

**VPLYV PRIESTOROVEJ KONCEPTUALIZÁCIE
HYDROLOGICKÉHO MODELU NA PRESNOŠŤ SIMULÁCIE PRIETOKOV**

Patrik Sleziak, Ján Szolgay, Kamila Hlavčová, Juraj Parajka, Martin Kubáň

V práci bol použitý koncepčný z-o model TUV, ktorý podľa priestorového rozdelenia môžeme pre dané povodie zostaviť ako celistvý, resp. polo-rozčlenený, kde vstupné údaje sú priestorovo rozčlenené po výškových zónach. Použili sme obidve verzie modelu TUV (t.j., celistvá a polo-rozčlenená), pričom sme ich kalibrovali v dvoch 10-ročných obdobiach, medzi rokmi 1991 – 2010. Bola použitá automatická kalibrácia pomocou algoritmu diferenciálnej evolúcie. Metodický postup bol aplikovaný pre reprezentatívnu vzorku 213 rakúskych povodí, ako aj pre jedno pilotné povodie. V prvej časti práce bola posúdená kvalita simulácie priemerných denných prietokov (pre 213 povodí) z hľadiska porovnania kritéria Nash-Sutcliffovho koeficientu (NSE) a objemovej chyby (VE). Ukázalo sa, že použitím polo-rozčlenej verzie modelu sme dosiahli lepšie výsledky z hľadiska NSE (vyššie hodnoty v kalibráciách aj validáciách) pri porovnaní s celistvou verziou modelu. Pri porovnaní hodnôt objemovej chyby dosiahli obidve verzie modelu porovnateľné výsledky (v kalibráciách). Vo validáciách sa ukázala byť o niečo spoľahlivejšia polo-rozčlenená verzia modelu. V druhej časti práce bolo vybrané jedno pilotné povodie na ktorom sme skúmali vplyv priestorovej konceptualizácie modelu (t.j., celistvá vs. polo-rozčlenená verzia) na presnosť simulácie priemerných mesačných prietokov. Zistili sme, že použitím polo-rozčlenej verzie modelu boli simulované hodnoty prietokov bližšie reálnym nameraným, čím sa preukázala lepšia simulácia reality.

KLÚČOVÉ SLOVÁ: TUV model, priestorová konceptualizácia modelu, Nash-Sutcliffov koeficient, objemová chyba

IMPACT OF THE SPATIAL CONCEPTUALIZATION OF A HYDROLOGICAL MODEL ON THE ACCURACY OF FLOW SIMULATIONS. For the modeling a conceptual r-r model (the TUV model) was used. According to the spatial discretization for the given catchment, the TUV model can be compiled as a lumped or a semi-distributed, where the inputs are spatially differentiated. Both versions of the TUV model (i.e., the lumped and the semi-distributed) were used in this study. Both versions of the model were calibrated in two 10-year periods between 1991-2010. The model parameters were estimated by automatic calibration using a differential evolution algorithm. The methodological approach was applied for representative sample of 213 Austrian catchments as well as for one pilot catchment. In the first part of the study, the quality of the simulations of the mean daily flows (for 213 catchments) was assessed in terms of comparing of the NSE and VE values. We found that using the semi-distributed version of the model, we achieved better NSE results (higher values in both calibration and validation periods). In terms of VE, both versions of the model achieved comparable results (in the calibrations). In the validations, the semi-distributed version of the model proved to be more reliable. Subsequently, we selected one pilot catchment on which we demonstrated the impact of the spatial conceptualization of the model (i.e., the lumped and the semi-distributed version) on the accuracy of the mean monthly flows. We found that using the semi-distributed version of the model, the simulated values of flows were closer to real measurements.

KEY WORDS: TUV model, spatial conceptualization of the model, Nash-Sutcliffe coefficient, volume error

Úvod

Zrážkovo-odtokové (z-o) modely poskytujú užitočný nástroj pri praktických riešeníach rôznych vodohospo-

dárskych a inžinierskych problémov (napr. Predpovedanie priebehu povodní, protipovodňová ochrana, vplyv zmeny klímy na vodný režim, atď.). Vo všeobecnosti, tieto modely napodobňujú zložité hydrologické procesy,

ktoré prebiehajú v prírode do podoby algoritmu vo virtuálnom prostredí. Rôzne prístupy ku komponentom z-o procesu, dostupnosť vstupných údajov, štruktúra skúmaného povodia, časová a priestorové rozdelenie, účel aplikácie a pod., umožnili vznik veľkého množstva z-o modelov, ktoré sa začlenili do rôznych kategórií. Vzájomné porovnania jednotlivých modelov sú obsiahnuté napr. v prácach Perrin a kol. (2001), Beven (2001). Pre potreby tejto práce je dôležité zaviesť pojem celistvé a polo-rozčlenené modelovanie. Pri celistvom modelovaní sa skúmané povodie považuje za jeden celok, ktorý je reprezentovaný priemernými hodnotami vstupných údajov a fyzicko-geografických charakteristík povodia (Jeníček, 2005). Pri polo-rozčlenenom modelovaní sa uvažuje s rozdelením povodia na čiastkové plochy, ktoré majú rovnaké priestorové parametre. Tieto plochy sa vyznačujú napr. homogenitou reliéfu, pôdnych vlastností, atď. (Jeníček, 2005).

V súčasnosti je známe, že kvalita výstupov hydrologických modelov závisí najmä od kvality a dostupnosti vstupných údajov, od klimatického obdobia pre ktoré bol model vyvinutý, štruktúry (komplexnosti) modelu a ďalších procesov (Coron a kol., 2014). V tejto súvislosti viacerí autori upozorňujú, že štruktúra (komplexnosť) modelu má zásadný vplyv na jeho kvalitu simulácie resp. výkonnosť (e.g., Perrin a kol., 2003; van Esse a kol., 2013; Wagener, 2003; Reed a kol., 2004; Breuer a kol., 2009; Seiller a kol., 2012; Viney a kol., 2005). Niektorí autori poukazujú na to, že konkrétna štruktúra modelu je nevhodná pre modelovanie v priebehu meniacich sa klimatických podmienok (Fowler a kol., 2016; Vaze a kol., 2010; Coron a kol., 2012). Iné práce naznačili, že štruktúra modelu by sa mala zmeniť, resp. modifikovať (Merz a kol., 2011), aby sa model lepšie vyrovnal s charakterom klimatických podmienok a tým bol schopný poskytnúť prijateľnejšie výsledky. Ako konštatuje Bai et al. (2015), porovnanie viacerých typov modelov môže poskytnúť užitočné informácie pre výber vhodného modelu. Predložená práca je zameraná práve na uvedené a jej zámerom je zhodnotiť vplyv priestorovej konceptualizácie vybraného z-o modelu (t.j., celistvá vs. polo-rozčlenená verzia) na simuláciu priemerných denných a mesačných prietokov v podmienkach Rakúska.

Práca je organizovaná nasledovne. Nasledujúca časť je zameraná na charakteristiku a opis použitého z-o modelu (TUV model). V ďalšej časti je stručne popísaný scenár kalibračnej a validačnej stratégie. V nasledujúcom sú opísané vstupné údaje, skúmané územie a modelované povodia. V ďalšej časti sú prezentované výsledky práce. Posledná časť obsahuje závery.

Použitý zrážkovo-odtokový model – TUV model

Na modelovanie odtoku bol použitý koncepčný zrážkovo-odtokový (z-o) model (TUV model, Viglione a Parajka, 2014), ktorého štruktúra vychádza zo švédskeho HBV modelu (Bergström, 1995). Model TUV pracuje v dennom časovom kroku a podľa priestorového

rozdelenia ho môžeme pre dané povodie zostaviť ako celistvý, resp. polo-rozčlenený, kde vstupné údaje sú priestorovo rozčlenené po výškových zónach (v našom prípade po 200 metrov výškových zón). V práci boli pre porovnanie výsledkov použité obidve verzie modelu (t.j., celistvá vs. polo-rozčlenená verzia).

Model TUV má 15 kalibračných parametrov, ktoré nám umožňujú kontrolovať a upravovať vlastnosti simulovaných javov a stavy zásob vody. Ako vstupné údaje model vyžaduje: úhrny zrážok na povodí, priemerné teploty vzduchu na povodí, priemernú potenciálnu evapotranspiráciu na povodí. Priemerné denné prietoky v záverečnom profile povodí sú použité pre kalibráciu modelu a pre porovnanie so simulovanými hodnotami.

Model sa skladá z troch komponentov (tzv. Submodelov), ktorými sú: (a) snehový submodel, ktorý zabezpečuje simuláciu akumulácie a topenia snehu v povodí, (b) pôdny submodel, ktorého úloha spočíva v akumulácii hydrologických procesov prebiehajúcich pod zemským povrchom (napr. infiltrácia zrážok a topenie snehu, evapotranspirácia z pôdy a vegetácie, akumulácia a distribúcia vody v pôdnych vrstvách), (c) odtokový submodel, ktorého úlohou je stanovenie odozvy povodia na zásoby vody a transformácia odtoku v rámci povodí. Podrobný opis modelu, ako aj rôzne príklady jeho aplikácií obsahuje literatúra (napr. Parajka a kol., 2007).

Kalibračná a validačná stratégia

Obidve verzie TUV modelu (t.j. celistvá a polo-rozčlenená) boli kalibrované a validované v dvoch 10-ročných obdobiach medzi rokmi 1991 – 2010. Bol použitý Split-Sample Test (SST, Klemeš, 1986), ktorý spočíva v tom, že kalibrácia modelu sa vykoná na jednom časovom období a overenie (validácia) na inom období. Bola použitá automatická kalibrácia pomocou diferenciálneho evolučného algoritmu Deoptim (Ardia a kol., 2016). Tento algoritmus bol úspešne aplikovaný aj v predošlých modelovacích štúdiách (napr. Sleziak a kol., 2016; Sleziak a kol., 2017). Rozsah parametrov použitých pri kalibráciách bol prebratý z literatúry (pozri napr. Merz a kol., 2011; Viglione a kol., 2013). Zahrievacie obdobie 1 rok bolo použité pri kalibráciách. Ako optimalizačná funkcia bola použitá kombinácia Nash-Sutcliffovho koeficientu (NSE) (Nash a Sutcliffe, 1970) a logaritmickeho Nash-Sutcliffovho koeficientu (logNSE) (Merz a kol., 2011). Táto funkcia bola použitá v tvare: $(NSE + \logNSE)/2$. Kým NSE prikladá väčší dôraz na vysoké prietoky, logNSE kladie dôraz na nízke prietoky. Pre detailnejší opis použitej optimalizačnej funkcie pozri napr. Sleziak (2017).

Výkonnosť modelu bola hodnotená pomocou tradičných metrick kvality simulácie, akými sú napr. Nash-Sutcliffov koeficient NSE (čím sú hodnoty NSE bližšie k 1, tým je dosiahnutá lepšia zhoda medzi meranými a simulovanými prietokmi) a objemová chyba VE (hodnoty $VE < 0$ a $VE > 0$ označujú podhodnotenie a nadhodnotenie objemu prietokov, ideálny stav je $VE=0$, ktorý indikuje, že nenastali žiadne zmeny medzi pozorova-

vanými a simulovanými prietokmi, Merz a kol., 2011). Obidve metriky, t.j. NSE aj VE sledujeme v práci za celé kalibračné (validačné) obdobia v priemere a pre všetky skúmané rakúske povodia.

Charakteristika predmetného územia a opis vstupných údajov

Práca je zameraná na územie Rakúska (obr. 1). Toto územie bolo vybrané ako testovacie z hľadiska (a) klimatickej variability, ktorá poukazuje na rastúci trend úhrnu zrážok a teplôt vzduchu v súčasnejších obdobiach (pozri napr. štúdiu Merz a kol., 2011), (b) rozdielných fyzicko-geografických podmienok (t.j., rozdielne plochy povodí, sklony, geológia, Gaál a kol., 2012), (c) dostupnosti vstupných údajov a ich vhodnosti pre modelovacie experimenty (napr., Viglione a kol., 2013). Použili sme reprezentatívnu vzorku 213 rakúskych povodí, ktoré sú prevažne nížinného (východná časť Rakúska) a horského charakteru (západná a centrálna časť Rakúska). Plocha povodí je v rozsahu od 14 do 6200 km². Priemerná nadmorská výška je v intervale od 295 – 2915 m n.m. Priemerný ročný úhrn zrážok (obdobie 1991 – 2010) sa pohybuje približne od 1025 do 1505 mm/rok (obr. 2). Priemerná ročná teplota vzduchu je v rozsahu od 5 do 7,5 °C (obr. 2). Pre bližší popis vývoja a tiež charakteru klimatických charakteristík v modelovanom období pozri napr. prácu Sleziač (2017). Boli použité denné hydrometeorologické údaje z obdobia 1991 – 2010, ktoré tvorili priemerné denné úhrny zrážok z 1091 zrážkomerných staníc, priemerné denné hodnoty teploty vzduchu z 213 klimatologických staníc a priemerné denné prietoky v záverečnom profile 213 povodí. Databáza povodí bola prebratá zo štúdie Viglione a kol. (2013), pričom autori pre výpočet zrážkového úhrnu na povodie použili priestorovú interpoláciu metódou external drift Kriging (napr. Merz a kol., 2011). Priemerné denné teploty vzduchu pozorované v jednotlivých staniách transformovali na teploty vzduchu reprezentujúce denné priemerné hodnoty na povodie pomocou metódy najmenších štvorcov (Pebesma, 2001). Denné hodnoty potenciálnej evapotranspirácie boli vypočítané metódou Blaney-Criddle (Pa-

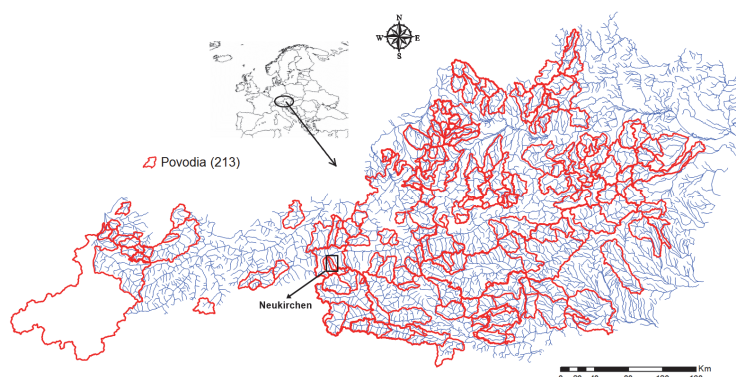
rajka a kol., 2005). Detailnejší opis spracovania údajov je uvedený napr. v práci (Merz a kol., 2011). V tejto práci boli uvedené vstupné údaje (pri použití polo-rozčlenenej verzie modelu) rozdelené podľa intervalu nadmorských výšok (po 200 metrov).

Výsledky

Táto časť práce poskytuje informáciu o jednotlivých výsledkoch práce, ktoré sú rozdelené do dvoch častí. Prvá z nich poskytuje informáciu o zhodnotení vplyvu priestorovej konceptualizácie modelu (t.j. celistvá vs. polo-rozčlenená verzia modelu) z hľadiska posúdenia kvality simulácie priemerných denných prietokov (pre 213 rakúskych povodí) pri porovnaní Nash-Sutcliffovho koeficientu NSE a objemovej chyby VE. Druhá časť hodnotí vplyv priestorovej konceptualizácie modelu (t.j. porovnanie celistvej a polo-rozčlenenej verzie modelu) z hľadiska simulácií priemerných mesačných prietokov pre vybrané pilotné povodie. Uvedené zistenia sú dokumentované v grafickej podobe.

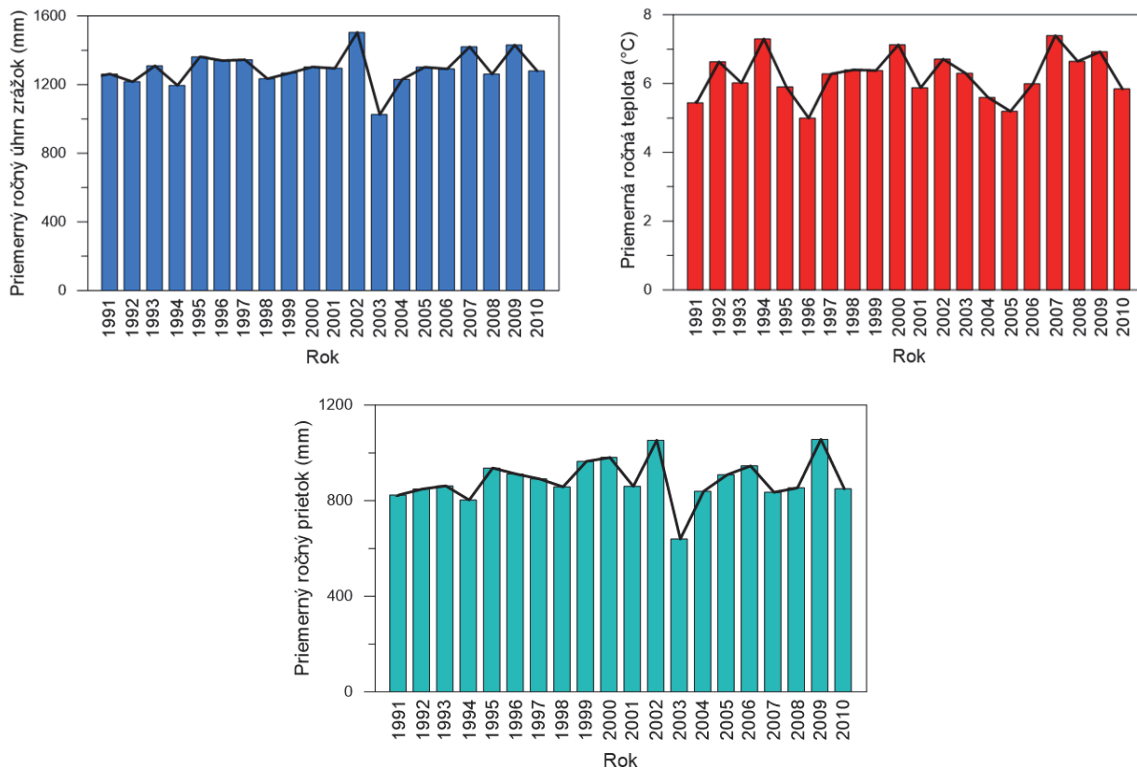
Zhodnotenie vplyvu priestorovej konceptualizácie TUV modelu z hľadiska simulácií priemerných denných prietokov pre 213 rakúskych povodí

Z uvedených zobrazení (obr. 3, 4) je zrejmé, že výsledky (t.j. hodnoty NSE a VE), ktoré sme získali použitím celistvej a polo-rozčlenenej verzie modelu (t.j., rozdelením vstupných údajov do výškových zón po 200 metrov) sú odlišné. Z obr. 3 je viditeľné, že použitím polo-rozčlenenej verzie sme získali vyššie hodnoty NSE vo všetkých kalibračných aj validačných obdobiach (v porovnaní s celistvou verzou), čo zároveň poukazuje aj na vyššiu výkonnosť modelu. Mierny stúpajúci trend priemerných hodnôt NSE v priebehu kalibračných období je podobný použitím oboch verzií modelu. Napr. priemerné hodnoty NSE sa v kalibračných obdobiach pohybujú od 0,71 po 0,73 (pri použití celistvej verzie) a od 0,77 po 0,79 (pri použití polo-rozčlenenej verzie). Vo validačných obdobiach boli dosiahnuté nižšie priemerné hodnoty NSE oproti kalibráciám.



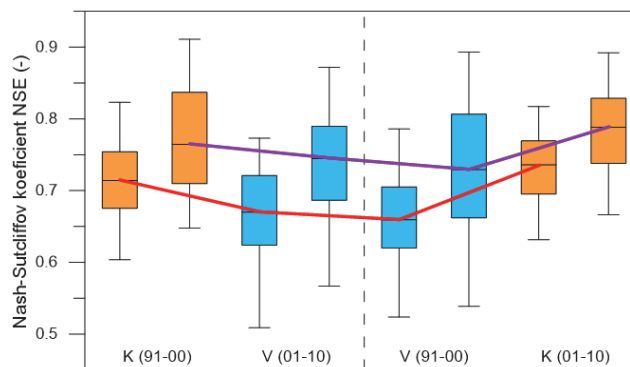
Obr. 1. Lokalizácia modelovaných rakúskych povodí (213) a taktiež jedného pilotného povodia.

Fig. 1. Location of the modeled Austrian catchments and also one selected pilot catchment.



Obr. 2. Porovnanie priemerných ročných úhrnov zrážok, teplôt vzduchu a odtoku za obdobie 1991 – 2010 pre 213 rakúskych povodí.

Fig. 2. Comparison of the mean annual precipitation, mean annual air temperatures and mean annual flows in 1991 – 2010 for 213 Austrian catchments.



Obr. 3. Porovnanie hodnôt NSE v kalibračných a validačných obdobiach pre 213 rakúskych povodí. Oranžová farba je kalibrácia, modrá farba je validácia. Lomená červená čiara označuje mediánové hodnoty získané celistvou verziou modelu, lomená fialová čiara označuje mediánové hodnoty získané polo-rozčlenenou verziou. Krabicové grafy sú zobrazené v rozsahu 5-teho až 95-teho percentilu.

Fig. 3. Comparison of the NSE values in the calibration and validation periods for 213 Austrian catchments. The orange box plots are the calibration periods, the blue box plots are the validation periods. The red line inside the boxes represents the median values of the NSE obtained by lumped version of the model, the purple line represents the median values of the NSE obtained by semi-distributed version of the model. The box plots are displayed in the range of the 5th to 95th percentile.

Pri pohľade na obr. 4, ktorý ilustruje porovnanie z hľadiska hodnôt objemovej chyby (VE) je viditeľné, že rozdiely medzi celistvou a polo-rozčlenenou verziou modelu (v kalibráciách) nie sú veľké. Napr. použitím celistvej verzie modelu boli priemerné hodnoty VE v jednotlivých kalibračných obdobiach nasledovné: -0,3 % (1991 – 2000), -0,4 % (2001 – 2010). Použitím polo-rozčlenej verzie modelu sa dosiahli priemerné hodnoty 0,2 % (kalibračné obdobie 1991 – 2000); 0,3 % (kalibračné obdobie 2001 – 2010). Pri porovnaní priemerných hodnôt VE vo validáciách, je viditeľné, že polo-rozčlenenou verziou sme získali o niečo lepšie hodnoty (t.j. hodnoty bližšie k nule). Napr. pre validácie v prvom kalibračnom období (t.j. 1991 – 2000) sme dosiahli priemerné hodnoty VE 2 % (použitím celistvej verzie) a 0,7 % (použitím polo-rozčlenej verzie). Pre validácie v druhom kalibračnom období (t.j. 2001 – 2010) sme dosiahli priemerné hodnoty VE -3 % (celistvá verzia modelu) a 0,7 % (polo-rozčlenená verzia modelu). Z uvedených zistení je zjavné, že obidve verzie modelu dosahujú uspokojivé výsledky (t.j. priemerné hodnoty VE sú okolo nuly). Zároveň sa ukázalo, že polo-rozčlenená verzia modelu mierne lepšie kopíruje trend meraných hodnôt (najmä vo validáciách).

Zhodnotenie vplyvu priestorovej konceptualizácie TUV modelu z hľadiska simulácií priemerných mesačných prietokov pre vybrané pilotné povodie

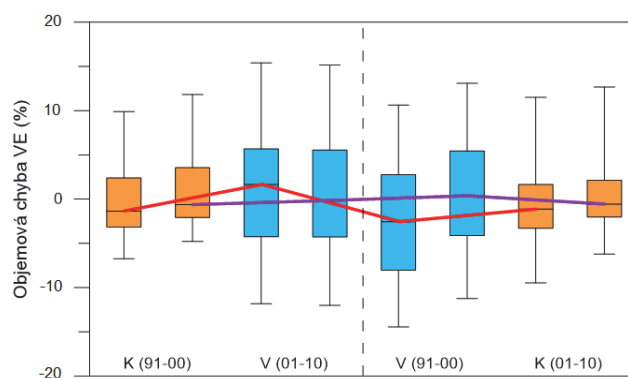
Vybrané pilotné povodie (Neukirchen) sa nachádza v horskej (alpskej) časti Rakúska (obr. 1). Detailnejší opis povodia je uvedený napr. v práci Sleziač (2017). Pre simuláciu sme použili parametre z prvého kalibrač-

ného obdobia (t.j. 1991 – 2000). Z obr. 5 a 6 (hore a dole) je viditeľné, že hodnoty prietokov získané polo-rozčlenenou verziou modelu sú o niečo bližšie reálne meraným. Taktiež je viditeľné, že v letných mesiacoch (jún, júl, august) boli dosiahnuté vyššie hodnoty prietokov (oproti zimným mesiacom).

Z výsledkov možno usúdiť, že simulované prietoky získané použitím obidvoch verzií modelu sa v uspokojivej zhode podobajú reálne meraným. O niečo lepšie výsledky boli dosiahnuté použitím polo-rozčlenej verzie modelu, čo zároveň poukazuje na to, že priestorová konceptualizácia modelu (t.j. priestorové delenie povodia v modeli, resp. rozčlenenie vstupov) má vplyv na výsledné simulácie.

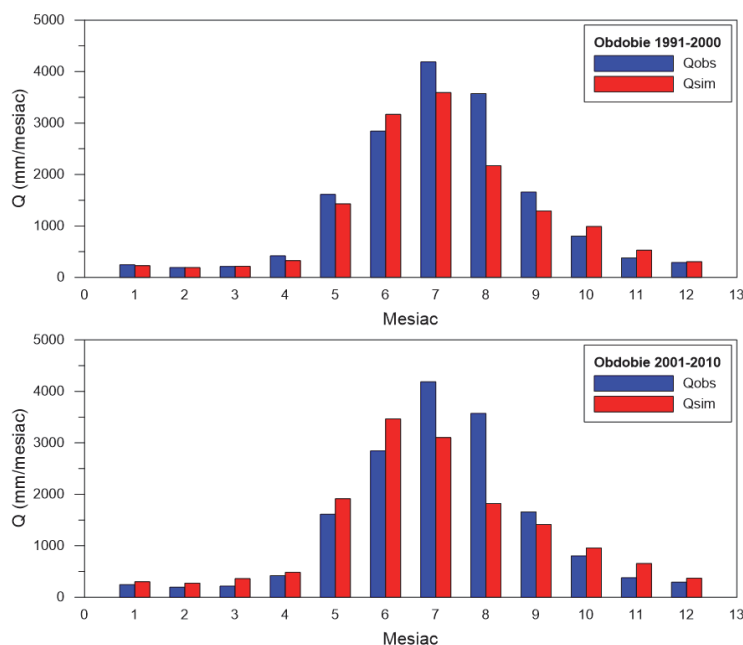
Diskusia a záver

V rámci tohto príspevku sme sa zamerali na posúdenie vplyvu konceptualizácie hydrologického modelu (TUV model) na presnosť simulácie priemerných denných a mesačných prietokov. Model TUV môžeme podľa priestorového rozdelenia pre dané povodie zostaviť ako celistvý, resp. polo-rozčlenený, kde vstupné údaje sú priestorovo rozčlenené (v našom prípade podľa výškových pásiem po 200 metrov). V práci sme použili obidve verzie modelu (t.j., celistvú a polo-rozčlenenú), pričom pre ich parametrizáciu sme použili kombináciu kritérií Nash-Sutcliffovho koeficientu a logaritmickeho Nash-Sutcliffovho koeficientu. Obidve verzie modelu boli kalibované v dvoch obdobiach medzi rokmi 1991 – 2010. Ako modelované územie sme zvolili územie Rakúska, kde sme metodický postup aplikovali pre reprezentatívnu vzorku 213 povodií a taktiež aj pre jedno pilotné povodie.



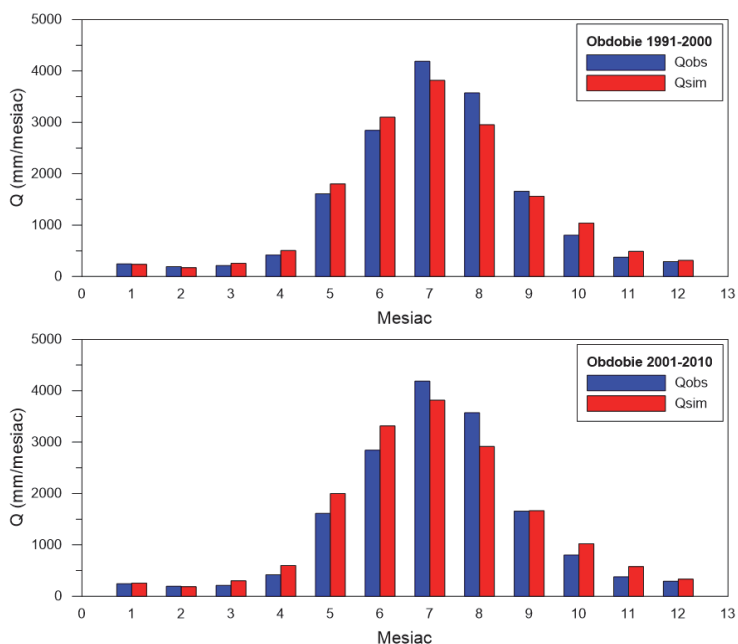
Obr. 4. Porovnanie hodnôt VE v kalibračných a validačných obdobiach pre 213 rakúskych povodií. Oranžová farba je kalibrácia, modrá farba je validácia. Lomená červená čiara označuje mediánové hodnoty získané celistvou verziou modelu, lomená fialová čiara označuje mediánové hodnoty získané polo-rozčlenenou verziou. Krabicové grafy sú zobrazené v rozsahu 5-teho až 95-teho percentilu.

Fig. 4. Comparison of the VE values in the calibration and validation periods for 213 Austrian catchments. The orange box plots are the calibration periods, the blue box plots are the validation periods. The red line inside the boxes represents the median values of the VE obtained by lumped version of the model, the purple line represents the median values of the VE obtained by semi-distributed version of the model. The box plots are displayed in the range of the 5th to 95th percentile.



Obr. 5. Porovnanie pozorovaných (modrá farba) a simulovaných (červená farba) priemerných mesačných prietokov v kalibračnom období 1991 – 2000 a vo validačnom období 2001 – 2010 pre vybrané povodie (Neukirchen). Simulované prietoky boli získané celistvou verziou TUW modelu.

Fig. 5. Comparison of the observed (blue colour) and simulated (red colour) mean monthly flows in the calibration period 1991 – 2000 and in the validation period 2001 – 2010 for one pilot catchment. Simulated flows were obtained by the lumped version of the TUW model.



Obr. 6. Porovnanie pozorovaných (modrá farba) a simulovaných (červená farba) priemerných mesačných prietokov v kalibračnom období 1991 – 2000 a vo validačnom období 2001 – 2010 pre vybrané povodie (Neukirchen). Simulované prietoky boli získané polo-rozčlenenou verziou TUW modelu.

Fig. 6. Comparison of the observed (blue colour) and simulated (red colour) mean monthly flows in the calibration period 1991 – 2000 and in the validation period 2001 – 2010 for one pilot catchment. Simulated flows were obtained by the semi-distributed version of the TUW model.

V prvej časti práce sme posúdili kvalitu simulácie priemerných denných prietokov pre 213 rakúskych povodí. Overenie kvality simulácie obidvoch verzií modelu bolo zabezpečené pomocou grafických porovnaní (z hľadiska ukazovateľa Nash-Sutcliffovho koeficientu NSE a objemovej chyby VE). Výsledky ukázali, že použitím polo-rozčlenenej verzie modelu sme dosiahli vyššie hodnoty NSE v kalibráciách aj validáciách (oproti hodnotám získaným celistvou verziou modelu). Z hľadiska získaných hodnôt objemovej chyby, boli zistenia (v kalibráciách) porovnateľné pri použití obidvoch verzií modelu. Vo validáciách sa ukázala byť spoľahlivejšia polo-rozčlenená verzia modelu, ktorá o niečo lepšie kopírovala trend meraných hodnôt. Viacerí autori porovnávali hydrologické modely rozdielnej štruktúry (komplexnosti). Napr. Viney a kol. (2005) vyhodnotili 10 modelov, ktoré disponovali rozdielnou úrovňou zložitosti (komplexnosti), t.j. od celistvých modelov až po rozčlenené modely pre vybrané povodie v Nemecku. Zistili, že jednoduchšie modely majú tendenciu prekonať komplexnejšie modely v kalibračných aj validačných obdobiach. Reed a kol. (2004) v ich štúdiu ukázali, že celistvý model, ktorý bol použitý ako referenčný dosiahol podobnú, v niektorých prípadoch dokonca aj lepšiu celkovú výkonnosť ako rozčlenené modely. Ďalší autori, napr. Breuer a kol. (2009) a Seiller a kol. (2012) v štúdiách ukázali len malé rozdiely medzi modelmi rozdielnej komplexnosti.

Prezentované výsledky tejto práce ukázali, že priestorová konceptualizácia modelu má vplyv na simulácie prietokov. Polo-rozčlenenou verziou modelu sme získali hodnoty prietokov, ktoré reálnejšie kopírovali trend meraných hodnôt. Treba si však uvedomiť, že spoľahlivosť výsledkov hydrologického modelovania v značnej miere závisí od disponibilných/reprezentatívnych vstupných údajov, od parametrizácie modelov, od konceptualizácie hydrologických procesov prebiehajúcich na povodí a pod. (Beven, 2001). S ohľadom na uvedené, treba k úlohám modelovacieho typu pristupovať nesmierne opatrne a snažiť sa pri nich zohľadniť aj mnohé neistoty, ktoré s nimi súvisia.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-15-0425 a APVV-15-0497 a projektom VEGA č. 1/0710/15.

Literatúra

- Ardia, D., Mullen, K.M., Peterson, B.G., Ulrich, J. (2016): DEoptim: Differential evolution in R. R package, version 2.2-4, dostupné na: <https://cran.r-project.org/web/packages/DEoptim/citation.html>.
- Bai, P., Liu, X., Liang, K., Liu, Ch. (2015): Comparison of performance of twelve monthly water balance models in different climatic catchments of China. *Journal of Hydrology* 529, 1030-1040.

- Bergström, L. (1995): The HBV model. *Computer models of watershed hydrology*, edited by V.P. Singh. *Water Resour. Publ.*, 443-476.
- Beven, K. (2001): K. (2001): *Rainfall-runoff modelling: The primer*. Wiley&Sons, Ltd., Chichester, 353 s.
- Breuer, L., Huisman, J. A., Willems, P., Bormann, H., Bronstert, A., Croke, B. F. W., Frede, H.-G., Gräff, T., Hubrechts, L., Jakeman, A. J., Kite, G., Lanini, J., Leavesley, G., Lettenmaier, D. P., Lindström, G., Seibert, J., Sivapalan, M., and Viney, N. R. (2009): Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modeling (LUCHEM), I: Model intercomparison with current land use. *Adv. Water Res.*, 32, 129-146.
- Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., Bourqui, M., Hendrickx, F. (2014): On the lack of robustness of hydrologic models regarding water balance simulation: a diagnostic approach applied to three models of increasing complexity on 20 mountainous catchments. *Hydrol. Earth. Sci.*, 18, 727-746.
- Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M., Hendrickx, F. (2012): Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments. *Water Resour. Res.*, 48, W05552, doi: 10.1029/2011WR011721.
- Fowler, H.J.A., Peel, M.C., Western, A.W., Zhang, L., Peterson, T.J. (2016): Simulating runoff under changing climatic conditions: Revising an apparent deficiency of conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour. Res.*, 52, 1820-1846.
- Gaál, L., Szolgay, J., Kohnová, S., Parajka, J., Merz, R., Viglione, A., Blöschl, G. (2012): Flood timescales: Understanding the interplay of climate and catchment processes through comparative hydrology. *Water Resour. Res.*, 48, W04511.
- Jeníček, M. (2005): Možnosti využití srážko-odtokových modelů na malých a středně velkých povodích, In Langhammer, J., Vliv změn přírodního prostředí povodí a údolní nivy na povodňové riziko, PřF UK, Praha, 112-126.
- Klemeš, V. (1986): Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrol. Sci. J.*, 31(1), 13-24, doi:10.1080/02626668609491024.
- Merz, R., Parajka, J., Blöschl, G. (2011): Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses. *Water Resour. Res.*, 47, W02531, doi: 10.1029/2010WR009505.
- Nash, J.E., a Sutcliffe, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models, part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290, doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- Parajka, J., Merz, R., Blöschl, G. (2007): Uncertainty and multiple calibration in regional water balance modelling case study in 320 Austrian catchments. *Hydrol. Process*, 21, 435-446, doi: 10.1002/hyp.6253.
- Parajka, J. (2005): Merz, R., Blöschl, G. (2005): A comparison of regionalisation for catchment model parameters. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9, 157-171, doi:10.5194/hess-9-157-2005.
- Pebesma, E.J. (2001): *Gstat user's manual*. Department of Physical Geography, Utrecht University, The Netherlands.

- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2003): Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.*, 279, 275-289, doi:10.1016/S0022-1694(03)00225-7.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2001): Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments, *J. Hydrol.*, 242, 275-301.
- Reed, J., Koren, V., Smith, M., Zhang, Z., Moreta, F., Seo, D.-J., DMIP Participants. (2004): Overall distributed model intercomparison project results. *Journal of Hydrology* 298(1-4), 27-60.
- Seiller, G., Anctil, F., Perrin, C. (2012): Multimodel evaluation of twenty lumped hydrological models under contrasted climate conditions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16 (4), 1171-1189. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-16-1171-2012>.
- Sleziak, P. (2017): Modelovanie zrážkovo-odtokových procesov v podmienkach meniacich sa klimatických pomerov. Dizertačná práca, SvF-104305-65272, 189 s.
- Sleziak, P., Hlavčová, K., Szolgay, J., Parajka, J. (2017): Závislosť kvality simulácie odtoku pomocou zrážkovo-odtokového modelu od rozdielosti hydroklimatických podmienok kalibračného a validačného obdobia. *Acta Hydrologica Slovaca*, 18(1), 23-30.
- Sleziak, P., Szolgay, J., Hlavčová, K., Parajka, J. (2016): The impact of the variability of precipitation and temperatures on the efficiency of a conceptual rainfall-runoff model. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 24(4), 1-7, doi: <https://doi.org/10.1515/sjce-2016-0016>.
- Van Esse, W.R., Perrin, C., Booi, M.J., Augustijn, D.C.M., Fenicia, F., Kavetski, D., Lobligois, F. (2013): The influence of conceptual model structure on model performance: a comparative study from 273 French catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 4227-4239, doi:10.5194/hess-17-4227-2013.
- Vaze, J., Post, D.A., Chiew, F.H.S., Perraud, J.M., Viney, N.R., Teng, J. (2010): Climate nonstationarity – Validity of calibrated rainfall-runoff models for use in climatic changes studies. *J. Hydrol.*, 394 (3-4), 447-457, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.09.018.
- Viglione, A., Parajka, J. (2014): TUWmodel: Lumped hydrological model for educational purposes, R package version 0.1-4, dostupné na: <http://CRAN.R-project.org/package=TUWmodel> (posledná úprava 13.9.2016).
- Viglione, A., Parajka, J., Rogger, M., Salinas, J.L., Laaha, G., Sivapalan, M., Blöschl, G. (2013): Comparative assessment of predictions in ungauged basins – Part 3: Runoff signatures in Austria, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 2263-2279, doi:10.5194/hess-17-2263-2013.
- Viney, N.R., Croke, B. F.W., Breuer, L., Bormann, H., Bronstert, A., Frede, T.H., Hubrechts, G.T., Huisman, J.A., Jakeman, A.J., Kite, G.W., Lanini, J., Leavesley, G., Lettenmaier, D.P., Lindström, G., Seibert, J., Sivapalan, M., Willems, P. (2005): Ensemble modelling of the hydrological impacts of land use change. In: Zerger, A., Argent, R.M. (Eds.), MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, 2967– 2973. ISBN: 0-9758400-2-9.
- Wagener, T., (2003): T. (2003): Evaluation of catchment models. *Hydrol. Process.*, 17, 3375-3378.

IMPACT OF THE SPATIAL CONCEPTUALIZATION OF A HYDROLOGICAL MODEL ON THE ACCURACY OF FLOW SIMULATIONS

In this study we have investigated the impact of the spatial conceptualization of the selected rainfall-runoff (r-r) model on the accuracy of the mean daily and monthly flow simulations. In our investigation, we adopted the conceptual r-r model (the TUW model). According to the spatial discretization for the given catchment, the TUW model can be compiled as the lumped or semi-distributed, where the inputs are spatially distributed. In this study we used both versions of the TUW model (i.e., lumped vs. semi-distributed version). Both versions of the model were calibrated in two periods between 1991-2010. For the model parametrization, the combination of the Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) and the logarithmic Nash-Sutcliffe coefficient (logNSE) was used. This combination was used to achieve a balanced evaluation of high and low flows. Daily data from 213 representative Austrian catchments were used in this study. Firstly, we have assessed the quality of the simulations of the mean daily flows (in terms of NSE and VE) for 213 catchments. The findings showed that the better results (i.e. the

higher NSE values in the calibrations and validations) were achieved using the semi-distributed version of the model (to compare with the lumped version). In terms of VE, the both versions of the model achieved comparable results (in calibrations). Low values of the volume error (i.e., the values around 0) indicates that the calibration is essentially unbiased. The validation results showed that the semi-distributed version of the model more adequately simulates the representation of the hydrological processes (to compare with the lumped version).

In the next part of the study, we selected one pilot catchment on which we demonstrated the impact of the spatial model conceptualization on the accuracy of the mean monthly flow simulations. The results indicate that the semi-distributed version of the TUW model represents the hydrological processes more realistically (in comparison to the lumped version). From these results, it is clear that the spatial conceptualization of the model has the impact on the simulations of the hydrological processes. However, it is important to note

that the reliability of the hydrological modeling results depends on the available and representative inputs, on the parametrization of the particular hydrological models, on the conceptualization of hydrological

processes which take place in the catchment. For the future, it would be interesting to extend such analysis to other regions. Also more models (i.e., HBV vs. physically based models) could be tested in future.

Ing. Patrik Sleziak, PhD.
prof. Ing. Ján Szolgay, PhD.
prof. Ing. Kamila Hlavčová, PhD.
Bc. Martin Kubáň
Katedra vodného hospodárstva krajiny, SvF, STU
Radlinského 11, 810 05 Bratislava
Tel.: +421 908 965 784
E-mail: patrik.sleziak@stuba.sk
jan.szolgay@stuba.sk
kamila.hlavcova@stuba.sk
martin.kuban@stuba.sk

Univ. Doz. Dr. Juraj Parajka
Institute of Hydraulic Engineering and Water Resource Management
Vienna University of Technology
Karlsplatz 13/222
A-1040 Vienna
E-mail: parajka@hydro.tuwien.ac.at