

Modelování povrchového odtoku v extrémním reliéfu

Vladimír Fárek¹, Jan Unucka²

1Katedra geografie a geologie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Albertov 6,
128 43 Praha 2, ČR
farek@chmi.cz

2 Institut geologického inženýrství, Hornicko-geologická fakulta, Vysoká škola báňská, 17. listopadu 15,
708 33 Ostrava-Poruba, ČR
jan.unucka@vsb.cz

Abstrakt. Modelování povrchového odtoku je jedním z důležitých témat hydrologického modelování. Co nejpřesnější podchycení míry povrchového odtoku během srážkoodtokových epizod je také důležitým úkolem hydrologické prognózy, kterou v ČR zajišťuje dle legislativního rámce ČHMÚ v součinnosti s podniky Povodí. Hodnota povrchového odtoku se stává významným údajem zejména během extrémních přívalových srážek. Proto je nutné hledat a používat adekvátní nástroje jak na úrovni GIS, tak na úrovni hydrologických modelů. Pro stanovení povrchového (Hortonovského) odtoku slouží v GIS GRASS několik modulů, které se liší buď v použitých algoritmech (SFD, MFD) nebo v množství výstupních rastrů, které je schopen daný modul vyprodukovat. Mezi nejpoužívanější patří moduly r.flow, r.terraflow, r.watershed a r.sim.water (SIMWE). Jedná se o moduly pro práci s rastrovými daty, v případě r.sim.water se pak jedná o distribuovaný hydrologický a dynamický erozní model. Své ekvivalenty tyto moduly nacházejí i u nástrojů operativní hydrologické prognózy – v rámci Hlásné a předpovědní povodňové služby se jedná o semidistribuovaný srážkoodtokový model HYDROG. Z komplexních plně distribuovaných modelů, které jsou schopny povrchový odtok generovat na úrovni srážkoodtokových epizod lze jmenovat MIKE SHE a GSSHA. Předkládaný příspěvek se snaží o srovnání těchto nástrojů na dílčích povodích v extrémním reliéfu NP Česko-Saské Švýcarsko. Cílem je demonstrovat možnosti hydrologické prognózy v podobných extrémních polohách tak, aby bylo nastíněno, jak úspěšně lze v podobných územích modelovat a předikovat výskyt standardních i extrémních hydrologických situací.

Clíčová slova: povrchový odtok, reliéf, modelování, GIS Grass, MIKE SHE, GSSHA.

Abstract. Surface runoff modeling in extreme geomorphological relief. Surface runoff modeling is one of the important issues of hydrologic modeling. Accurate underpinning of the surface runoff volume during the rainfall-runoff episodes is the important duty of the hydrologic forecast service, which operates in Czech Hydrometeorological Institute together with catchment administration organizations. Surface runoff value is important factor during the severe storms and flash floods particularly. Searching and utilization of adequate software tools from GIS and numerical models range is necessary from that point of view. Several tools exist for surface runoff (Horton runoff) value determination in GIS GRASS. These tools mainly differ in used algorithms and in the possibilities of production of the output rasters. R.flow, r.terraflow, r.watershed and r.sim.water (SIMWE) are most used and best known modules. These modules are mainly raster modules within the GRASS platform but r.sim.water is also rainfall-runoff and dynamical erosion model. In hydrologic forecast service they have their equivalents in semidistributed rainfall-runoff model HYDROG. Complex and fully distributed models, which can produce raster of the surface runoff are MIKE SHE and GSSHA. This article makes an effort in comparison of such tools in subbasins of the extreme relief of Cesko-Saske Sycarsko National Park. Demonstration of possibilities of such tools in this type of relief shows, how proper hydrological forecast could be using these tools during both standard and extreme hydrological situations.

Keywords: surface runoff, overland flow, modeling, GIS Grass, MIKE SHE, GSSHA

1

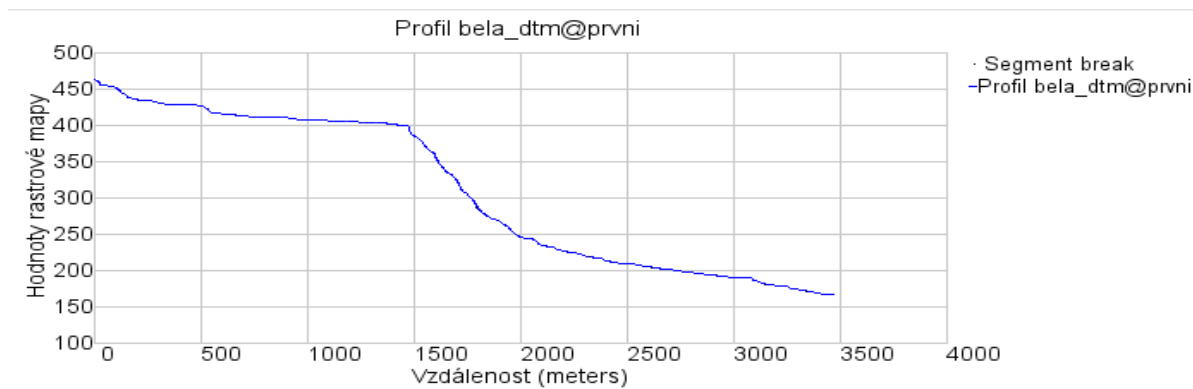
Úvod

Povrchový odtok je spolu s podzemním odtokem (jež se dále dělí na hypodermický odtok-interflow a odtok v nasycené zóně) složkou základního odtoku z povodí. 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 mnoha dalšími faktory, jejichž exaktní stanovení a kvantifikace jsou v často praxi obtížné. Pohyb vody po povrchu reliéfu je 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, sesuvy. Je zřejmé, že správné určení směrů proudění – flow direction a akumulace povrchového odtoku - flow accumulation je v takovémto typu terénu obtížnější, než v mírně zvlněné krajině. Ve vertikálně výrazně členěném reliéfu může i u malých povodí docházet ke značné koncentraci povrchového odtoku s negativními jevy, jako erozní procesy, poškozování místních komunikací, lokální záplavy s rychlým průběhem (flash floods). Proto je účelné disponovat nástroji, kterými je možno spolehlivě vytipovat 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 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 podobném typu 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 se nachází 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. v oblasti nazývané Jelení louže. Tato slatina je orientována přibližně v západovýchodním směru. V prostoru pod vrchem Grosse Winterberg (jehož jiho-východní svahy povodí Suché Bělé drénuje) se její tok stáčí k jihu a dramaticky se mění spád. Na vzdálenosti cca 500m tok klesá o cca 150m – viz obr. 1. V závěrečné části toku s menším spádem se nachází dva retenční rybníky a pod nimi je koryto od roku 2008 částečně zpevněno kamenným opevněním. Suchá Bělá se vlévá do Dlouhé Bělé a po cca 800m do Kamenice. Délka toku činí přibližně 3500 m. Plocha povodí po soutok se Suchou Bělou odvozená modulem r.watershed činí 253,48 ha. Na řadě míst, zejména na středním toku, je Suchá Bělá po většinu roku takřka bez vody v korytě a voda je odváděna pískovcovými kolektory a puklinami.



Obr. 1. Podélný profil toku Suché Bělé.

3 Principy modelování povrchového odtoku z hodnot DEM

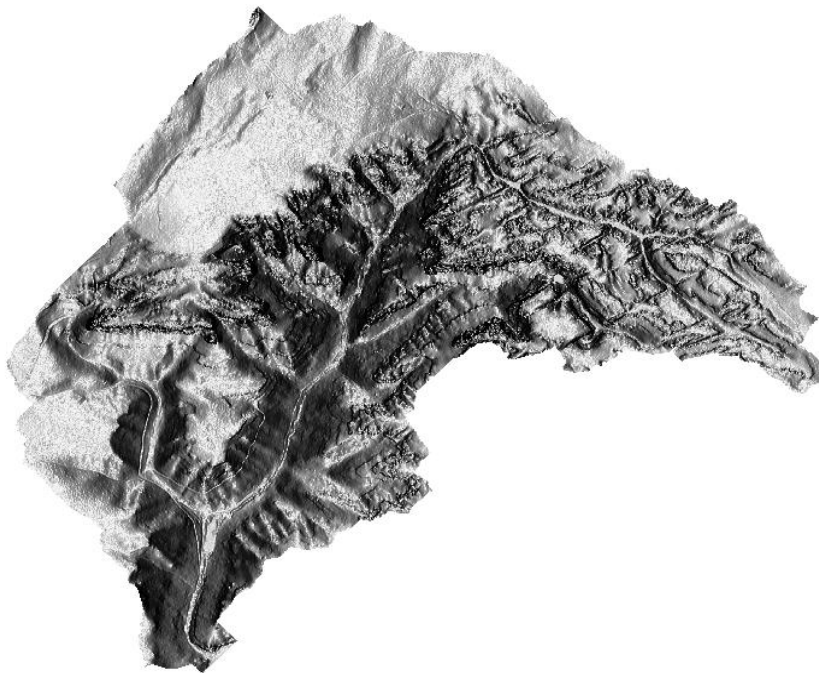
Pomocí různých algoritmů se z digitálního výškového modelu území (dále DEM) získávají parametry Flow direction (dále FD) - směr odtoku a následně Flow accumulation (dále FA) – akumulace odtoku. FD určuje způsob, směr jakým je uskutečněn odtok z buňky do další/dalších níže položených buněk a globálně tak modeluje tok materiálu terémem. 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 8mi 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. 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 akumulacími operátory. Ty podle použitého modelu různými postupy a za použití řady rovnic (Saint Venant, Manning, Green-Ampt...) popisují a vyčíslují zbylé skupiny dat.

Požadavky na kvalitu DEM:

- Dostatečné rozlišení nejen v horizontálním směru, ale zejm. ve vertikálním. Z tohoto pohledu je běžně používaný DMÚ 25 zcela nepoužitelný.
- Neporušené údolnice (vznikají zejména je-li šířka údolnice menší než rozlišení DEM)
- Deprese vzniklé špatnou interpolací při tvorbě DEM
- One-cell pits - u některých typů interpolace se objevuje ztráta údaje o výšce v jednotlivých buňkách



Obr. 2. DEM Suché Bělé se zvýrazněnými geomorfologickými prvky pomocí první derivace v ose x.

4 Modelování povrchového odtoku v prostředí GIS GRASS

Základním materiálem pro práci byl výškový model terénu (dále DEM) pořízený leteckým snímkováním v rámci projektu Interreg IIIA: Geoinformation Networks For The Cross-Border National Park Region Saxon-Bohemian Switzerland. 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.

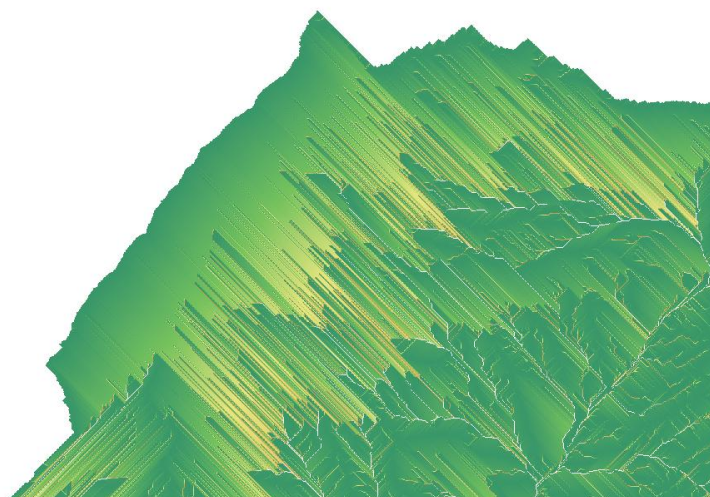
Dalším krokem je spojení mapových listů (souborů) regionu modulem `r.patch`. Následuje určení rozvodnic zkoumaného povodí – modulem `r.watershed`. Následně došlo k oříznutí základního DEM v modulu `r.mapcalc` tak, aby byl tvořen pouze povodím Suché Bělé a ostatní hodnoty byly NULL (no data). Kontrola kvality rastru byla provedena pomocí modulů `r.fill.null` a `r.fill.dir`. Zde se projeví 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 poloze a reliéfu očekávat, že odpovídají realitě. Některé deprese byly ověřeny rekognoskačí 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`.

5 Použití jednotlivých modulů GIS GRASS

`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). 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).

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 dlouhých přírodních linií – drah odtoku a následné akumulace odtoku, viz obr. Rovněž se (byť v mnohem nižší míře než u `r.flow`) projevila mírně omezená schopnost překonávat deprese či plochy bez výrazného spádu

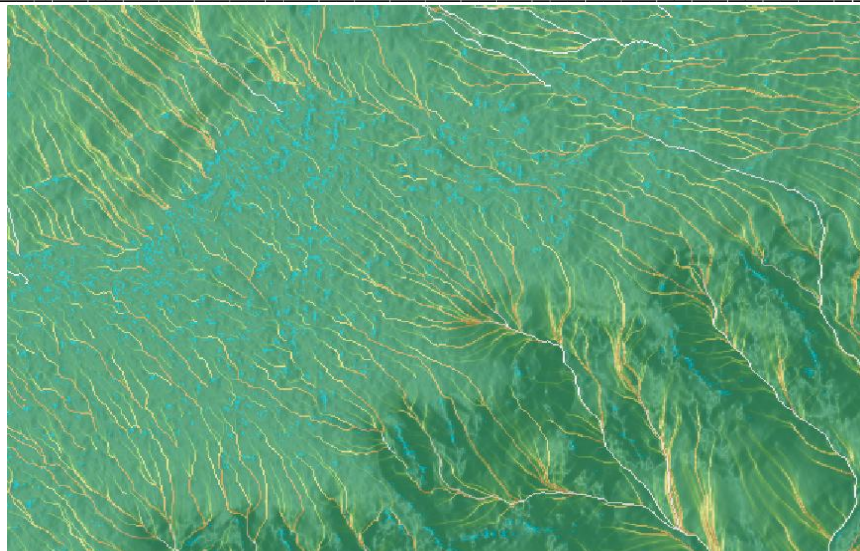


Obr. 3 Uměle působící linie při použití modulu `r.watershed`.

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 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. 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. Toto se zcela nepotvrdilo. Modul `r.flow` je primárně určen pro analýzu svahů z hlediska eroze, ale má velmi přísné parametry pro ukončování linií drah odtoku i akumulace. Dochází tak ke generování míst, bez odtoku, která mají nulovou hodnotu. 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. č.1. Na obr. je na detailu z mírného, plochého svahu Grosse Winterberg patrné předčasné ukončování linií toku a jeho akumulace.

Obr. 4 Předčasné ukončování drah odtoku na území s malým spádem u modulu `r.flow`.

Jako třetí byl testován modul `r.terraflow`. `R.terraflow` je navržen zejm. pro vyhodnocování velkých

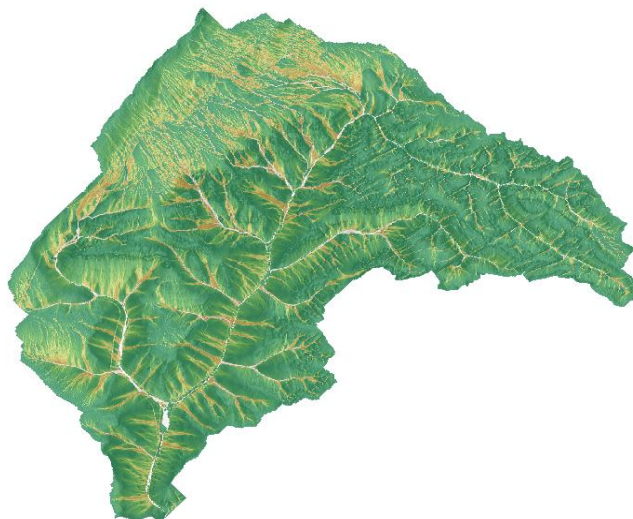


rasterů. Používá MFD (defaultně) i SFD (D8) algoritmy pro určování FD a následně FA. Na rovinách počítá s globálním tokem, single-cell pits jsou nejprve zaplaveny (generuje i depressionless mapu), potom je na nich aplikován globální tok. V případě analýzy Suché Bělé byla použita varianta s MFD algoritmem. Výsledné rastry FD a FA, ale i rastry vlhkostního indexu tci a rastr DEM s vyhlazenými depresiemi 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. V údolnicích, kde některé fragmenty budily dojem chyb výpočtu či chyb v původním DEM, se našly kamenné bloky zřícené na dno údolí.

Tabulka 1. Základní statistiky akumulace povrchového odtoku pro jednotlivé moduly. Počet buněk: 253482.

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

Obr. 5 Akumulace povrchového odtoku dle modulu r.terraflow na pozadí DEM.

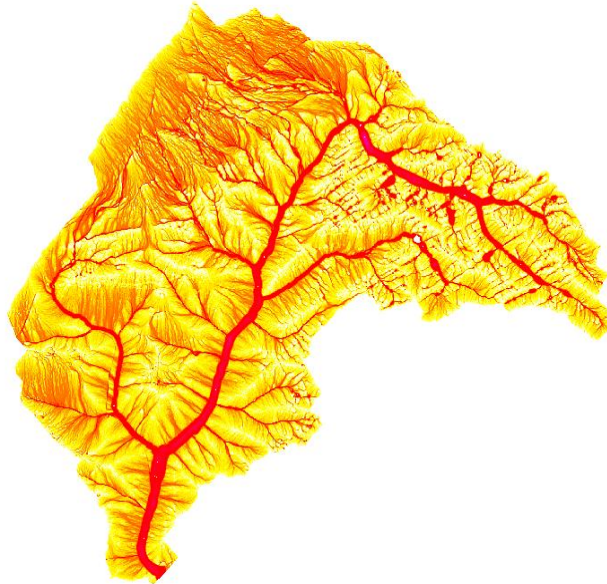


Modul r.sim.water (SIMWE) pracuje navíc s intenzitou efektivní srážky (ve smyslu srážka – infiltrace), Manningovým koeficientem drsnosti, popř. s mapou infiltrace a překážek odtoku.

R.sim.water v sobě obsahuje komplex rovnic. Zjednodušeně lze říci, že model kromě samotného DEM a zejména jeho derivací pro určení množství povrchového odtoku používá bivariantní formou

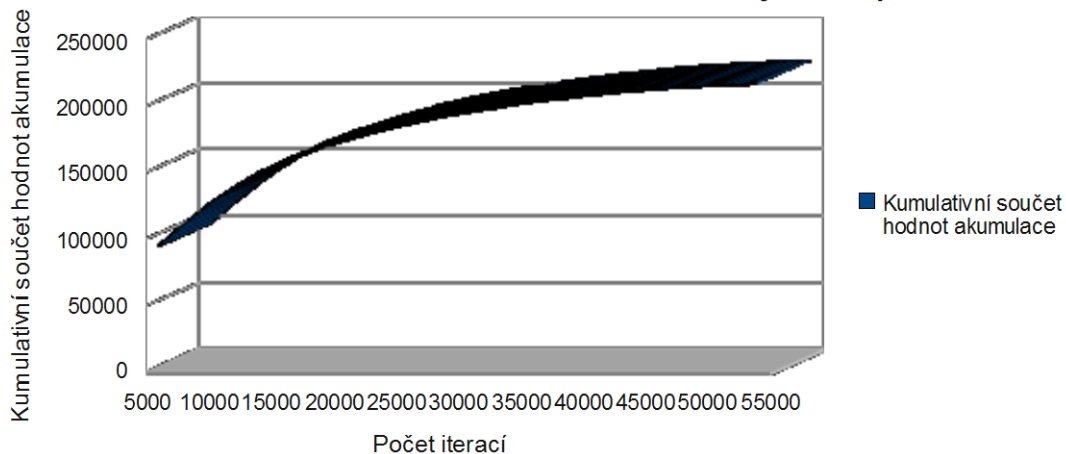
Saint-Venantovy rovnice, vliv drsnosti na rychlost proudění vychází z Manningovy rovnice a tento komplex rovnic je řešen stochastickou metodou Monte Carlo. Samotné výstupní rastry jsou potom tvořeny mechanismem vycházejícím z teorie duality plošek a polí.

Vliv drsnosti terénu na povrchový odtok je zahrnut v Manningově, resp. Chezyho rovnici. Chezyho rovnice popisuje vztah, mezi střední profilovou rychlostí a ztrátovým rychlostním součinitelem (dále upřesňovaným Manningem). Jak je již z tvaru a povahy Saint Venantových rovnic kontinuity zřejmé, jejich konvenční numerické řešení je v praxi krajně obtížné. Proto je použito stochastické řešení Greenovou funkcí metody Monte Carlo. Monte Carlo používá pseudonáhodná čísla a určuje pravděpodobnost určitého jevu. Grafické i numerické výstupy modulu r.sim.water při testování na modelovaném území (návrhová intenzita srážky 50 mm/hod, Manningův koeficient drsnosti 0,15) se jeví reálně, testováno bylo 9 000 iterací, steady flow bylo dosaženo po 53998 iteraci.



Obr. 6. Objem odtoku dle modulu r.sim.water při iteraci 53998.

R.sim.water-kumulativní součet akumulace odtoku v jednotlivých iteracích

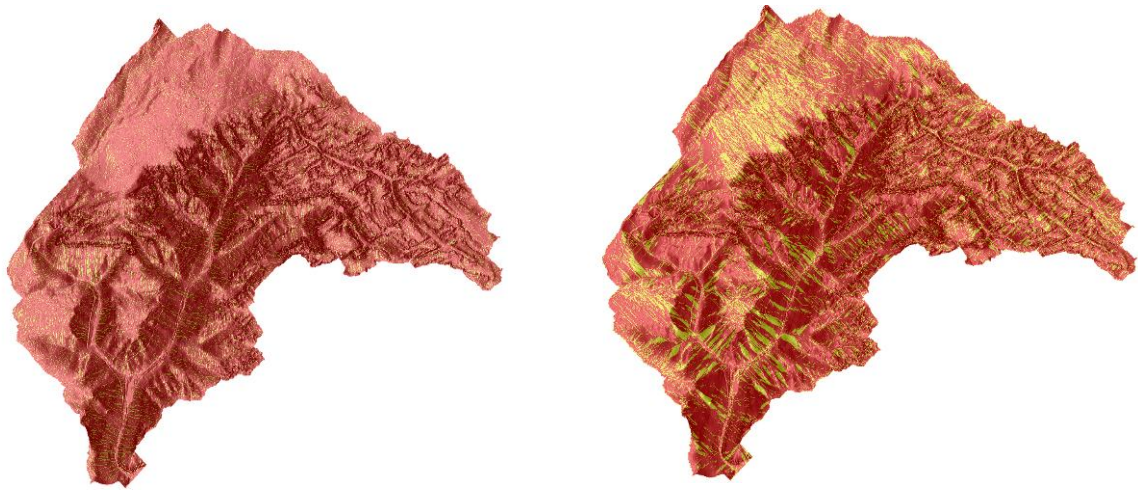


í k dosažení steady-flow.

Graf 1. Nárůst kumulativního součtu odtoku modulu r.sim.water směrující

6 Porovnání výstupů jednotlivých modulů

Ukazuje se, že jednotlivé moduly mohou poskytovat dobré dílčí výsledky ale ve finální analýze selhávat. Modul *r.watershed* lze s úspěchem použít k přesnému určení rozvodnic i v komplikovaném terénu. Jeho schopnost udržet flow lines (flow paths) lze hodnotit jako uspokojivou, ovšem určování FD je zcela neuspokojivé. Modul *r.flow* velmi dobře určuje flow direction, ovšem jeho schopnost udržet neporušené flow lines je nedostatečná. Velmi dobré výsledky dává modul *r.terraflow*, který disponuje solidní schopností určovat flow directions a vynikající schopností udržovat neporušené dráhy odtoku i v depresích či plochých územích (viz tab. 1.). Modul *r.sim.water* je potom dobře použitelný i v extrémním reliéfu. Zajímavě vychází prostorové porovnání rozdílů v chování jednotlivých modulů. Vzhledem k faktu, že modul *r.terraflow* má nejvyšší schopnost udržet flow-lines a tudíž nejvyšší hodnoty kumulativních součtů akumulace povrchového odtoku, byly vyrobeny reklasifikované mapy rozdílů *r.terraflow-r.flow* a *r.terraflow-r.watershed*. Reklasifikace byla provedena hodnoty vyšší (červeně) a nižší (žlutě) než výsledky modulu *r.terraflow*.

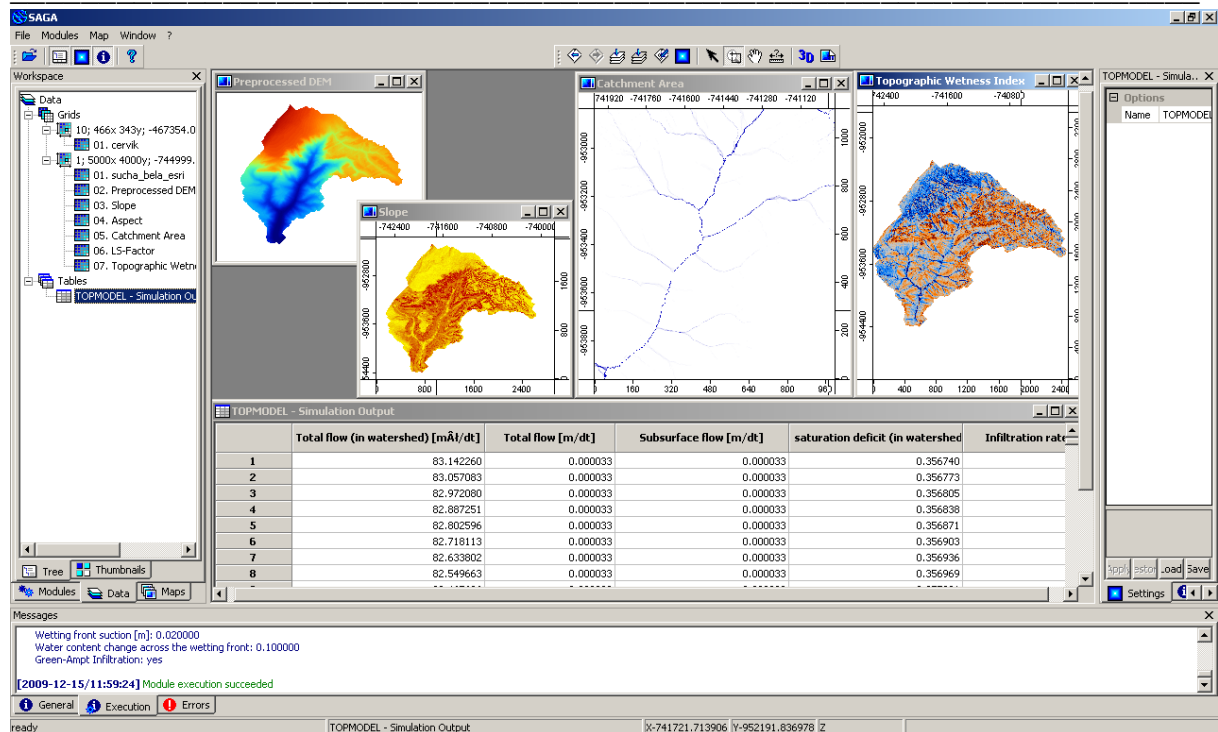


Obr. 7. Porovnání rozdílů *r.terraflow-r.flow* (vlevo) a *r.terraflow-r.watershed* (vpravo).

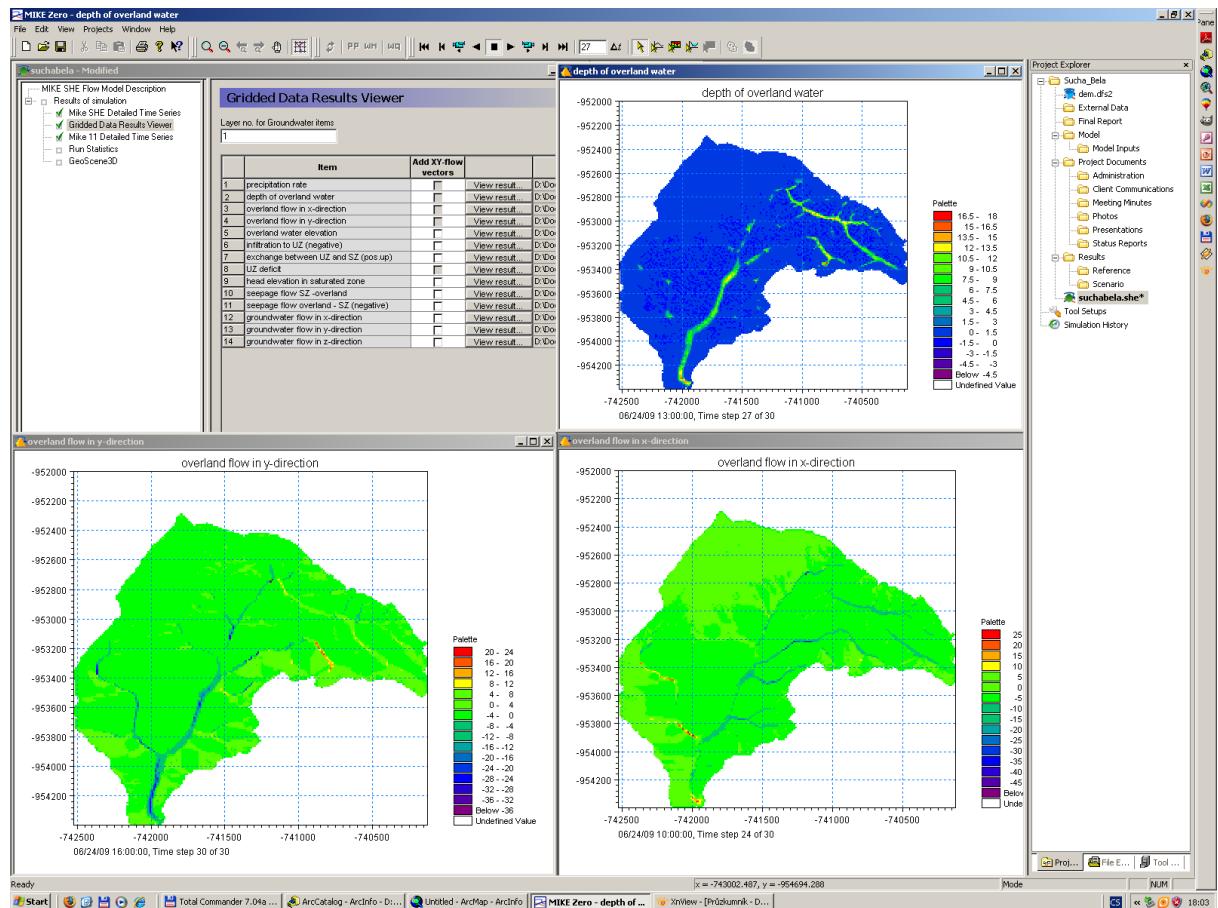
7 Výsledky modelování v TOPMODEL a MIKE SHE

Obrázek 8 poukazuje na výsledky modelování v prostředí TOPMODEL / SAGA GIS. Přístup programu TOPMODEL je založen na topografickém indexu (Beven 2002). Přes mírně odlišný přístup lze vidět, že oblasti akumulace odtoku korespondují s výsledky modulu *r.terraflow* i v tomto komplikovaném reliéfu.

Obrázek 9 poté demonstruje výsledky modelování v programu MIKE SHE, který je dlouhodobě nejkomplexnějším srážkoodtokovým modelem. Rastr vpravo nahore je výsledkem hodnoty výšky povrchového odtoku v mm na konci simulace a rastry v dolní části obrázku jsou výsledky pro hodnoty povrchového odtoku ve směru os x a y.



Obr. 8 Výsledky simulací v TOPMODEL



Obr. 9 Výsledky simulací v MIKE SHE

8 Závěr

Stežejním předpokladem pro modelování povrchového odtoku je dostatečně kvalitní DEM. Důležitá je zejm. přesnost ve vertikálním směru a neporušené údolnice. Hlavní vlastnosti modulů pro výpočet plošného povrchového odtoku v extrémním reliéfu jsou: schopnost překonávat plochá území a deprese – tedy nepřerušování drah odtoku; schopnost počítat s disperzním tokem – tj. MFD algoritmus, a určování směrů odtoku nejlépe algoritmem D^∞ .

Literatura

Seznam použité literatury:

1. Hrádek F., Kuřík P. (2004): Hydrologie, Fakulta lesnická a enviromentální, Česká zemědělská univerzita v Praze
2. Juříková 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
6. Mitasova H. et al. (2005): Path sampling metod for modeling overland waterflow, sediment, transport, and short term terrain evolution in Open ource GIS , Department od Marine, Earth and Atmospheric Sciences, North Carolina State University, dostupné na: <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 ASAE/CSAE Meeting 2004 Ottawa
10. manuálové stránky GIS Grass 6.3 a 6.4 – <http://www.grass.itc.it/gdp/manuals.php> (13.12.2009)
11. Beven, K. (2002): Rainfall-runoff modelling. The Primer. Chichester, Wiley.