zaplněn transportovaným sedimentem. Dle intenzity transportu sedimentů se může jednat o diskonektivitu pouze po omezený časový úsek a potom může být transport materiálu obnoven. Naopak pro srovnání, přehradní nádrže tvoří v podstatě nepřekonatelnou a trvalou bariéru pro všechny sedimenty, které se zde transportují. To představuje významný problém z hlediska poproudové konektivity dnových splavenin, kdy v důsledku nedostatku přísunu sedimentů do koryta pod přehradou spolu s vodohospodářskými manipulacemi může vyústit v efekt hladové vody [3].

Výzkum konektivity sedimentů a materiálu v povodí nám může přinést velmi užitečné informace o erozně-transportně-akumulačních poměrech v povodí a také pomoci s nastíněním vhodného managementu. Z hlediska konektivity jsou významné zdrojové oblasti sedimentů, které v propojení svahů s korytem mohou být představovány aktivními sesuvy, a z hlediska propojení samotných břehů s koryty pak břehovými nátržemi. Transport materiálu probíhá v celé délce koryta a zpomalují ho přírodní tvary, zejména dřevní hmota či lokální akumulace sedimentů. Naopak jako tzv. urychlující zóny mohou působit úseky koryta s obnaženým skalním podložím [2]. Akumulace sedimentů jsou tvořeny útržky skalních hornin různé míry abraze (dle délky transportu a petrografického složení) a velikosti (štěrkovitá, kamenitá až balvanitá frakce), vytvářející akumulací tvary v podobě tzv. štěrkových lavic. Akumulační tvary jsou představovány štěrkovými lavicemi, jež mohou být v závislosti na intenzitě přeplavování povodňovými průtoky buďto v potenciálně mobilním stavu (se sporadickým porostem vegetace), či významně stabilizované vegetací (stromy s vyvinutým kořenovým balem). Všechny tyto erozní, transportační a akumulací procesy pak nejvýznamněji ovlivňují již dříve zmíněné antropogenní stavby.



Obr. 1. Zájmové povodí Slaviče v Moravskoslezských Beskydech

Fig. 1. Study area of the Slavič river catchment in the Moravian-Silesian Beskydy Mountains

Přístupy k odhalení těchto erozně-transportně-akumulačních poměrů lze provést dvěma kroky – první krok zahrnuje identifikaci potenciální konektivity pomocí prostorově založených modelů [4, 5, 6], druhým krokem je terénní průzkum, ideálně takový, který je podpořen monitoringem probíhajících procesů za různých událostí, zejména za povodňů či v období sucha.

ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ

Povodí Slaviče s plochou povodí 17,4 km² (povodí IV. řádu, ČHP: 2-03-01-0410-0-00) náleží do povodí Odry a rozprostírá se JV směrem od obce Morávka, resp. V-JV od vodní nádrže Morávka ve výšce cca 505 m n. m. Povodí Slaviče je ohraničeno horskými elevacemi Slavič, Babí vrch, Kalužný, Smrčina, Ropice, Velký Lipový a Kyčera sahajících do nadmořské výšky v rozmezí 834–182 m n. m.

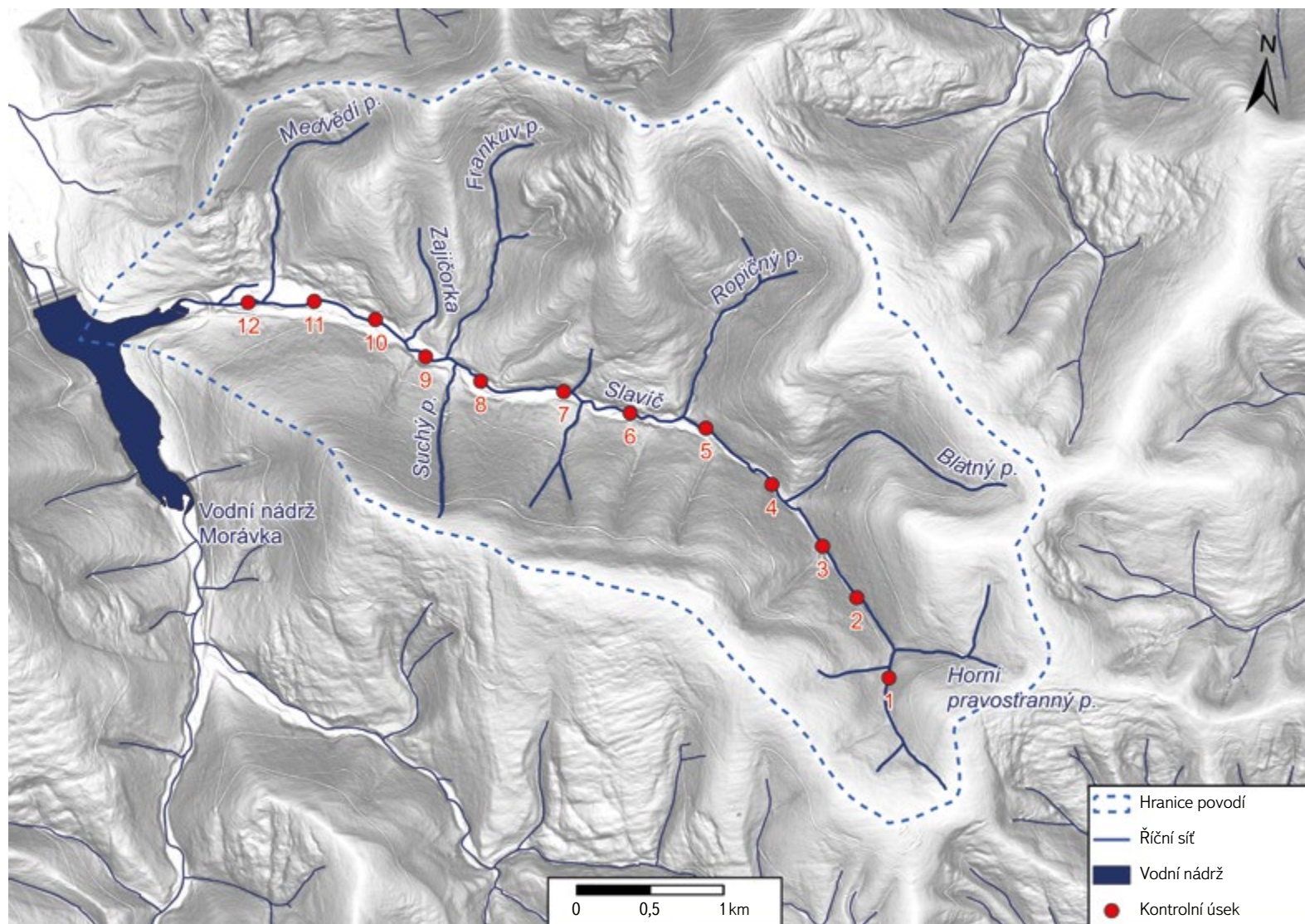
Z geomorfologického hlediska náleží zájmová oblast do systému alpsko-himálajského, provincie Západní Karpaty, subprovincie Vnější Západní Karpaty, oblasti Západní Beskydy, celku Moravskoslezské Beskydy, podcelku Lysohorská hornatina a okrsku Ropická rozsocha. Lysohorská hornatina má rozlohu 362 km², střední nadmořskou výšku 709,9 m a střední sklon 14° 45'. Jde o členitou

hornatinu, která je budována souvrstvím godulských a istebňanských vrstev. V reliéfu lze pozorovat stopy periglaciálního formování zastoupeného balvanitými proudy, mrazovými sruby a pseudokrasovými puklinami. Ropická rozsocha leží v severovýchodní části Lysohorské hornatiny a reprezentuje členitou hornatinu zalesněnou smrkovo-bukovým lesem [7].

Horninový masiv je v ose povodí, ve směru V-Z erodován fluvialními procesy do hluboce zaříznutého údolí, kterým protéká vodní tok Slavič. V údolní nivě vodního toku se v nadloží skalního masivu vyskytují jílovité, písčité a štěrkovité fluvialní až deluviofluvialní sedimenty, zatímco v jeho okolí hlinitopísčité až hlinitokamenité proluviální a dále od toku deluviální sedimenty kvartérního stáří.

Vzhledem ke strmosti svahů se v celém povodí Slaviče vyskytuje řada svahových deformací v podobě sesuvů a proudů, které jsou jak uklidněné, tak aktivní, to znamená, že reprezentují zdrojovou oblast snosového materiálu postupně přenášeného k vodnímu toku Slavič.

Vodní tok Slavič pramení na hranici obcí Morávka a Horní Lomná v nadmořské výšce cca 900 m (obr. 1). Protéká štěrkovým korytem a jeho délka činí 7,85 km. Zaústí z pravé strany do vodní nádrže Morávka v nadmořské výšce 505 m n. m. Na vodním toku se nachází vodoměrná stanice ČHMÚ, pro kterou byly odvozeny N-leté průtoky dle ČSN 75 1400 v rozmezí 5,01–65,8 m³·s⁻¹ (tab. 1).



Obr. 2. Přehled kontrolních úseků s měřením granulometrie metodou podle Wolmana ve vodním toku Slavič
 Fig. 2. Sampling points on the Slavič river using Wolman granulometric measurement method

Tab. 1. N-leté průtoky Slavič (Zdroj: ČHMÚ)

Tab. 1. Slavič stream discharges with N-year return period (Source: CHMI)

N-leté průtoky [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]				
Q1	Q5	Q10	Q50	Q100
5,01	17,70	25,80	51,40	65,80

V návaznosti na hlavní téma této studie, tedy modelování eroze a konektivity sedimentů, je zapotřebí zmínit i antropogenní zásahy v povodí Slaviče, jež mají bezprostřední vliv na jeho dnešní podobu a procesy v něm probíhající. V minulosti byl vodní tok ovlivněn plavením dřeva a hrazením bystrin. Pro účely plavení dřeva byla v horní části povodí Slaviče vybudována také klauz, která sloužila jako regulační, s délkou hráze cca 12 m. Roku 1880 byla zničena povodní. Dalšími regulačními úpravami, jež rovněž napomáhaly k plavení dřeva, jsou kamenné zídky skládané na sucho [8]. Prakticky po celé délce je vodní tok lemován asfaltovou cestou, vyskytují se zde tedy propustky, mosty, lávky a různá opevnění břehů. V samotném vodním toku se vyskytují retenční přehrážky a stabilizační stupně. Z přírodních prvků, které ve vodním toku nalézáme, stojí za zmínku

skalní stupně, štěrkové lavice či říční dřevo. Pozorovatelné jsou také břehové eroze či nátrže.

METODY

V dnešní době již existuje množství sofistikovaných nástrojů v podobě softwarových prostředků, jež umožňují namodelovat různé scénáře na základě námi zvolených požadavků a podkladových dat. Prvním z těchto nástrojů pro identifikaci konektivity v povodí je Connectivity Index Target (CI), který funguje na platformě ArcGIS ArcMap v podobě tzv. toolboxu [9]. Model umožňuje identifikaci zdrojových oblastí sedimentů a potenciální konektivitu transportu sedimentů do korytové sítě. Vstupní data zahrnují upravený, hydrologicky korektní Digitální model reliéfu (DMR), vygenerovanou říční síť z DMR s obalovou vrstvou průměrné šířky koryta, která činí 5 m, a vrstvu vektorizovaných kategorií využití území neboli *land use* (LU), konkrétně na podkladu ortofota z roku 2016 (ČÚZK – Český úřad zeměměřický a katastrální). Výsledkem je mapa s vykreslenou barevnou škálou potenciální konektivity v povodí, resp. hodnotami konektivity, které jsou bezrozměrné. Model však nedokáže v závislosti na hrubším rozlišení

Tab. 2. Podkladové vrstvy použité pro jednotlivé analýzy
 Tab. 2. Base layers which were used for individual analyses

Název vrstvy	Digitální model reliéfu České republiky 4. generace	Ortofoto České republiky	Říční síť a hranice povodí	Digitální vektorová databáze České republiky ArcČR®	Břehová nátrž, skalní výchoz, štěrková lavice, dřevní nápěch, opevnění břehu, stabilizační stupeň, retenční přehrážka, balvanitý skluz, propustek
Zdroj dat	Český úřad zeměměřický a katastrální (ČÚZK)	Český úřad zeměměřický a katastrální (ČÚZK)	Digitální Báze Vodohospodářských Dat (DIBAVOD)	ARCDATA PRAHA – ArcČR®	Terénní mapování – GPS eTrex® 30x
Koordinační systém	S-JTSK / Krovak East North, Výškový systém baltský – po vyrovnání	S-JTSK / Krovak East North	S-JTSK / Krovak East North	S-JTSK / Krovak East North	S-JTSK / Krovak East North
Formát vrstvy	Rastr	Rastr	Vektor	Vektor	Vektor
Rozlišení	5 × 5 m grid	0,2 × 0,2 m grid	-	-	-
Rok pořízení	2009–2013	2016–2020	2006–2010	2023	2018–2020
Přesnost	Úplná střední chyba výšky 0,3 m v odkrytém terénu a 1 m v zalesněném terénu	-	-	-	1 m

identifikovat diskonektivity uvnitř a vně koryta toku (retenční přehrážky, opevnění břehů), které mají menší plochu, než činí jednotlivé pixely rastru. Právě z tohoto důvodu je důležité při výzkumu konektivity v povodí znát přírodní a antropogenní formy v povodí. Přírodní a antropogenní formy nacházející se v korytě byly identifikovány jednoduchou metodou – fluvialně-geomorfologickým mapováním koryta a blízkého okolí. Pro zaznamenání výskytu jednotlivých forem byla použita ruční GPS, typu *eTrex®30x* a měřicí pásmo pro měření rozměrů jednotlivých forem.

Ověření konektivity v kontextu celého povodí proběhlo také pomocí erozních empirických vzorců (USPED), hydrologických analýz DMR (Terraflow pro GRASS GIS) a dynamických erozních modelů (SIMWE pro GRASS GIS).

Metoda USPED (Unit Stream Power – based Erosion Deposition) nám poskytuje podrobný náhled o erozním ohrožení území – vymezuje oblasti odnosu a akumulace sedimentů v daném povodí. Vstupní data zahrnují vrstvu Digitálního modelu reliéfu (DMR), Půdní mapy 1 : 50 000 a R faktoru (Regionalizovaný faktor erozní účinnosti přívalového deště) a slouží pro výpočet dlouhodobé ztráty půdy vodní erozí pomocí rovnice USLE (ČHMÚ, VÚMOP). Pro výpočet byl předpokládán ronový odtok (sheet flow). Samotný výpočet byl proveden v prostředí ArcGIS Pro s využitím stanoveného odtoku metodou Multiple Flow Direction (MFD). Tato metoda dokáže identifikovat zdrojové a sedimentační oblasti a potenciální linie konektivity sedimentů, i přesto se však nejedná

Tab. 3. Výsledky fluvialně-geomorfologického mapování v korytové síti Slavičice
 Tab. 3. Results of fluvial-geomorphologic mapping in the Slavič channel network

Vodní tok	Plocha povodí [km ²]	Délka páteřního toku [km]	Délka páteřního toku (m)	Břehová nátrž [m ² /počet]	Štěrková lavice [m ²]	Skalni výchoz (počet)	Dřevní akumulace (počet)	Opevnění břehů [m]	Opevnění břehů na délku toku [%]	Stabilizační stupeň (počet)	Zastoupení stabilizačních stupňů na km toku (počet)	Retenční přehrážka (počet)	Zastoupení retenčních přehrážek na km toku (počet)	Balvanitý skluz (počet)	Zastoupení balvanitých skluzů na km toku (počet)	Propustek (počet)	Zastoupení propustků na km toku (počet)
Slavič	17,4	7,8	7 780,6	201,0	1 801,5	74	22	3 745,0	48,1	13	1,7	2	0,3	1	0,1	2	0,3
Horní pravostranný přítok	0,8	0,8	754,7	-	731,0	-	3	-	-	1	1,3	-	-	-	-	1	1,3
Blatný potok	1,7	1,8	1 827,2	8,9	671,0	3	3	-	-	1	0,5	1	0,5	-	-	1	0,5
Ropičný potok	2,4	1,4	1 434,0	355,6	1 259,2	5	16	454,4	31,7	-	-	1	0,7	1	0,7	-	-
Levostranný bezejmenný přítok	0,7	0,8	816,9	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1,2	-	-	-	-
Suchý potok	0,5	1,1	1 089,0	34,6	129,0	-	2	-	-	-	-	4	3,7	-	-	1	0,9
Frankův potok	1,9	2,0	1 981,5	78,6	66,8	3	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zajičorka	0,5	0,9	900,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1,1
Medvědí potok	1,2	1,7	1 696,3	14,1	58,0	1	6	-	-	1	0,6	1	0,6	-	-	3	1,8

Poznámka: přírodní/antropogenní formy s vysvětlením v závorce (počet) – znamená jednotlivý výskyt dané formy / údaj v závorce např. (m) značí, že je to délka dané formy, např. opevnění břehů. Pro ilustraci zastoupení jednotlivých forem na délku toku byl u antropogenních forem proveden přepočet procentuálního výskytu dané formy na 1 km toku (sloupce odlišeny kurzívou).

o erozní model v pravém slova smyslu z hlediska implementovaných numerických a analytických metod.

Součástí geografického informačního systému GRASS GIS je model SIMWE (SIMulated Water Erosion). Původně byl k dispozici pouze jako doplňkový modul, od verze 6.2.2 je již implicitně zahrnut v nástrojích hydrologických analýz. Do modelu vstupují stejná data jako do výše uvedeného erozního modelu, doplněná o koeficienty pro povrchový odtok vypočítané podle McCueana [10, 15] jako funkce vegetačního pokryvu a hydrologické skupiny půdy a data o srážkách. Výstupem modelu je prostorové rozložení ustálené průtokové rychlosti sedimentu, koncentrace sedimentu a rychlost půdní eroze/depozice. SIMWE je plně distribuovaný model, jehož rozlišení je závislé na rozlišení vstupních rastrů. Modul r.sim.water umožňuje distribuované řešení infiltrace a povrchového odtoku. Povrchový odtok je řešen ve 2D pomocí Saint Venantových rovnic a difúzní vlnové aproximace. Odtok sedimentů pak řeší modul r.sim.sediment [6]. Výstupy model produkuje v rastrové podobě.

Podkladové vrstvy pro jednotlivé analýzy jsou zobrazeny v tab. 2.

V hlavním toku bylo změřeno dle Wolmana [16] granulometrickou metodou dvanáct úseků po 200 klastech (obr. 2). Klasty byly odebírány náhodně, a to pouze ze svrchní vrstvy od velikosti zrna ($D \geq 2$ mm), u nichž byla vždy změřena délka osy b . V každém úseku byl taktéž dálkoměrem měřen sklon koryta a geometrické parametry – šířka a hloubka plného stavu koryta s přesností na 0,1 m. Pro odběr vzorků byly vybrány přímé a pravidelně utvářené úseky vodního toku s preferencí bez antropogenních úprav. Pro zjištění poproudových trendů byly ze změřených hodnot délek osy b (mm) z celého vzorku každého úseku vypočteny percentily $D_{5'}$, $D_{25'}$, $D_{50'}$, $D_{95'}$ [4]. Percentil je hodnota vyjadřující velikost zrna,

kteřá je dána kumulativní distribuční křivkou pro dané procento „jemnějších částic“. Takže např. „ $D_{50} = 30$ mm“ vyjadřuje, že 50 % částic z celého vzorku má menší zrnitost než 30 mm. D_{50} je pak mediánem distribuční křivky, která rozděljuje vzorek na dvě stejné části. Percentily D_{25} a D_{75} jsou kvartily.

Navíc, za účelem zjištění potenciální energie koryta pro transport sedimentů, byl proveden výpočet výkonu toku (Stream Power Index, zkr. SPI). Mezi hlavní faktory určující výslednou hodnotu SPI je podélný sklon koryta (S) a velikost přispívajícího subpovodí. SPI byl vypočten za účelem zjištění potenciální energie vodního toku za potenciálního průtoku Q . SPI se označuje jednotkou ω ($W^{m^{-2}}$) a dle Bagnolda [11] nese vztah:

$$\omega = \frac{QS\rho g}{W}$$

kde:

Q	je	průtok ($m^3 \cdot s^{-1}$)
S		sklon (m/m)
ρ		hustota vody ($1\,000\,kg \cdot m^{-3}$)
g		gravitační zrychlení ($m \cdot s^{-2}$)
W		šířka koryta před hodnocenou povodní (m)

U vysokogradientových toků byl prokázán přímý vztah mezi SPI během stavu plného koryta (ω_{bp}) a plochou povodí (A) o rozloze < 10 km², kdy byl parametr (ω_{bp}) zjednodušen do formy:

$$\omega_{bf} \approx \frac{ASpg}{W_{bf}}$$

kde:

A je plocha povodí (km²)
 W_{bf} šířka plného stavu koryta,

což odráží poproudové navyšování průtoku:

$$Q_{bf} \approx cA^d$$

Nicméně, ve výzkumu prováděném Galiou a Škarpichem [12, 13] byl použit vztah upravený pro malá povodí potoků Lichnovský, Lubina, Malý škaredý a Veřovický potok, které mají podobnou plochu povodí a podobné morfoloogické, hydrologické i geologické parametry jako povodí Slavíče. Proto byl v tomto případě použit stejný vztah:

$$Q_2 = Q_{bf} = 0,55A^{0,88}$$

VÝSLEDKY

Nejvyšší konektivita se projevila v blízkosti říční sítě, zejména v oblastech přítoků, kde svahy přímo navazují na koryto. Z hlediska vlivu LU se nejvýznamněji projevily holoseče, které naznačují uměle akcelerovaný transport materiálu do koryta. Svahy zde dosahují vysokých hodnot sklonů a není tu vyvinuta říční niva. Nejnižší konektivita se naopak ukázala v oblastech rozvodnic jednotlivých subpovodí, kde jsou sklonové nízké a transport materiálu zde probíhá pravděpodobně velmi omezeně. Nízkou konektivitou se vyznačuje také říční niva, která tvoří přirozenou dočasnou bariéru pro transport sedimentů do koryta. U hlavního vodního toku jsou s korytem lépe propojeny jižně orientované svahy, protože na levém břehu vodního toku se vyskytuje širší říční niva než na břehu pravém. Výsledná mapa konektivity je znázorněna na obr. 4.

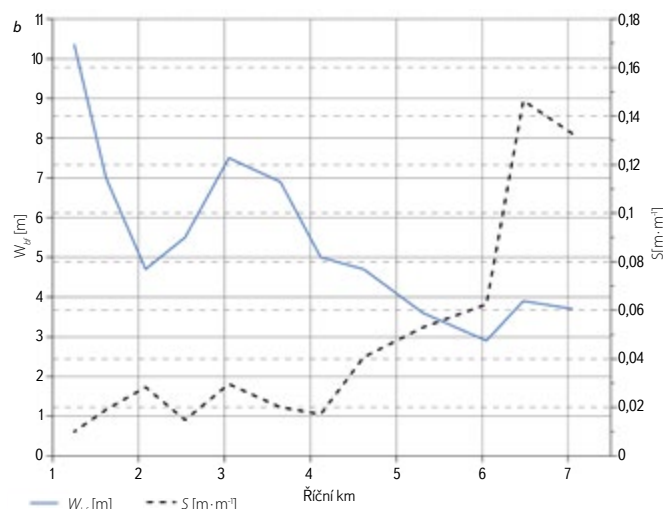
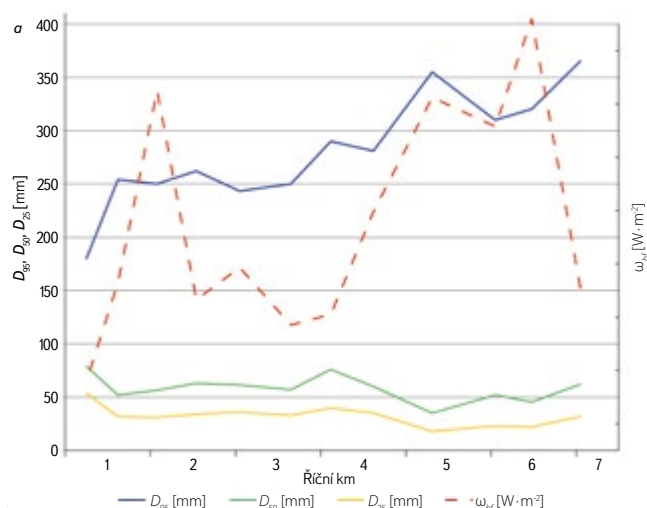
Fluviálně-geomorfologické mapování odhalilo velké množství přírodních i antropogenních forem v korytové síti povodí Slavíče. Výsledky mapování uvádí tab. 3.

Výsledky granulometrické metody prokázaly poproudové zjemňování klastů o zrnitosti D_{95} s náhlým nárůstem ve 4. úseku. Hodnoty percentilů D_5 se naopak poproudově zvyšují s mírnou rozkolísaností a náhlý pokles se taktéž projevil ve 4. úseku. SPI vykazuje obecně vyšší hodnoty v horní části koryta, nicméně v závislosti na sklonu jsou tyto hodnoty značně rozkolísané. Náhlý nárůst byl patrný ve 2. a 10. úseku (obr. 3).

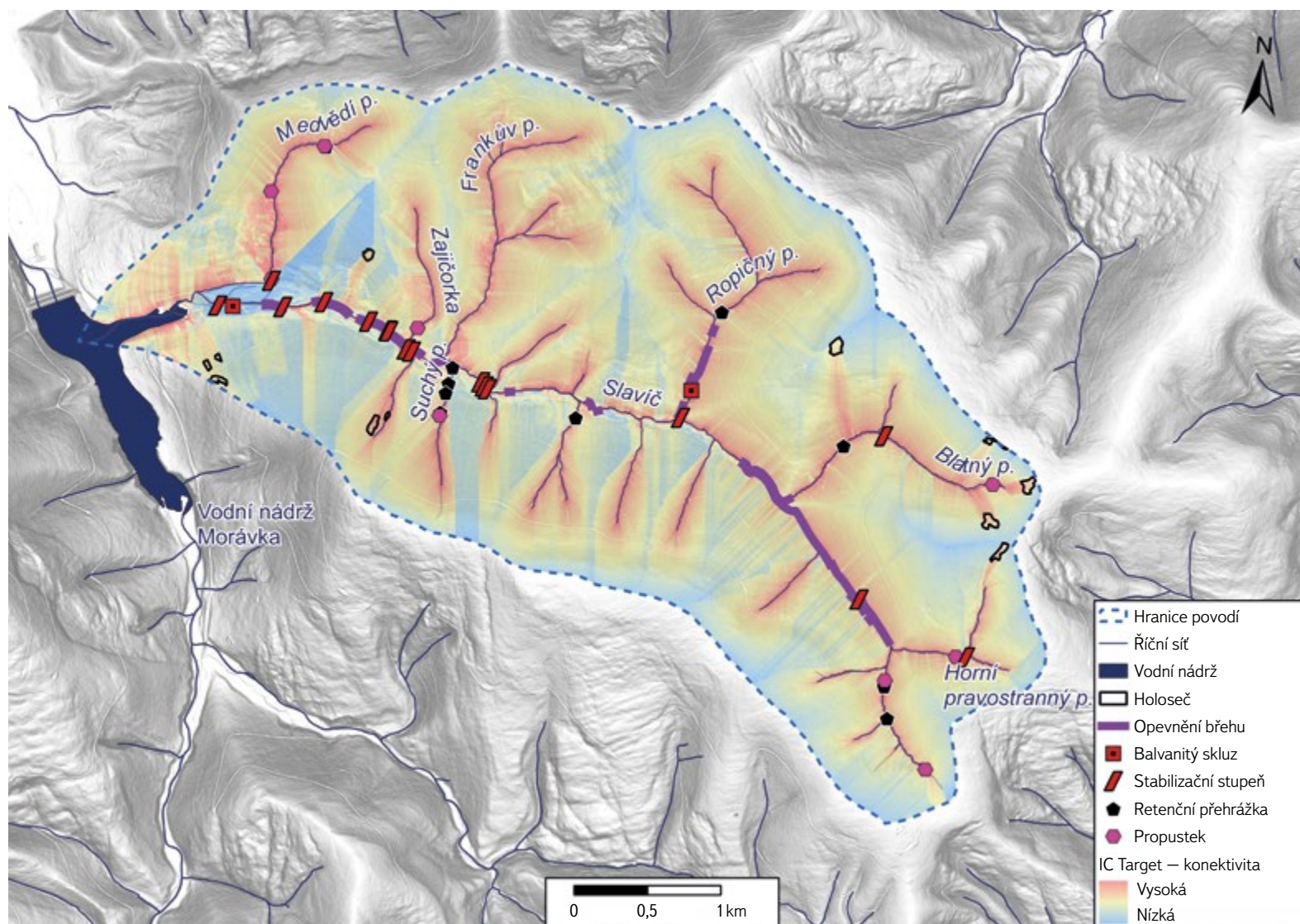
Při srovnání s výstupy erozních modelů je možné vidět, že modelování horských povodí dává velmi podobné výsledky i při použití různých metodik (statické vs. dynamické modely), které korelují s výsledky modelování konektivity sedimentů. Všechny tři typy použitých modelů dokážou spolehlivě modelovat potenciální místa koncentrace sedimentů a přispívající plochy.

Erozní modelování USPED a SIMWE ukazuje citlivost modelu horského, převážně zalesněného povodí zejména na terénu. Vzhledem k charakteristice terénního reliéfu s velkými sklonovými svahy a jejich lokálními změnám jsou setřeny vlivy dalších faktorů (land cover, půdy a erozní účinnost deště). Výstup metody USPED pro povodí Slavíče znázorňuje obr. 5. Výsledek modelu SIMWE v podobě půdní eroze/depozice pro zájmové území uvádí obr. 6.

Kombinace přístupů modelů Connectivity Index Target, USPED a SIMWE doplněná o fluviálně-geomorfologické mapování koryta a blízkého okolí nám pomáhá propojit metody identifikace erozních oblastí, hydrologickou konektivitu s konektivitou transportu sedimentů, která je silně vázána na podélné a boční diskonektivní formy v korytě. Všechny použité modely jsou statickým obrazem reálné situace v povodí a jsou závislé na podrobnosti a přesnosti vstupních dat. Model Connectivity Index Target řeší pouze konektivitu a trasy pohybu sedimentů v povodí, naopak modely USPED a SIMWE pracují navíc také s hydrologickou konektivitou. Výhody jednotlivých modelů spočívají v nenáročnosti na množství vstupních dat a relativně rychlém výpočtu. Pro srovnání, ve výstupech modelů Connectivity Index Target a SIMWE jsou dobře znatelné potenciální trasy transportu sedimentů a oba taktéž dokážou dobře identifikovat zóny depozice, jež jsou v obou modelech znázorněny modrou barvou. Model SIMWE navíc umí rozoznat i vněkorytovou erozi, která je znázorněna červenou barvou. Výsledná mapa USPED se od druhých dvou modelů odlišuje tím, že je na ní dobře identifikovatelný vliv lesních komunikací, jež působí jako erozní dráhy pro transport sedimentů.



Obr. 3. a) Poproudový vývoj zrnitosti sedimentů D_{25} , D_{50} , D_{95} a SPI; b) poproudový vývoj šířek (W_{cr}) a sklonů (S) hlavního koryta Slavíče
 Fig. 3. a) Downstream grain size trends of sediments D_{25} , D_{50} , D_{95} and SPI; b) downstream trends of width (W_{cr}) and slope (S) of the Slavice channel



Obr. 4. Výsledná mapa diskonektivit v povodí Slaviče, která kombinuje metody Connectivity Index Target, identifikovaných holosečí a terénního mapování

Fig. 4. Output connectivity map of the Slavič catchment, which are combined methods of Connectivity Index Target, identified clearcuts, and terrain mapping

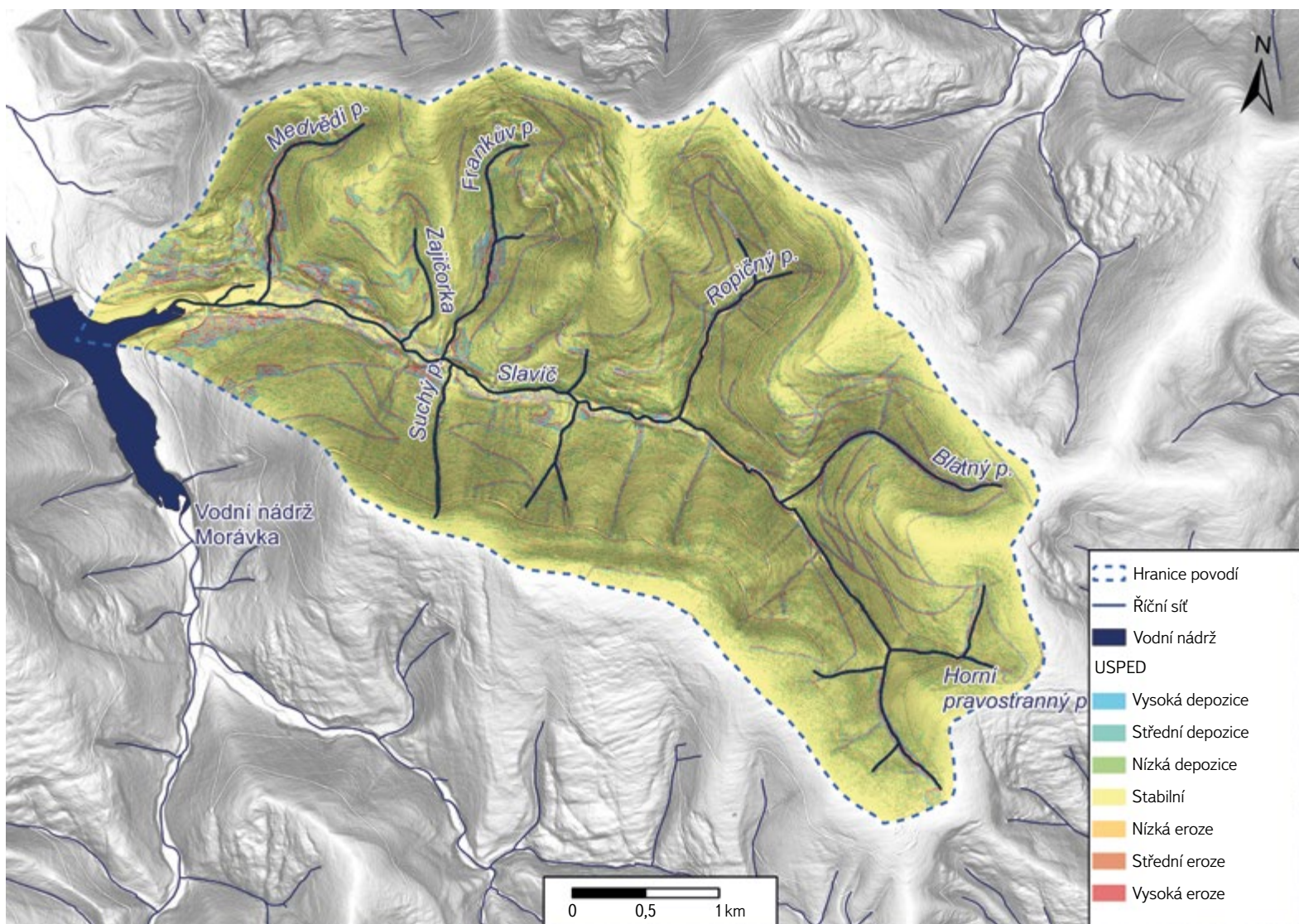
DISKUZE

V této studii byly využity přístupy modelování v kombinaci s fluvialně-geomorfologickým mapováním a granulometrickou metodou. Každý z těchto přístupů má své výhody a nevýhody. Modelovací software nám poskytuje rychlý náhled na potenciální konektivitu v povodí, který však za účelem vhodné interpretace musí být doplněn o další metody, v tomto případě o terénní průzkum. Terénní průzkum odhalil množství vněkorytových diskonektivit ovlivňujících transport sedimentů. Tato metoda přináší při správném postupu velmi podrobné výsledky, nicméně je značně náročná na čas. V neposlední řadě je důležité získat data o zrnitosti sedimentů, z nichž pak v kombinaci s již dříve zmíněnými metodami lze interpretovat např. vliv diskonektivit na poproudovou konektivitu sedimentů, odhalovat efekt hladové vody apod. Nevýhoda granulometrických metod spočívá taktéž v časové náročnosti nejen analyzovaných klastů v terénu, ale i v následném statistickém zpracování naměřených hodnot.

Modelováním konektivity pomocí nástroje Connectivity Index Target (CI) bylo prokázáno, že svahy s koryty z hlediska transportu sedimentů jsou vcelku dobře propojeny. Hodnoty vysoké konektivity v oblasti přítoků jsou dány zejména vysokými hodnotami sklonů svahů, na mnoha místech podpořenými antropogenní změnou

LU. Holoseče se negativně projevují na stabilitě svahů, které jsou snadno erodovány, a do vodního toku je tak dopravováno velké množství dřevního materiálu, sedimentů a jemných částic půdy, kde zvláště v období zvýšených srážek probíhá stržová eroze a plošný splach půdy do koryta. Říční niva situovaná zejména ve spodní části hlavního toku působí jako přirozená nárazníková zóna, jež díky svým nízkým sklonům omezuje transport materiálu ze svahů do koryta [2]. Nicméně velkým problémem v kontextu celého povodí Slaviče je výskyt přehradní nádrže Morávka, v níž končí svou trasu veškerý materiál transportovaný z vyšších částí povodí.

Terénním mapováním bylo v povodí Slaviče odhaleno velké množství diskonektivit, především antropogenního původu. Mezi nejvýznamnější diskonektivní prvky patří retenční přehrážky situované zejména na přítocích (obr. 4). V jistých případech, např. v korytě Suchého potoka, se nachází mnoho starých přehrážek, jejichž retenční prostor je již z velké části zaplněn, a původní retenční funkce je tak významně omezena. Z hlediska přísunu sedimentů do koryta jsou nejdůležitějšími formami břehové nátrže, jež jsou z největší části situovány na přítocích. Tyto nátrže jsou aktivního charakteru a dotují tak v případě zvýšených průtoků koryto materiálem. Urychlující zóny se vyskytují nejčastěji v hlavním korytě ve formě výstupů skalního podloží a zefektivňují tím transport. Četný výskyt těchto skalních výchozů lze přisoudit kumulativnímu



Obr. 5. Výsledná mapa intenzity eroze a depozice získaná pomocí metody USPED v povodí Slaviče

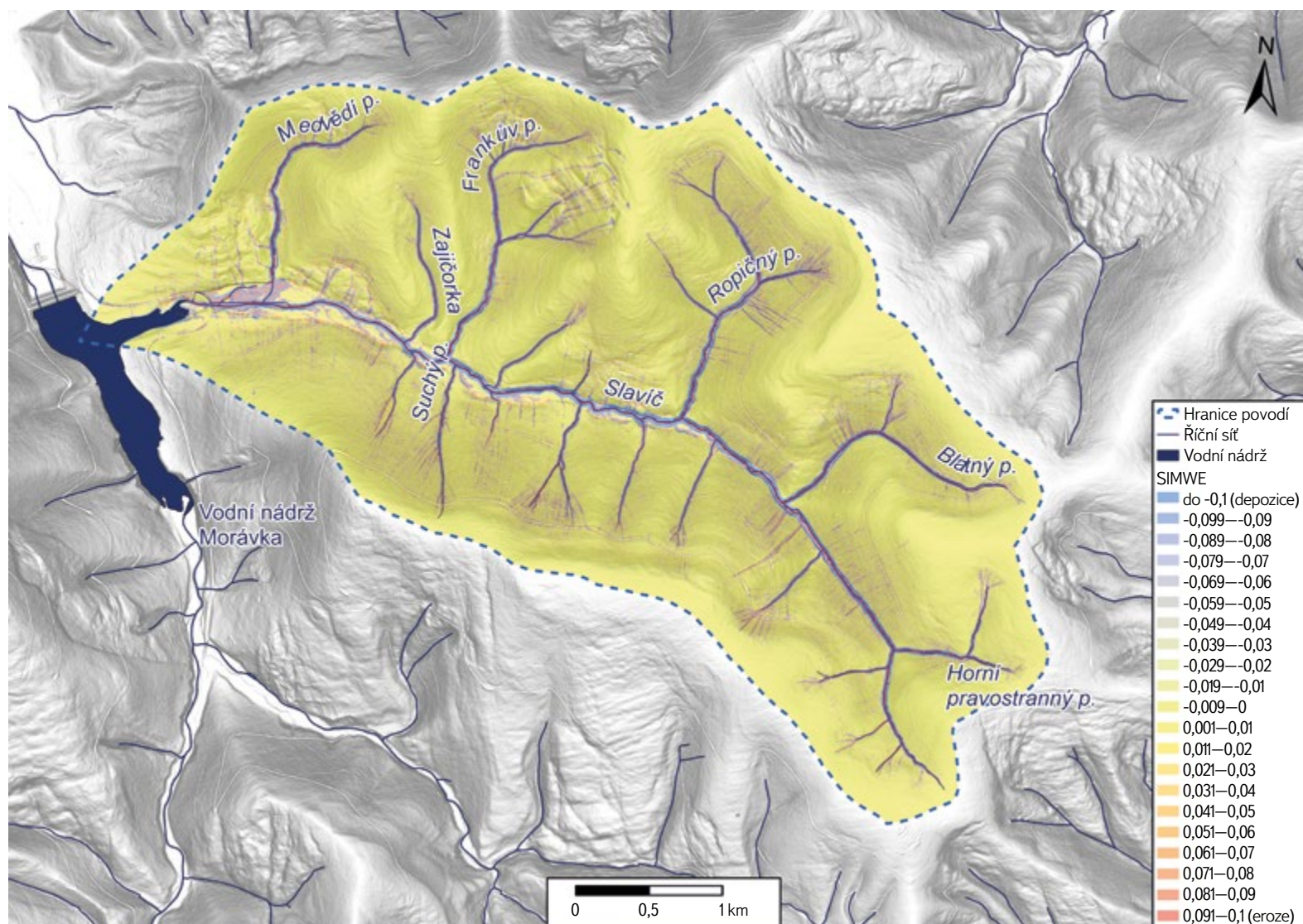
Fig. 5. Resulting map of the erosion and accumulation rate using the USPED method within the Slavič catchment

vlivu antropogenních forem, obzvláště opevnění břehů, které znemožňuje přísun materiálu z břehů do koryta, a tím dochází k postupnému vymývání sedimentů a jejich poproudovému hrubnutí. Vliv na hrubnutí sedimentů mají rovněž stabilizační stupně, což bylo zjištěno také výzkumem prováděným Galiou et al. [12]. Nicméně stabilizační stupně nemusejí zároveň vždy znamenat zpomalení transportu sedimentů – napřímením koryta a úpravami může být transport naopak akcelerován, což bylo zjištěno při výzkumu na tocích Malý Lipový a Bystrý [13, 14]. V neposlední řadě jsou zde akumulací zóny představovány štěrkovými lavicemi, které jsou však dynamické a v období povodní dochází k jejich pravidelnému přeplavování a transportu materiálu níže po toku.

Přirozenou vlastností bystřin je epizodický transport materiálu zejména při povodních, a proto je důležité na transport dnových splavenin nahlížet z dlouhodobého pohledu, např. v kontextu několika po sobě jdoucích povodňových událostí během posledních desetiletí. Koryto hlavního toku má v horní části vysokou potenciální energii pro transport sedimentů. Ta je ale bohužel za běžné hydrologické situace či v suchém období omezoována nízkými průtoky. V takovém období můžeme koryto popsat jako koryto s omezenou transportní kapacitou [15, 16], protože se zde nachází dostatečné množství materiálu, ale chybí energie, která by jej transportovala.

Model SIMWE je poměrně výkonný model, mezi jehož hlavní výhody patří zejména víceměřítková simulace, která v rámci malého rozlišení zájmového území umožňuje zároveň detailnější řešení určité části území pomocí dynamických vzorkovacích bodů, tzv. walkers. Další výhodou je úprava rovnic vlnové aproximace pro vyšší stabilitu řešení v oblastech DMR s nižším sklonem a hydraulickým spádem nebo v oblastech s obtížně určitelným směrem toku, např. u terénní deprese.

Model SIMWE pro GRASS GIS představuje vhodný nástroj pro zhodnocení srážkoodtokových vztahů spolu s erozními a transportně-akumulačními procesy. Je však nutné verifikovat výstupy modelu, kdy verze pro OS Linux vykazuje lepší stabilitu výpočtu než verze pro OS Windows, což se může projevit na samotné funkčnosti programu a někdy i na vlastních číselných hodnotách výsledků. Pro detailnější analýzy bude vhodné využít také simulaci transportu sedimentů v hydraulických modelech HEC-RAS a MIKE 11, přičemž nová verze modelu HEC-RAS nabízí v tomto ohledu stále dokonalejší nástroje.



Obr. 6. Výstupy modelu SIMWE pro GRASS GIS zobrazené v prostředí ArcGIS Pro reprezentující míru eroze a depozice v povodí Slaviče

Fig. 6. Model output of SIMWE for GRASS GIS catchment presented in ArcGIS Pro representing erosion and deposition rates within the Slavič river catchment

ZÁVĚR

Závěrem lze mimo jiné konstatovat, že kombinací obou metod, tj. prostorově založeným modelováním potenciální konektivity pomocí GIS softwaru a terénním mapováním, je možné efektivně řešit konektivitu sedimentů v horských povodích. Nicméně výzkumem byla ověřena důležitost fluvialně-geomorfologického mapování, jež přineslo podrobné výsledky o výskytu přírodních a antropogenních forem v korytě a jejich vlivu na morfologii a poproudové trendy sedimentů, jelikož generalizovaná vstupní geografická data a výsledky modelů zobrazující potenciální konektivitu sedimentů nedávají ucelený obraz reálného stavu povodí a samotného vodního toku. Povodí Slaviče je výrazně antropogenně ovlivněným povodím, zejména v oblasti hlavního toku. Některé přítoky (např. Frankův potok) jsou ale naopak velmi málo antropogenně ovlivněny a je zde znát přírodě blízký charakter koryta s množstvím organického materiálu. Jako zdrojové zóny sedimentů tu slouží především přítoky se svými početnými břehovými nátržemi. Modelování konektivity ve spojení s výsledky terénního mapování přineslo náhled na erozně-transportně-akumulační poměry v povodí a zároveň ukázalo míru antropogenního ovlivnění. Analýzy na dalších

pilotních povodích (Slučí, Sokolí, Suchý potok v povodí Černé Opavy a Svinný potok v povodí Osoblahy) přinesou bezesporu zajímavá data pro srovnání, mimo jiné s ohledem na odlišné litologické a geomorfologické poměry povodí.

Poděkování

Autoři by rádi poděkovali projektům NAZV QK22010189 DEFOREST „Vliv odlesnění na vodní režim malých povodí“ a NAZV QL24010054 „Dopady klimatické změny na malá lesní povodí a možnosti jejich zmírnění prostřednictvím lesnického managementu a vodohospodářských opatření“, bez jejichž podpory by článek vznikl mnohem déle a komplikovaněji. Stejně tak patří poděkování DKRVO (Dlouhodobá koncepce rozvoje výzkumné organizace na období 2023–2027) ČHMÚ, zejména oblastem 6 a 12.



Obr. 7. Antropogenní diskonektivity vyskytující se v povodí Slaviče: a) staré opevnění břehu v horním úseku hlavního toku Slaviče; b) stabilizační stupeň ve spodní části hlavního toku Slaviče; c) retenční přehrážka vybudovaná na Ropičném potoce; d) stará retenční přehrážka v pramenné části hlavního toku Slaviče

Obr. 7. Anthropogenic disconnectivity within the Slavič catchment: a) old embankment on the upper part of the Slavič stream; b) stabilization step on the lower part of the Slavič stream; c) retention barrier build on the Ropičný stream; d) old retention barrier on the source area of the Slavič stream

Literatura

- [1] BRIERMAN, P. R., MONTGOMERY, D. R. *Key Concepts in Geomorphology*. New York: Freeman, 2014.
- [2] FRYIRS, K. A., BRIERLEY, G. J., PRESTON, N. J., KASAI, M. Buffers and Blankets: The (Dis)connectivity of Catchment-Scale Sediment Cascades. *Catena*. 2007, 53, s. 49–67.
- [3] KONDOLF, G. M. Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. *Environmental Management*. 2017, 21, s. 533–551.
- [4] BATISTA, P. V. G., LACEBY, J. P., DAVIES, J., CARVALHO, T. S., TASSINARI, D., SILVA, M. L. N., CURI, N., QUINTON, J. N. A Framework for Testing Large-Scale Distributed Soil Erosion and Sediment Delivery Models: Dealing with Uncertainty in Models and the Observational Data. *Environmental Modelling & Software*. 2021, 137, 104961. 494 s. ISBN 1429238607.
- [5] CHO, S. J., WILCOCK, P., GRAN, K. Implementing Landscape Connectivity with Topographic Filtering Model: A Simulation of Suspended Sediment Delivery in an Agricultural Watershed. *Science of the Total Environment*. 2022, 836, 155701.
- [6] UNUCKA, J. Modelování vlivu lesa na srážkoodtokové vztahy a vodní erozi s pomocí GIS. *Vodní hospodářství*. 2008, 7, s. 225–231.
- [7] HOLUŠA, O. et al. *Lesy Karpat České republiky*. Vydání první. Brandýs nad Labem: Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, 2020. ISBN 978-80-88184-32-4.
- [8] POLÁŠEK, J. Nádře na plavení dřeva v povodí řeky Morávky. *Informační zpravodaj ČAS, pobočky pro severní Moravu a Slezsko*. 2007.
- [9] CAVALLI, M., TREVISANI, S., COMITI, F., MARCHI, L. Geomorphometric Assessment of Spatial Sediment Connectivity in Small Alpine Catchments. *Geomorphology*. 2013, 188, s. 31–41.
- [10] Chang, M. *Forest Hydrology. An Introduction to Water and Forests*, Third Edition. 2013. 598 p. ISBN 978-1-4665-8667-3.
- [11] BAGNOLD R. A. An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics. *US Geological Survey Professional Paper*. 1966, 422-1, s. 1–37.
- [12] GALIA, T., ŠKARPICH, V., RUMAN, S. Impact of Check Dam Series on Coarse Sediment Connectivity. *Geomorphology*. 2021, 377, 107595.
- [13] GALIA, T., ŠKARPICH, V., RUMAN, S., MACUROVÁ, T. Check Dams Decrease the Channel Complexity of Intermediate Reaches in the Western Carpathians (Czech Republic). *Science of the Total Environment*. 2019, 662, s. 881–894.
- [14] GALIA, T., ŠKARPICH, V. Do the Coarsest Bed Fraction and Stream Power Record Contemporary Trends in Steep Headwater Channels? *Geomorphology*. 2016, 272, s. 115–126.
- [15] MCCUEN, R. H. *Hydrologic Analysis and Design*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2005. 859 s. ISBN 0-13-142424-6.
- [16] WOLMAN, M. G. A Method of Sampling Coarse Bed Material. *American Geophysical Union Transactions*. 1954, 35, s. 951–956.

Autoři

Mgr. Tereza Macurová^{1,2}

✉ tereza.macurova@chmi.cz

Ing. Antonín Kohut^{1,3}

✉ antonin.kohut@chmi.cz

Doc. RNDr. Jan Unucka, Ph.D.¹

✉ jan.unucka@chmi.cz

ORCID: 0000-0003-4339-0726

Ing. Lenka Petrušková, Ph.D.¹

✉ lenka.petruskova@chmi.cz

RNDr. Martin Adamec, Ph.D.¹

✉ martin.adamec@chmi.cz

Ing. Irena Pavlíková¹

✉ irena.pavlikova@chmi.cz

¹Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ostrava

²Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta Ostravské univerzity

³Katedra geologického inženýrství, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Příspěvek prošel lektorským řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2024.03.003

ISSN 0322-8916 (print), ISSN 1805-6555 (on-line) © 2024 Autoři. Tuto práci je kdokoli oprávněn šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0.

VERIFYING THE APPLICABILITY OF METHODS FOR MODELLING EROSION AND CONNECTIVITY OF SEDIMENTS IN THE SLAVÍČ CATCHMENT IN THE MORAVIAN-SILESIA BESKYDY MOUNTAINS BASED ON GEOMORPHOLOGICAL MAPPING OF FLUVIAL PROCESSES

MACUROVÁ, T.^{1,2}; KOHUT, A.^{1,3}; UNUCKA, J.¹; PETRUŠKOVÁ, L.¹; ADAMEC, M.¹; PAVLÍKOVÁ, I.¹

¹Czech Hydrometeorological Institute, Ostrava Branch

²Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, University of Ostrava

³Department of Geological Engineering, Faculty of Mining and Technology, VSB Technical University of Ostrava

Keywords: Slavíč catchment – Moravian-Silesian Beskydy Mountains – erosion – fluvial processes – stream network disconnectivity

As part of the research activities of the Hydrology Department of the CHMI Ostrava, field investigations and measurements are being carried out in several catchments to verify the outputs of GIS tools, empirical formulas and mathematical models focused on surface runoff, fluvial erosion and sediment transport. The main emphasis is placed on the influence of deforestation and land use changes on rainfall-runoff relations and fluvial erosion, especially within the framework of the NAZV “*DEFOREST*” and “*CLIMCFOR*” projects, on which CHMI collaborates with the Forestry and Game Research Institute (VÚLHM), the Bishopric of Ostrava-Opava and Water Management Development and Construction joint stock Company (VRV). The presented article deals with the possibilities of analysing the fluvial processes and the disconnection of flows in the Slavíč catchment in the Moravian-Silesian Beskydy Mountains. ESRI ArcGIS and GRASS GIS tools were used for these analyses. Field verification of outputs took place at several sampling points within the main stream Slavíč.

