MODELOVÁNÍ POVRCHOVÉHO ODTOKU V EXTRÉMNÍM RELIÉFU

Vladimír Fárek[1]

Abstrakt

Význam modelování povrchového odtoku spočívá zejména v nalezení míst ohrožených lokálními záplavami z přívalových dešťů (flash floods) a erozí. K určování míst se zvýšenými hodnotami akumulace povrchového odtoku se používá celá řada rozdílných algoritmů dělitelných do řady skupin, dle různých kritérií. V reliéfu s rychlým střídáním konvergentních a divergentních tvarů, značnými výškovými rozdíly, zlomy, narušenými údolnicemi apod. může na jednu stranu docházet ke značně vysokým lokálním hodnotám akumulace povrchového odtoku a zároveň je zde modelování povrchového odtoku složitější, než v mírně zvlněné krajině. Za použití postupů implementovaných v geografickém informačním systému GIS jsou v příspěvku demonstrovány vlastnosti jednotlivých algoritmů v extrémním reliéfu a jejich případná použitelnost pro analýzu území z hlediska ohrožení erozí či lokálními záplavami, prostřednictvím DEM (Digital Elevation Model).

Klíčová slova: povrchový odtok, modelování, DEM, GIS GRASS

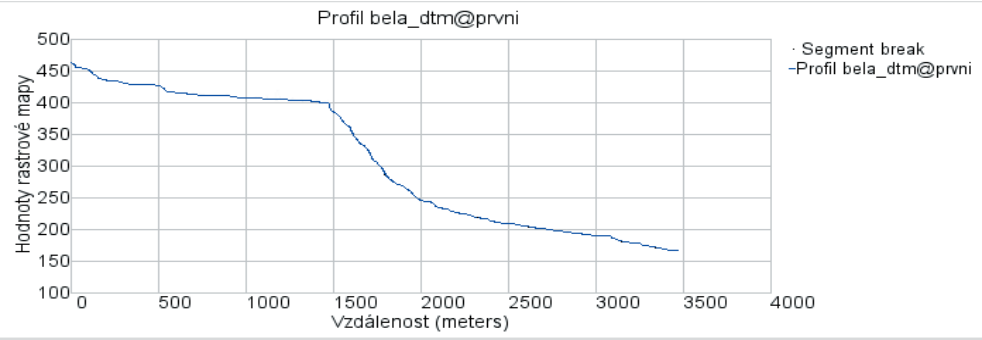
1. Úvod

Povrchový odtok vzniká překročením infiltrační kapacity půdy (infiltration excess – Hortonův odtok), překročením retenční kapacity - odtok ze saturace (saturation excess – Dunneho odtok) a opětovnou exfiltrací vody v nižších částech svahu (return flow). Jednotlivé podtypy povrchového odtoku jsou ovlivněny předchozí a aktuální srážkovou činností, infiltračními schopnostmi půdy, vegetačním krytem a dalšími faktory, jejichž exaktní stanovení a kvantifikace jsou v praxi obtížné. Pohyb vody po povrchu reliéfu je mj. determinován morfologickými parametry terénu. V případě extrémního reliéfu se v pohybu vody po reliéfu uplatňují reliéfní prvky jako hrany, ostré zlomy, údolnice s nejasným průběhem, či porušené sesuvy balvanů atd. Je zřejmé, že správné určení směrů proudění – flow direction a akumulace povrchového odtoku - flow accumulation je v takovémto typu terénu podstatně obtížnější, než v mírně zvlněné krajině. Ve vertikálně výrazně členěném reliéfu může i u malých povodí docházek k vyšší koncentraci povrchového odtoku s řadou negativních jevů. Jde zejména o erozní procesy, poškozování místních komunikací, lokální záplavy s rychlým průběhem (flash floods). Je tedy účelné disponovat nástroji, kterými je možno určit kritická místa v povodí a to bez nutnosti mít aktuální data o složení a stavu vegetačního krytu, infiltračních schopnostech půdy a její saturaci a drsnosti reliéfu. V geografickém systému GIS GRASS se nachází několik nástrojů (modulů), jež umožňují zkoumat digitální výškový model terénu (DEM) z hlediska směrů proudění a akumulace povrchového odtoku. Tyto nástroje se liší použitými algoritmy, požadavky na vstupní data i použitelností výstupů v extrémním reliéfu. Cílem práce bylo stanovit, zda a které tyto nástroje jsou v extrémním reliéfu použitelné a jak jejich výstupy korespondují s realitou. Jako modelový region bylo vybráno povodí Suché Bělé v Národním parku České Švýcarsko.

2. Popis modelového území

Povodí Suché Bělé je na hranicích se SRN cca 2 km SV od Hřenska. Je součástí hydrogeologického rajonu 4660 – Křída dolní Kamenice a Křinice. Je součástí povodí s číslem hydrologického pořadí 1-14-05 Kamenice a Labe pod Kamenicí. Zdrojnicí Suché Bělé je mokřina v pískovcových soutěskách v nadmořské výšce mezi 400 – 450 m n. m. Ve střední části na vzdálenosti cca 500 m tok klesá o 150 m – viz Obr. 1. V dolní části toku se

nachází dva retenční rybníky, pod nimi je tok místy zpevněn kamenným opevněním. Suchá Bělá se vlévá do Dlouhé Bělé a po cca 800 m do Kamenice. Délka toku je přibližně 3500 m. Plocha povodí po soutok se Suchou Bělou odvozená modulem r.watershed činí 253,48 ha.



Obr. 1: Podélný výškový profil toku Suché Bělé

3. Základní principy modelování povrchového odtoku z hodnot DEM

Pomocí různých algoritmů se z digitálního výškového modelu území (dále DEM) získávají parametry Flow direction (dále FD) - směr odtoku a následně Flow accumulation (dále FA) – akumulace odtoku. FD určuje způsob, směr jakým je uskutečněn odtok z buňky do další/dalších níže položených buněk a globálně tak modeluje tok materiálu terénem. Takto lze hovořit o cestě, dráze odtoku – flow path. FA potom určuje, kolik materiálu (vody) proteče každou buňkou. Čili kolik buněk je odvodňováno přes konkrétní buňku. Protože jsou buňky navzájem spojené, lze určit kumulativní množství materiálu, který projde každou buňkou. Je-li hodnota každé buňky rovna jedné, lze hovořit o upstream element map. Po vynásobení každé buňky patřičným akumulačním operátorem lze určit množství materiálu, který projde buňkou v (kvazi)reálném prostředí. V principu se FD určuje dvěma skupinami metod:

SFD – Single flow direction – každá buňka má odtok pouze do jedné sousední, níže umístěné buňky.

MFD – Multiple flow direction – odtok z buňky je umožněn do více níže položených buněk, disperzní odtok.

FD je řešen v rastru 3x3 buňky a oba principy (MFD a SFD) jsou řešeny řadou algoritmů. Nejjednodušším je SFD algoritmus D8, kdy je odtok realizován do jedné z 8 sousedních buněk s nejvyšším rozdílem výšek (∂z). Diagonální buňky jsou násobeny $\sqrt{2}$, aby byla kompenzována jejich nižší ∂z. U varianty RhoD8 je diagonálním buňkám přiřazována pseudonáhodná hodnota (s průměrem $\sqrt{2}$) , u varianty D∞ je pak odtok umožněn do jedné buňky, ale v (relativně) jakémkoliv úhlu (0-360°). U MFD je odtok pomocí různých algoritmů realizován do více buněk, zpravidla dle váhy vycházející z míry jejich ∂z vůči středové buňce. Od těchto základních principů je odvozena řada algoritmů i teoretických prací, implementovaných v různých SW (HEC, GIS GRASS, SAGA GIS, uDig, ArcInfo, MIKE-SHE, aj.). V momentě, kdy je uspokojivě realizován rastr se směry a akumulacemi odtoků, local drain direction map, je možné pro získání reálného odtoku vynásobit buňky příslušnými akumulačními operátory. Ty podle použitého SW různými postupy a za použití řady rovnic (Saint Venant, Manning, Green-Ampt, aj.) popisují a vyčíslují zbylé skupiny dat.

4. Analýza v prostředí GIS GRASS

Základním materiálem pro práci je DEM pořízený leteckým snímkováním v rámci projektu Interreg IIIA: Geoinformation Networks For The Cross-Border National Park Region Saxon-Bohemian Switzerland. Snímky byly pořízeny v režii Technické Univerzity Drážďany v roce 2005. Tento DEM se vyznačuje vysokou přesností (rozlišení 1m ve všech osách) i kvalitně provedeným postprocesingem. Z důvodů značné velikosti zdrojových dat (v řádech GB) je DEM rozdělen do několika souborů. Vhodné povodí pro modelování je třeba vytipovat tak, aby splňovalo několik hlavních požadavků: přiměřená velikost z důvodů výpočetní

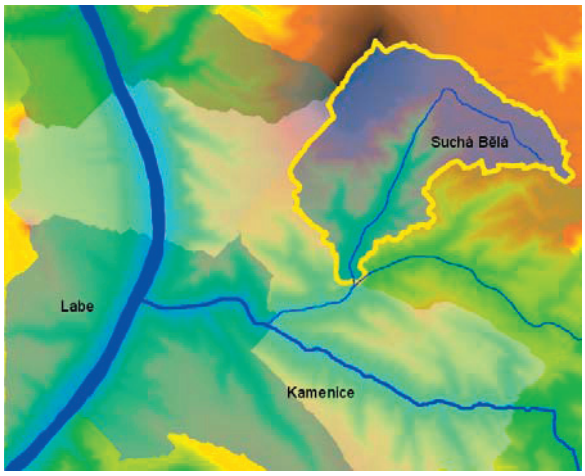
náročnosti, co nejnižší míra antropogenního ovlivnění, extrémní reliéf, DEM pro kompletní povodí. Na základě těchto požadavků byla vybrána Suchá Bělá po soutok s Dlouhou Bělou.

Dalším krokem je spojení mapových listů (souborů) daného regionu pomocí modulu r.patch. Následuje určení hranic zkoumaného povodí. V několika krocích je třeba nalézt vhodnou hodnotu parametru „threshold“ (viz dále) v modulu r.watershed a s jeho pomocí určit rozvodnice. Následně došlo k oříznutí základního DEM v modulu r.mapcalc tak, aby byl tvořen pouze povodím Suché Bělé a ostatní hodnoty byly NULL (no data). Kontrola kvality rastru byla provedena pomocí modulů r.fill.null a r.fill.dir. Zde se projevila kvalita rastru i jeho následných úprav, ale i značná extremita terénu s balvany v údolnici. Modul r.fill.dir nalezl 3803 problémových oblastí (depresí) u nichž lze vzhledem k jejich poloze a reliéfu očekávat, že odpovídají realitě. Některé deprese byly ověřeny rekognoskací in situ. Pro porovnání vypočtených rastrů drah odtoku a akumulace odtoku bylo třeba zvolit vhodný způsob podkladového rastru, odvozeného z DEM, který by vizuálně dobře vystihoval význačné morfologické prvky reliéfu (hřbetnice, údolnice, zlomy, hrany). Jako ideální se ukázalo prosté provedení parciálních derivací DEM ve směru osy x nebo y (z vizuálního hlediska rovnocenné výsledky). K tomuto účelu byl použit modul r.slope.aspect.Na takto připravených datech je možno zahájit vlastní analýzy pomocí jednotlivých modulů. Jako první se použije modul r.watershed.

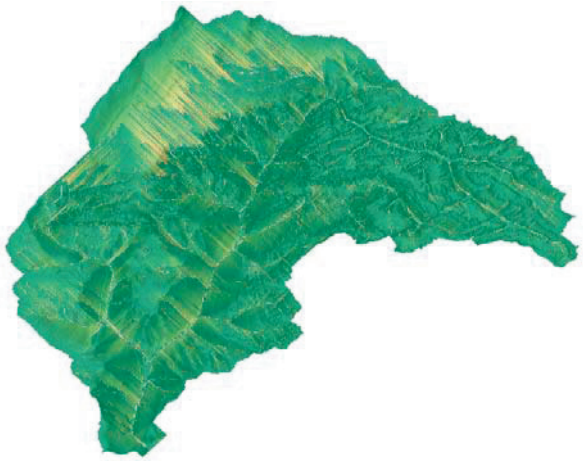
R.watershed je analytický nástroj pro vyhodnocování velkých povodí, výpočetně náročnější, než r.terraflow. Je méně citlivý na chyby v DEM. Používá obdobný algoritmus jako r.drain – jde o variantu least-cost algoritmu označovanou jako A^T (v původní formě šlo jen o hledání nejkratší cesty mezi body). Výstupem jsou hranice povodí, FD/FA v jednotlivých buňkách a faktory sklonu a délky svahu, které slouží mj. jako vstup pro erozní model RUSLE (L a S faktory). Celkový výstup rastrů pro schematizaci povodí je silně ovlivňován parametrem threshold. Ten určuje minimální velikost odvodňovaných povodí, ale projevuje se i na rastru toků (streams). Obecně lze říci, že malé hodnoty parametru threshold vedou k roztříštěnosti a fragmentizaci povodí, ale tvoří relativně spojité linie toků. Kromě morfologie území je jeho hodnota závislá i na rozlišení zkoumaného rastru. Je třeba počítat s tím, že optimální hodnotu parametru threshold je třeba najít kombinací odhadu a metody pokus-omyl pro každý zkoumaný region.

Při použití na povodí Suché Bělé se negativně projevilo použití SFD algoritmu. Došlo ke vzniku uměle působících fragmentů. V místech s malou změnou expozice či tangenciální křivosti svahu došlo ke vzniku paralelních linií – drah odtoku a následné akumulace odtoku, viz Obr. 3. Zde se projevila tendence SFD algoritmů k diskretizaci linií odtoku v plochém reliéfu. Rovněž se (byť v mnohem nižší míře než u r.flow) projevila mírně omezená schopnost překonávat deprese či plochy bez výrazného spádu.

Jako další byl použit modul r.flow. R.flow je modul s kombinovaným výstupem – vektorově jsou prezentovány dráhy odtoku, rastrově potom délky drah a hustota drah odtoku. Flow routing je v principu řešen algoritmem DInf. (D∞), jedná se tedy o SFD metody výpočtu, bez možnosti disperzního toku, nicméně nevytváří nepřirozené cik-cak linie, běžné u D8 modulů. Je navržen zejm. pro získávání hodnot pro modelování eroze. K určování sítě toků je vhodný pouze při použití kvalitních (postrádajících deprese) rastrů s vysoký rozlišením. Hodnota „flowlines downhill“ metodou dešťových kapek simuluje aktuální tok – je vhodná k určování oblastí potenciálních vodních přívalů. Použití D∞ algoritmu dávalo dobré předpoklady pro kvalitní výstupy ve složitém terénu. Bohužel toto se zcela nepotvrdilo. Modul r. flow je primárně určen pro analýzu svahů z hlediska eroze, ale bohužel má velmi přísné parametry pro ukončování linií drah odtoku. Dochází tak ke generování nereálných míst, bez odtoku. Přestože ve strmých svazích tento modul dává velmi dobré výsledky, v důsledku předčasného ukončování drah odtoku modul velmi výrazně podhodnocuje akumulaci povrchového odtoku – viz Tab. 1.



Obr. 2: Rozdělení zájmové oblasti na povodí pomocí modulu r. watershed, zobrazeno na pozadí DEM. Povodí Suché Bělé zvýrazněno. Vlevo kaňon Labe, v dolní části Kamenice.



Obr. 3: Akumulace povrchového odtoku dle modulu r.watershed na pozadí reliéfu získaného derivací DEM. V levém horním okraji patrné umělé struktury SFD algoritmu D 8.

Jako třetí byl testován modul r.terraflow. R.terraflow je navržen zejm. pro vyhodnocování velkých rastrů. Používá MFD (defaultně) i SFD (D8) algoritmy pro určování FD a následně FA. Na rovinách počítá s globálním tokem, single-cell pits jsou nejprve zaplaveny (generuje i depressionless mapu), potom je na nich aplikován globální tok. V případě analýzy Suché Bělé byla použita varianta s MFD algoritmem. Výsledné rastry FD a FA, ale i rastry vlhkostního indexu tci a rastr DEM s vyhlazenými depresemi jsou dobře použitelné. Následně bylo vybráno několik prvků z mapy FA a byly ověřeny v terénu. V místech s vysokou akumulací povrchového odtoku byly potvrzeny erozní či ronové rýhy, či eroze hrabanky – viz Obr. 4. V údolnicích, kde některé fragmenty budily dojem chyb výpočtu či chyb v původním DEM, se nalezly kamenné bloky zřícené na dno údolí.

5. Diskuze

Ukazuje se, že jednotlivé moduly mohou poskytovat velmi dobré dílčí výsledky (použitelné pro další analýzu) a zároveň v jiných oblastech analýz částečně, či zcela selhávat. Je proto nezbytné kombinovat více modulů a využívat jejich dílčích schopností k získání komplexního obrazu území. Modul r.watershed i v obtížném terénu plném zlomů velmi dobře detekuje hranice povodí a při použití kvalitního DEM je výborným nástrojem pro rychlé určování rozvodnic v terénu. Pro ověření lze využít faktu, že u modulů počítajících akumulaci povrchového odtoku musí být hodnota buněk přiléhajících k rozvodnici rovna 1. Při porovnání s rozvodnicemi používanými v rámci ČHMÚ a odvozenými pomocí GIS platformy ESRI se r.watershed v daném území ukázal jako přesnější. Otázkou zůstává, nakolik je toto dáno použitým algoritmem a nakolik vysokou kvalitou rastru DEM, se kterým pracoval. Naopak v oblasti určování směrů a akumulace povrchového odtoku modul díky svému SFD D8 algoritmu v obtížném terénu nedává zcela dobré výsledky. Modul r.flow dává výborné výsledky na nepřerušených prudkých svazích. V místech zpomalení toku, ale i na hřbetnicích, dochází k ukončování flow lines a modul počítá akumulaci povrchového odtoku „od začátku“. Tento fakt je zjevný i z tabulky č. 1, kde jsou zřejmé podstatně nižší hodnoty maxima, aritmetického průměru a kumulativního součtu hodnot povrchové akumulace ve srovnání s moduly r.terraflow a r.watershed. Nejlepší výsledky v modelování FD i FA v extrémním reliéfu dává modul r.terraflow. Dráhy odtoku nejsou náchylné na přerušení a postrádají „umělý“ vzhled generovaný SFD algoritmy. Při ověřování míst, kde modul generuje vysokou akumulaci povrchového odtoku, lze v terénu skutečně nalézt stopy, že k ní dochází – viz Obr. 4. Modul si poradí i lesními cestami, popř. umožňuje vložit mapu bariér odtoku.

Tab. 1: Základní statistiky hodnot akumulace povrchového odtoku pro jednotlivé moduly; celkový počet buněk 2534825

Název modulu	Minimum	Maximum	Aritmetický průměr	Kumulativní součet hodnot
r.flow	0	116690	115,69	293230155
r.watershed	1	2473320	1456,00	3691995602
r.terraflow	1	2476290	1750,69	4437680870

6. Závěr

Z výše uvedených analýz vyplývá několik zajímavých faktů, týkajících se obecně modelování povrchového odtoku v extrémním reliéfu i jednotlivých algoritmů. Zcela fundamentálním problémem je existence dostatečně kvalitního rastru. Kvalitu lze zejména chápat ve smyslu vysokého rozlišení, absence depresí, vzniklých při tvorbě rastru a nepřerušených údolnic. Zásadní je zejména přesnost ve vertikálním směru. Z tohoto důvodu je např. běžně používaný DEM v DMU25 prakticky nepoužitelný. Kvalitní mapa FD a FA může být po získání dalších údajů o území (land cover, infiltrační schopnosti půd, drsnost reliéfu...) dále precizována za pomocí mapové algebry či specializovaných SW nástrojů. V prostředí GIS GRASS by se jednalo zejména o moduly r.sim.water a r.topmodel. Obecný postup pro modelování FA a FD povodí v extrémním reliéfu lze shrnout do série kroků (v závorkách moduly GIS GRASS pro uvedené činnosti):

1) Získání kvalitního rastru, vč. spojení, oříznutí, zaplnění neexistujících depresí a kontrola v terénu (r.patch, r.watershed, r.mapcalc, r.fill.dir, r.fill.null).
2) Vizuální zvýraznění význačných terénních prvků. Stačí derivace DEM v osách x či y (r.color, a r.slope.aspect).
3) Vlastní analýza FA a FD a porovnání s vhodně upraveným rastrem DEM (r.terraflow, r.watershed, r.flow, popřípadě spolu s dalšími vstupy i moduly r.sim.water, r.topmodel)
4) Základní vyhodnocení hodnot FA (r.univar, r.stat atd.)
5) Ověření modelovaných hodnot v terénu.

V extrémním reliéfu se projevila převaha MFD algoritmů. Dalším důležitým parametrem je schopnost algoritmu překonávat místa s minimálním či žádným spádem a udržet tak linie toku (flow path). Velmi dobré výsledky lze očekávat i u aplikace D∞ MFD algoritmu. Závěrem je třeba zmínit slibně se vyvíjející projekt SAGA GIS (Univerzita v Göttingenu a Hamburgu), který disponuje celou řadou variant výše zmíněných algoritmů (např. Braunschweiger Reliefmodell, Kinematic Routing Algorythm, Digital Elevation Model Network - DEMON).

Literatura

[1] HRÁDEK, F. – KUŘÍK, P., 2004. Hydrologie, Fakulta lesnická a enviromentální, Česká zemědělská univerzita v Praze.

[2] JUŘÍKOVSKÁ, L.,2005. Modelování hydrologických a hydrogeologických procesů v systému Grass GIS, VŠB Ostrava.

[3] KONEČNÝ, D., 2006. Srovnání SFD/MFD algoritmů a jejich využití při modelování geomorfologických procesů, Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci.

[4] LANGHAMMER, J., et al., 2007. Změny v krajině a povodňové riziko“. Sborník semináře “Povodně a změny v krajině”. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Praha.

[5] MITASOVA, H.,1999. Multiscale simulation od landuse impact on soil erosion and deposition patterns. Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organisation Meeting. Purdue University.



Obr. 4: Místo se zvýšenou akumulací povrchového odtoku (r.terraflow) - ověření v terénu. Patrná erozní rýha

[6] MITASOVA, H., et al., 2005. Path sampling metod for modeling overland waterflow, sediment, transport, and short term terrain evolution in Open Source GIS , Department of Marine, Earth and Atmospheric Sciences, North Carolina State University. http://skagit.meas.ncsu.edu

[7] NETELER, M. – MITASOVA, H., 2008. Open Source GIS; A Grass GIS Approach – Third Edition“. Springer Science.

[8] PACINA, J., Prostorové analýzy nad oblastí Šumavských jezer. Západočeská univerzita, Plzeň.

[9] THAXTON, C. – MITASOVA, H., 2004. Simulations of Disturbed Watershed, Erosion, Deposition and Terrain Evolution Using Path Sampling Monte Carlo Method. Sborník Proceedings ASAE/CSAE, Meeting 2004, Ottawa.

[10] Manuálové stránky GIS Grass verzí 6.3 a 6.4 <http:/www.grass.itc.it/gdp/manuals.php>

Kontakty na autora

1 Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie, e-mail: farek@chmi.cz