



Sediment transport modelling within small catchments of Beskydy Mts.

Modelování transportu sedimentů v malých beskydských povodních

Boris ŠÍR, Jozef RICHNAVSKÝ, Peter BOBÁL, Jan UNUCKA, Martin ĎURICHA, Michal PODHORÁNYI

Vysoká škola Báňská Technická Univerzita Ostrava, boris.sir@vsb.cz, jozef.richnavsky@vsb.cz, petr.bobal@vsb.cz, jan.unucka@vsb.cz, martin.duricha@vsb.cz, michal.podhoranyi@vsb.cz

Abstract

Erosion-sedimentation process is an important component of rainfall-runoff process and understanding of its regime is important to water and soil management optimisation in antropogenically used landscape. General problem of erosion-sedimentation process studies is the lack of measured data. Thus the hydrological and erosion models can be used as a tool of study as it was done in the case of this contribution. Dynamic erosion model was used to simulate sediment transport regime within the little mountain river Červík catchment using the sediment data obtained and published by Ladislav Buzek during his long term research of sediment transport in Beskydy Mts.

Keywords: sediment transport modelling, SWAT, sediment outflow, Červík
Klíčová slova: modelování transportu sedimentů, SWAT, odnos sedimentů, Červík

1. Úvod

Povodí beskydských toků jsou důležitým zdrojem vody pro obyvatelstvo žijící v nižších částech české části povodí řeky Odry. Erozně-sedimentační proces je součástí procesu srážko-odtokového a pochopení jeho režimu je v antropogenně využívané krajině důležitým krokem k optimálnímu hospodaření s vodními a půdními zdroji.

Problémem studia erozně-sedimentačních procesů je obecně absence reálně měřených dat. Ta jsou měřena jen na velmi málo profilech a navíc zřídka kontinuálně a dostatečně dlouho. A právě zde se otevírá prostor pro aplikaci hydrologických a erozních modelů jakožto nástrojů studia těchto procesů. Co se týče vlastního monitoringu erozně-sedimentačního režimu beskydských toků, tak jedním z mála v minulosti systematicky vedených výzkumů tohoto charakteru byly práce doc. RNDr. Ladislava Buzka, CSc. z Přírodovědecké fakulty Ostravské univerzity v Ostravě, avšak velkým problémem je dostupnost jím naměřených dat. Tento příspěvek předkládá předběžné výsledky testování hydrologického a erozního modelu SWAT s využitím dostupných dat z výzkumu docenta Buzka. Další modelování a rozvinutí těchto výstupů by mělo vyústit do podoby disertační práce hlavního autora.

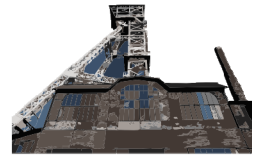
2. Charakteristika povodí

Modelovaným povodím bylo povodí malého beskydského toku Červík. Jedná se o levostranný přítok řeky Ostravice, o jednu ze zdrojnic vodního díla Šance. Červík je čistě horským tokem, jehož údolí je založeno

na flyši godulského a istebňanského souvrství Moravskoslezských Beskyd. Celková plocha povodí je 9,3 km², výškové rozpětí je 500 až 960 m n.m. Průměrný sklon reliéfu povodí je 14°, maximální cca 47°. Převládající expozice svahů je SV. Tok pramení v nadmořské výšce 900 m, celková délka toku je cca 5,7 km a jeho průměrný spád je 7,75°. Lesnatost povodí dosahuje kolem 90%, zbytek je krytý přechodnými zemědělskými oblastmi s přirozenou vegetací. V povodí dominují dva půdní typy, resp. subtypy půdních typů, a to především kambizem districká, která je v nadmořských výškách okolo 750 m vystřídána podzolem kambizemním.

3. Model SWAT

Model SWAT (Arnold et al. 1993) je fyzikálně podložený dynamický environmentální model poskytující řadu nástrojů pro řešení poměrně obsáhlé problematiky managementu povodí, zejména pak s ohledem na vodní složku, erozi půdy a transport vybraných látek, jako jsou např. dusík, fosfor či pesticidy, v hydrologické soustavě povodí včetně vodních nádrží, rybníků a mokřadů. Uvedený výčet je velice stručný, možnosti modelu jsou jak vzhledem k jeho vstupům, tak i výstupům velmi pestré a model může být použit jako vhodný nástroj pro analýzy v dlouhodobém časovém měřítku. Nutno však konstatovat, že vysoká komplexnost modelu SWAT na jedné straně je na straně druhé „vykoupena“ jeho poměrně vysokou náročností na vstupy. Nejzákladnější matematický aparát hydrologického a erozního modulu modelu SWAT jsou následující rovnice (Nietsch et al. 2002b):

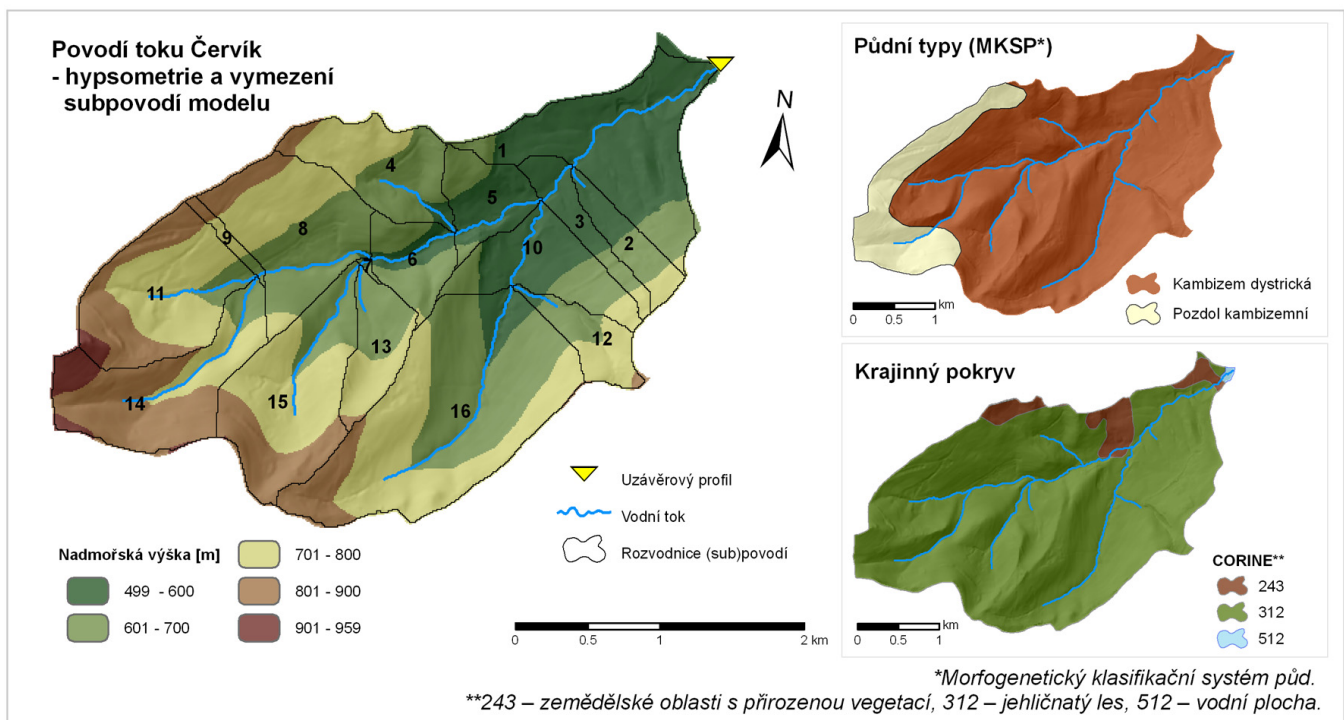


$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}), \text{ kde:}$$

SW_t je konečný obsah půdní vody [mm], SW_0 je počáteční obsah půdní vody v den i [mm], t je čas [den], R_{day} je výška srážek v den i [mm], Q_{surf} je výška povrchového odtoku v den i [mm], E_a je výška evapotranspirace v den i [mm], w_{seep} je výška vody prosakující z půd do vadózní zóny v den i [mm], Q_{gw} je výška základního odtoku v den i [mm].

$$Sed = 11,8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG, \text{ kde:}$$

Sed je množství odneseného sedimentu za jednotku času [t], Q_{surf} je výška povrchového odtoku [$mm \cdot ha^{-1}$], q_{peak} je maximální průtok [$m^3 \cdot s^{-1}$], $area_{hru}$ je plocha HRU (tzv. jednotka hydrologické odezvy; angl. hydrologic response unit; více viz níže) [ha], K_{USLE} je faktor erodibility půdy, C_{USLE} je faktor půdního krytu, P_{USLE} je faktor protierozního opatření, LS_{USLE} je faktor tvaru terénu (sklon a délka svahu), $CFRG$ je faktor velikosti půdních částic.



Obr. 1: Vybrané charakteristiky povodí Červík.

4. Metodika

Hlavním činitelem způsobujícím pohyb sedimentů v povodí je povrchově tekoucí voda. Tento fakt je základním východiskem pro výstavbu modelu. Model SWAT disponuje oddělenou parametrizací modelu hydrologického a modelu erozního.

4.1 Vstupní data a výstavba modelu

Povodí toku Červík bylo pro model SWAT schematizováno do 16 subpovodí a celkem 131 HRU, jakožto areálů s jedinečnou kombinací půd, krajinného pokryvu a sklonu svahů (viz Nietsch et al. 2002b). Základními výpočetními metodami byly SCS CN a variable storage pro hydrologickou a hydraulickou transformaci, Hargreaves pro evapotranspiraci (Hargreaves et al. 1985) a MUSLE (Williams 1985) pro

erozi (teoretický rozbor metod viz např. Nietsch et al. 2002b, Maident ed. 2007, Bedient et al. 2007, Dingman 2002, Morgan 2005 aj.). Digitální model reliéfu o rozlišení 10 m byl poskytnut Krajským úřadem Moravskoslezského kraje pro potřeby projektu FLOREON⁺, digitální vektorová vrstva půdních typů byla poskytnuta ČHMÚ, vrstva krajinného pokryvu byla volně stažena z webu projektu CORINE Land Cover. Vstupními meteorologickými daty byly denní srážkové úhrny měřené ČHMÚ ve stanici Staré Hamry. Pro kalibraci hydrologického a erozního modelu byly využity průměrné měsíční průtoky a měsíční hodnoty odnosu sedimentů závěrovým profilem po odečtení antropogenního faktoru měřené ČHMÚ resp. doc. Buzkem tamtéž (viz Buzek 1981). Veškerá hydrometeorologická data se týkala chodu těchto prvků v hydrologických letech 1977 a 1978.



Některá data o klimatu oblasti byla čerpána z Atlasu podnebí Česka (Tolasz ed. 2007).

4.2 Citlivostní analýzy a kalibrace modelu

Primárním předpokladem pro dosažení co nejvyšší shody mezi simulovaným a pozorovaným odnosem sedimentů z povodí je v rámci možností co nejpřesnější parametrizace modelu hydrologického. Hlavní důraz byl při jeho výstavbě v první řadě kladen na roční hydrologickou bilanci, kdy bylo zapotřebí dosáhnout co nejvyšší shody mezi modelem a realitou v objemové (resp. výškové) proporcionalitě základních složek roční hydrologické bilance. Směrodatnou komponentou hydrologické bilance je zde odtok povrchový, tudíž základní snahou bylo parametrizaci dosáhnout co nejrealističtějšího poměru *povrchový odtok : hypodermický odtok : podzemní odtok : ostatní bilanční komponenty*. Po jeho docílení je pak možné přistoupit k adjustaci hodnot parametrů popisujících sezónní variabilitu hydrologických pochodů a kalibrovat tak hydrologický model v měsíčním časovém kroku.

Veškerá adjustace hodnot vybraných parametrů modelu byla prováděna manuálně. Hydrologický model SWAT disponuje 24 kalibrovatelnými parametry, erozní model pak šesti. Toto je pro manuální kalibraci poměrně značné množství, proto samotné kalibraci předcházela citlivostní analýza obou modelů. Citlivostní analýza odhalila vstupní parametry, změna jejichž hodnoty se nejcitlivěji odrazí ve změně výstupů modelu. Byla provedena jak pro parametry hydrologického a erozního modelu zvlášť, tak rovněž, a to především, pro parametry erozního modelu ve vztahu k jejich vlivu na hodnoty výstupů hydrologického modelu. Toto potvrdilo fakt, že změna hodnoty jakéhokoli z šesti kalibrovatelných parametrů erozního modelu nikterak neovlivní výsledky modelu hydrologického.

Použitou metodou citlivostních analýz byla metoda LH-OAT kombinující metody Latin Hypercube (LH)

(McKay 1988) a One-Factor-At-Time (OAT) (Morris 1991). Její základní matematické vyjádření je následující (Holvoet et al. 2004):

$$S_{i,j} = \left[\frac{SSE(\phi_1, \dots, \phi_i \cdot (1+f), \dots, \phi_p) - SSE(\phi_1, \dots, \phi_i, \dots, \phi_p)}{f} \right]$$

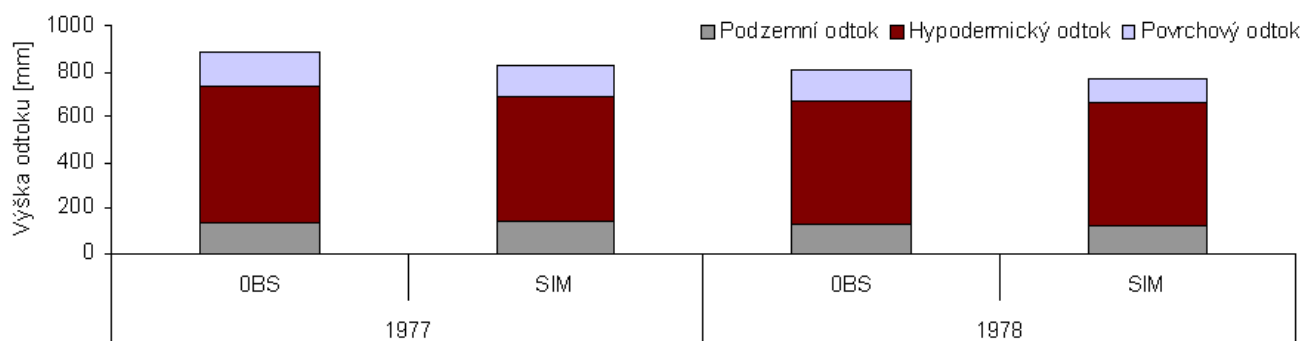
kde

$S_{i,j}$ je parciální efekt pro parametr ϕ_i v okolí bodu j LH, f je zlomek, o který je parametr ϕ_i změněn (přednastavená konstanta), SSE je suma čtverců odchylek. Výsledky citlivostních analýz jsou v tabulce 1 a 2.

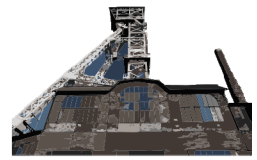
5. Výsledky

Předně je nutné říci, že veškeré výsledky jsou pouze předběžné. Tabulka 1 je sestupným vyjádření citlivosti výstupů hydrologického modelu ke změně hodnot uvedených vstupních parametrů. Tento výstup posloužil jako podklad pro výběr parametrů vhodných k manuální kalibraci hydrologického modelu. Při kalibraci byly upravovány pouze parametry, u nichž bylo možné se opřít o relativně dobrou znalost jejich hodnot pro dané povodí, hodnoty některých parametrů (zejména popisujících chování podzemních vod) pak bylo třeba odvozovat inverzně. Tabulka 2 podává stejnou informaci, avšak pro parametry erozního modelu (více viz popisek u tabulky). Detailnější teoretický rozbor uváděných parametrů modelu viz (Nietsch et al. 2002a).

Diagram na obrázku 2 je srovnáním podílu jednotlivých složek odtoku reálné a simulované roční hydrologické bilance pro oba hydrologické roky. Výsledky simulací jsou oproti realitě mírně podhodnoceny, nicméně jejich proporcionalita je s ohledem na předběžnost výsledků uspokojivá.



Obr. 2: Odtokové komponenty roční hydrologické bilance hydrologických let 1977 a 1978.



Tab. 1: Výsledky LH-OAT citlivostní analýzy parametrů hydr. modelu. Řazeno sestupně.

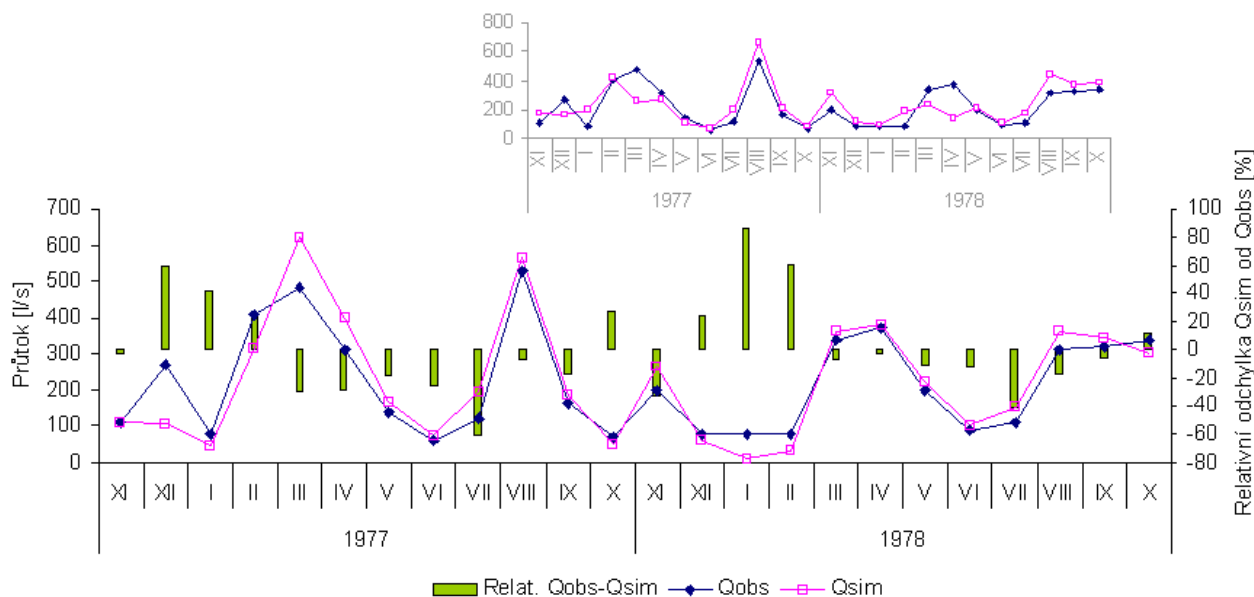
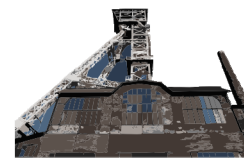
Parametr	Popis parametru
Sol_Awc	Available water capacity (mm/mm soil)
Gwqmn	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)
Esco	Plant evaporation compensation factor
Canmx	Maximum canopy index
Cn2	SCS runoff curve number for moisture condition II
Blai	Leaf area index for crop
Slope	Average slope steepness (m/m)
Sol_K	Soil conductivity (mm/h)
Alpha_Bf	Baseflow alpha factor (days)
Sol_Z	Soil depth
Timp	Snow pack temperature lag factor
Gw_Delay	Groundwater delay (days)
Gw_Revap	Groundwater "revap" coefficient
Ch_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium (mm/hr)
Ch_N2	Manning coefficient for channel
Biomix	Biological mixing efficiency
Revapmn	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur (mm)
Sol_Alb	Moist soil albedo
Surlag	Surface runoff lag coefficient
Epc	Plant evaporation compensation factor
Sfimp	Snowfall temperature (°C)
Ssubbsn	Average slope length (m/m)
Smfmn	Min. melt rate for snow (mm/°C/day)
Smfmx	Maximum melt rate for snow (mm/°C/day)
Smtmp	Snow melt base temperature (°C)
Tlps	Temperature lapse rate (°C/km)

Tabulka 2: Výsledky LH-OAT citlivostní analýzy parametrů erozního modelu. Řazeno sestupně. Poslední pole ukazuje nulovou citlivost hydrologického modelu ke změně parametrů modelu erozního. *Objektivní funkce.

Parametr	Popis parametru	OF* eroze-hydro
Usle_P	USLE equation support practice factor	0.00E+00
Spoon	Linear parameter for calculating maximum amount of sediment that can be reentrained during channel sediment routing	0.00E+00
Usle_C	Minimum value of USLE C factor for water erosion applicable to the land cover/plant	0.00E+00
Sprep	Exponent parameter for calculating sediment reentrained in channel sediment routing	0.00E+00
Ch_Cov	Channel cover factor	0.00E+00
Ch_Erod	Channel erodibility factor	0.00E+00

Grafy na obrázku 3 zobrazují srovnání výsledků hydrologického modelu s měřeným průtokem v měsíčním časovém kroku. Z hydrogramů je patrné, že odtokové epizody během vegetačního období vykazují poměrně těsnou shodu s pozorovanými průtoky, problémy s kalibrací modelu se projevují spíše v chladné části roku, což je možné vysvětlit poněkud horší

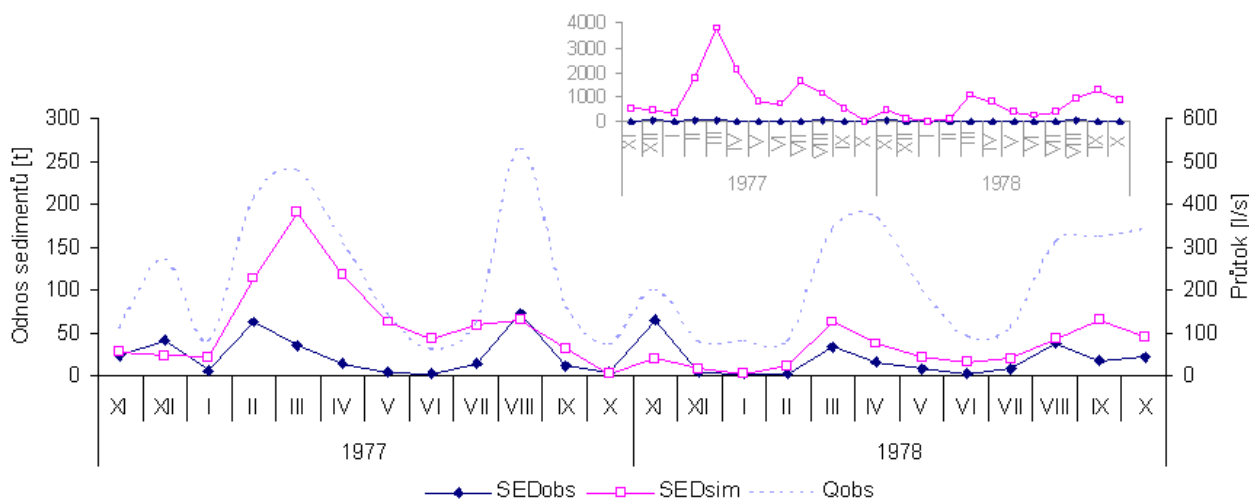
parametrizací sněhové komponenty hydrologického cyklu. Avšak oproti výsledkům simulací před kalibrací modelu je možno aktuální výstupy pro potřeby předběžného testování považovat za dostačující. Průměrná relativní odchylka simulovaného průtoku od měřeného je cca 27% hodnoty měřeného průtoku.



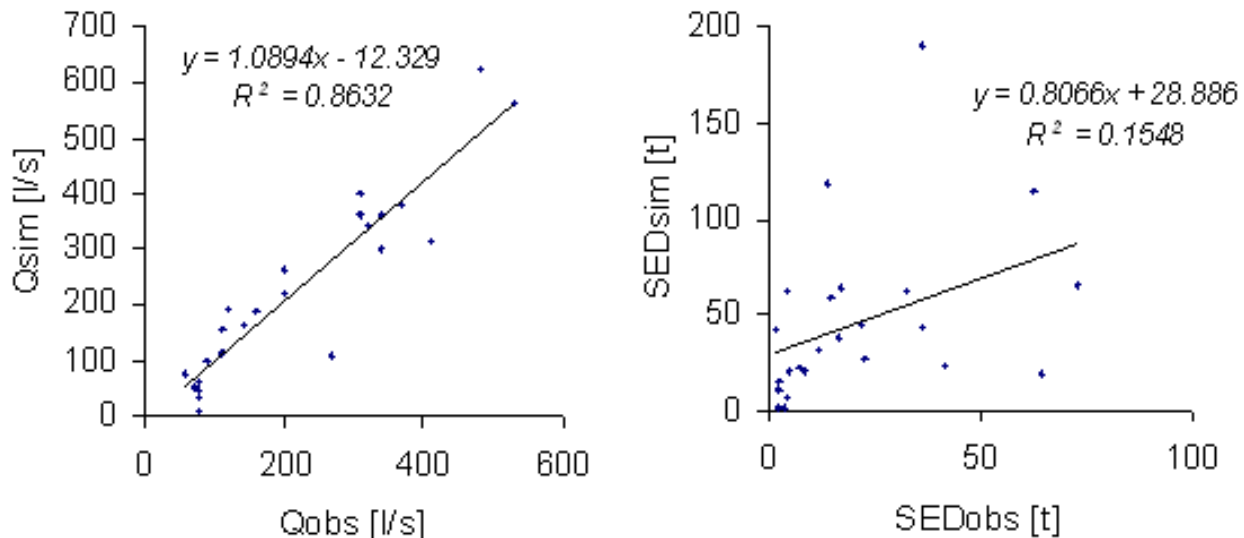
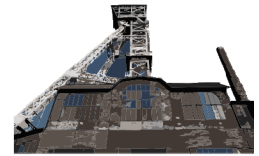
Obr. 3: Průměrný měsíční průtok v závěrovém profilu povodí v hydrologických letech 1977 a 1978. Srovnání měřených a simulovaných hodnot. Malý náhled znázorňuje výsledky před kalibrací modelu.

Grafy na obrázku 4 znázorňují srovnání měřeného a simulovaného měsíčního odnos sedimentů závěrovým profilem povodí. Z vizualizace je zřejmé, že před kalibrací byly výsledky modelu konstantně nadhodnocené. Po jeho první kalibraci je již vidět výrazný posun k lepšímu, nicméně stále není možné tyto předběžné výsledky považovat za relevantní. Problémem zůstává zejména období tání sněhu v prvním roce simulace a obecně lze říci, že během vegetačního období

je shoda hodnot simulovaných a měřených odnosů sedimentů z povodí těsnější než během chladné části roku. Interpretovat tyto výsledky je také třeba vzhledem k výsledkům modelu hydrologického, za uvážení stojí taktéž možnost antropogenního ovlivnění erozních procesů, byť tento faktor byl z dat již doc. Buzkem vyloučen. Na obrázku 5 jsou grafy regresních vztahů mezi hodnotami měřených a simulovaných průtoků a odnosů sedimentů z povodí.



Obr. 4: Měsíční hodnoty odnosu sedimentů závěrovým profilem v hydrologických letech 1977 a 1978, srovnání měřených a simulovaných hodnot. Malý náhled znázorňuje výsledky před kalibrací modelu.



Obr. 5: Regresní vztah mezi měřeními a simulovanými průtoky a odnosem sedimentů.

6. Závěr a výhledová řešení

Jak je uvedeno již v úvodu, tak tento příspěvek prezentuje první výsledky testování modelu SWAT na datech beskydského plaveninového výzkumu. Nadcházející práce na výstavbě a testování modelu by měly vyústit v disertační práci hlavního autora a jejich náplní bude zejména další kalibrace hydrologického a především erozního modelu, a to i denním časovém kroku simulací. K tomu bude nezbytné opatřit více dat z terénních výzkumů, což bude asi nejobtížnější etapou prací. Větší množství měřených dat umožní kromě kalibrace modelu i jeho validaci. Nezbytné bude taktéž provést zpřesnění statických datových vstupů, kterými jsou zejména data o krajinném pokryvu a půdách. Hlavním zdrojem materiálu odnášeného z ploch povodí je v beskydských podmínkách síť nezpevněných lesních cest, kterou bude nezbytné do dalších analýz zahrnout. Dále hlavní autor hodlá testovat parametrizaci erozního modelu ve vztahu k antropogennímu ovlivnění chodu erozních pochodů v povodí a v případě kvalitních datových podkladů pak kvantifikovat dominantní hydrometeorologické podmínky (např. dominantní průtok) vzhledem k dlouhodobému transportu sedimentů v povodí.

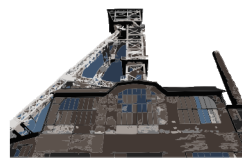
Použitá zdroje

- ARNOLD, J., G., ALLEN, P., M., BERNHARDT, G. (1993): A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology* 142, s. 47 – 69.
- BEDIENT, P.,C., HUBER, W.,C., VIEUX, B.,C. (2007): *Hydrology and floodplain analysis*, 4th edition: Prentice Hall, London. 795 s.

- BUZEK, L. (1981): *Eroze proudící vodou v centrální části Moravskoslezských Beskyd*. Státní pedagogické nakladatelství Praha, 117 s.
- DINGMAN, S.,L. (2002): *Physical Hydrology*. Second Edition. Waveland Press, Inc.
- HOLVOET, K., VAN GRIENSVEN, A., SEUNTJENS, P., VANROLLEGHEM, P.,A. (2004): Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT. *Physics and Chemistry of the Earth* 30 (2005), s. 518–526.
- MAIDMENT, D.,R. (Ed.) (2007): *Handbook of Hydrology. User Manual*, Edition 2004: DHI Software. 516 s.
- McKAY, M.,D., (1988). Sensitivity and uncertainty analysis using a statistical sample of input values. In: Ronen, Y. (Ed.), *Uncertainty Analysis*. CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, s. 145–186.
- MORGAN, R.,P.,C. (2005): *Soil Erosion and Conservation*, Third Edition. Malden, USA, Blackwell Publishing, 304 s.
- MORRIS, M.,D., (1991). Fractional sampling plants for preliminary computational experiments. *Technometrics* 33 (2), s. 161–174.
- NIETSCH, S.,L., ARNOLD, J.,G., KINIRY, J.,R., SRINIVASAN, R., WILLIAMS, J.,R. (2002a): *Soil and Water Assessment Tool User's Manual*. Version 2000. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas. TWRI Report TR-192, 378s.
- NIETSCH, S.,L., ARNOLD, J.,G., KINIRY, J.,R., WILLIAMS, J.,R., KING, K.,W. (2002b): *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. Version 2000. Texas Water



XXII SJEZD ČESKÉ GEOGRAFICKÉ SPOLEČNOSTI OSTRAVA 2010



Resources Institute, College Station, Texas.
TWRI Report TR-191, 458 s.

Palackého v Olomouci, Praha – Olomouc, 255
s.

TOLASZ, R. (Ed.) (2007): Atlas podnebí Česka. Český
hydrometeorologický ústav a Univerzita

Adresa autora:

RNDr. Ing. Boris Šír
Institut geoinformatiky, Hornicko-geologická fakulta
Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
17. listopadu 15
708 33 Ostrava-Poruba
sir.boris@vsb.cz